

ΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ

**Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο**

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

ΣΥΝΔΙΟΡΓΑΝΩΣΗ



**ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΡΗΤΗΣ
REGION OF CRETE**



ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2024



12ο

**Πανελλήνιο Συνέδριο
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ**

17-19 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2024

Σπίτι του Πολιτισμού, ΡΕΘΥΜΝΟ

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Πρόεδρος

Παπαδογιάννης Νεκτάριος, Καθηγητής Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ)

Αντιπρόεδροι

Μπακαρέζος Ευθύμιος, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Δημητρίου Βασίλης, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Γ. Γραμματέας

Καλιακάτσος-Παπακώστας Μάξιμος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Υπεύθυνος Επικοινωνίας

Κασελούρης Ευάγγελος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Μέλη

Ταταράκης Μιχαήλ, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Τζεδάκη Αικατερίνη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ

Αλεξανδράκη Χρυσούλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ

Κουζούπης Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Στεφανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Πολυχρονόπουλος Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Πασχαλίδου Παναγιώτα Στυλιανή, Λέκτορας ΕΛΜΕΠΑ

Ορφανός Ιωάννης, Δρ. Μηχ., ΕΔΙΠ ΕΛΜΕΠΑ

Μποτονάκης Αντώνιος, Δρ. ΕΔΙΠ ΕΛΜΕΠΑ

Πιστογιαννάκης Στέλιος, ΕΤΕΠ ΕΛΜΕΠΑ

Κεφαλογιάννης Νικόλαος, ΕΤΕΠ ΕΛΜΕΠΑ

Παπαλεξάκης Αντώνιος, ΕΤΕΠ ΕΛΜΕΠΑ

Καλέρης Κωνσταντίνος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής ΕΛΜΕΠΑ

Μπρέζας Σπύρος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής ΕΛΜΕΠΑ

Τσιούτας Κωνσταντίνος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής ΕΛΜΕΠΑ

Κανιολάκης-Καλούδης Εμμανουήλ, Υποψήφιος Δρ. ΕΛΜΕΠΑ

Παπαδάκη Ελένη, Υποψήφια Δρ. ΕΛΜΕΠΑ

Φιτσανάκης Μίνως, Υποψήφιος Δρ. ΕΛΜΕΠΑ

Κεχράκος Κωνσταντίνος, Υποψήφιος Δρ. ΕΛΜΕΠΑ

Γιαχακοπούλου Αικατερίνη, Γραμματειακή υποστήριξη

Πατραμάνη Ελένη, Γραμματειακή υποστήριξη

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αλεξανδράκη Χρυσούλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ
Ανδρεοπούλου Αρετή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ
Αντωνόπουλος Χρήστος, Καθηγητής Α.Π.Θ
Βασιλειάδης Βασίλειος, Δρ. Μηχ., Ε.ΔΙ.Π Α.Π.Θ.
Βρύσης Λάζαρος, Δρ. Μηχ., Ε.ΔΙ.Π Α.Π.Θ.
Βρύζας Νικόλαος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής Α.Π.Θ.
Γούσιος Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.
Δημητρίου Βασίλης, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Δημούλας Χαράλαμπος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ζέρβας Παναγιώτης, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου
Καλέρης Κωνσταντίνος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής ΕΛΜΕΠΑ
Καλλίρης Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Καλιακάτσος-Παπακώστας Μάξιμος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Καραποστόλη Αιμιλία, Δρ./Μεταδιδακτορική ερευνήτρια Α.Π.Θ.
Κασελούρης Ευάγγελος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Κατερέλος Διονύσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Κλωνάρη Δέσποινα, Δρ., Ε.ΔΙ.Π., Α.Π.Θ.
Κουζούπης Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Κούτρας Αθανάσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου
Ματσιώλα Μαρία, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών
Μουρτζόπουλος Ν. Ιωάννης, Ομότιμος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών
Μπακαρέζος Ευθύμιος, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Μπάμνιος Γεώργιος, Καθηγητής ΔΙ.ΠΑ.Ε.
Μπάρκας Νικόλαος, Καθηγητής ΔΠΘ
Μπρέζας Σπύρος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής ΕΛΜΕΠΑ
Ορφανός Ιωάννης, Δρ. Μηχ., ΕΔΙΠ ΕΛΜΕΠΑ
Παπαδάκης Παναγιώτης, Ερευνητής ΙΤΕ
Παπαδέλης Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδογιάννης Νεκτάριος, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Παπανικολάου Γιώργος, Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παστιάδης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Πασχαλίδου Παναγιώτα Στυλιανή, Λέκτορας ΕΛΜΕΠΑ
Πολυχρονόπουλος Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Ποτηράκης Στέλιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής
Ραγκούση Μαρία, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής
Σεβαστιάδης Χρήστος, Δρ. Μηχ., Ε.ΔΙ.Π., Α.Π.Θ.
Σκαρλάτος Δημήτριος, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών
Σούμπερτ Γκότφριντ, Δρ. Σύμβουλος Ακουστικής

Σπυρίδης Χαράλαμπος, τ. Καθηγητής, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Στεφανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Συμεωνίδης Ανδρέας, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ταρουδάκης Μιχάλης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης
Ταταράκης Μιχάλης, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ
Τάτλας Νικόλαος-Αλέξανδρος, Καθηγητής ΠΑΔΑ
Τζεδάκη Αικατερίνη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΛΜΕΠΑ
Τσινίκας Νικόλαος, Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φλώρος Ανδρέας, Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Χαδέλλης Λουκάς, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου
Χατζηαντωνίου Παναγιώτης, Δρ. Μηχ. Ε.ΔΙ.Π Πανεπιστημίου Πατρών
Χουρμουζιάδου Καλλιόπη, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός, ΣΕΠ ΕΑΠ

ΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ

1. Μιχάλης Ταρουδάκης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης - Συνεργαζόμενο μέλος ΔΕΠ με το Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών του ΙΤΕ
Τίτλος Ομιλίας: «"Βλέποντας " στη θάλασσα με ήχους. Η Υποβρύχια Ακουστική ξανά στο προσκήνιο»
2. Rolf Bader, Professor University of Hamburg
Τίτλος Ομιλίας: "Current Challenges and Directions in Musical Acoustics"

ΧΟΡΗΓΟΙ

Πλατινένιος χορηγός: **GroupScience**



Χρυσοί χορηγοί: **Alpha Acoustiki, MoT Panels, Saint-Gobain, Sealed Air**



ΕΚΘΕΤΕΣ

eaGROUP

ΣΥΝΕΔΡΙΕΣ

Συνεδρία 1: Ήχος και τεχνητή νοημοσύνη

Συνεδρία 1Α: Περιβαλλοντική Ακουστική – ηχοτοπία

Συνεδρία 2: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου

Συνεδρία 2Α: Περιβαλλοντική Ακουστική – ηχοτοπία

Συνεδρία 3: Θόρυβος – Δονήσεις

Συνεδρία 3Α: Υποβρύχια Ακουστική

Συνεδρία 4: Μουσική Ακουστική

Συνεδρία 4Α: Κτηριακή – Αρχιτεκτονική Ακουστική

Συνεδρία 5: Φυσική Ακουστική

Συνεδρία 5Α: Κτηριακή – Αρχιτεκτονική Ακουστική

Συνεδρία 6: Γενική Ακουστική – Ακουστικές μετρήσεις και όργανα

Συνεδρία 6Α: Εκπαίδευση και Ακουστική – Ομιλία, λόγος

Πίνακας περιεχομένων Πρακτικών - «Ακουστική 2024»

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1: Ήχος και Τεχνητή Νοημοσύνη

Μελέτη δικτύων Kolmogorov-Arnold για την αξιόπιστη πολυετικετική κατηγοριοποίηση μουσικών οργάνων	12
Exploring Non-Autoregressive transformers for efficient adaptive music composition	20
Εφαρμογές αλγορίθμων γενετικής τεχνητής νοημοσύνης για την παραγωγή ηχητικού περιεχομένου στα νέα μέσα και την επικοινωνία	28
Περιβάλλον ακουστικής προσομοίωσης χώρων για την αναζήτηση τοποθεσίας κινηματογράφησης	35
Κατασκευή δεδομένων για την εκπαίδευση και αξιολόγηση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης στον εντοπισμό ηχητικών συμβάντων	41
Διαδικτυακή εφαρμογή για την ανάλυση συναισθηματικής πληροφορίας	49

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1Α: Περιβαλλοντική Ακουστική – Ηχοτοπία

Επιστροφή στην Αχαράβη: Καταγραφή και ανάλυση του ηχητικού περιβάλλοντος και ηχοτοπίου μιας προστατευόμενης περιοχής	56
Investigating the urban soundscape of Athens through soundwalks and acoustic measurements	64
Η εισβολή του ιδιωτικού στον δημόσιο χώρο: Προβλήματα προσπέλασης και ηχοπροστασίας από την επέκταση των τραπεζοκαθισμάτων	71
Ηχοτοπία προστατευόμενων οικοτόπων στα Λευκά Όρη Χανίων	79
Τα ηχοτοπία της θαλάσσιας προστατευόμενης περιοχής της Γυάρου ως μέσο ερμηνείας περιβάλλοντος και ευαισθητοποίησης	87
Ανάλυση μεικτού ηχοτοπίου: Καστελλάκια, Ρέθυμνο	95

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου

CAVEMOVE: Συλλογή ακουστικών δεδομένων για τη μελέτη τεχνολογιών φωνής μέσα σε κινούμενα οχήματα	103
Ζητήματα και προβληματισμοί στη χωρική μείξη έργων δημοφιλούς μουσικής	111
Στοχευμένη ενεργή ακύρωση θορύβου με μετρικές ενόχλησης	118

Σύγκριση και ομαδοποίηση αμφιωτικών χωρικών φίλτρων (HRTF) με χρήση μεθόδων μεταεπεξεργασίας και μείωσης διαστάσεων	126
Αξιολόγηση υποκειμενικής προτίμησης σε ισοσταθμισμένα ακουστικά κεφαλής	135
Ανάπτυξη ηχητικού συστήματος ακυρωτικής παρεμβολής μεταξύ καναλιών σε ανακλαστικό χώρο	143
Ανάκτηση ψηφιακών ηχητικών αρχείων “.wav.” στην ψηφιακή δικανική επιστήμη του ήχου	151
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2Α: Περιβαλλοντική Ακουστική – Ηχοτοπία	
Το ηχητικό περιβάλλον της φοιτητικής καθημερινότητας την περίοδο της πανδημίας	159
Σφαιρική νομική πείρα από δικαστική και εξωδικαστική μεταχείριση περιπτωσιολογίας υποθέσεων ηχορρύπανσης	165
Διακρίβωση μικροφώνων αναφοράς με τη μέθοδο της αντιστροφής και η εφαρμογή τους στην διακρίβωση μικροφώνων ελεύθερου πεδίου	171
Ηχητικός σχεδιασμός ακουστικού χάρτη σε χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς	179
AudioScout: Συλλογή ηχητικών δεδομένων στο πεδίο	187
Το headphone theatre πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την πανδημία του COVID-19	194
Ηχητική αποτύπωση μαγνητικών καταιγίδων με στοχαστικές τεχνικές σύνθεσης	200
Πρώιμες ενδείξεις συνειδητής διαχείρισης της ηχητικής χωρικότητας στην αρχαιοελληνική τραγωδία και κωμωδία	208
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3: Θόρυβος – Δονήσεις	
Πειραματική αξιολόγηση συστήματος ενεργητικής ακύρωσης θορύβου για χαμηλόσυχνες ακουστικές διαταραχές	216
Εφαρμογή συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου σε βιομηχανικό χειριστήριο ελέγχου	224
Περιπτωσιολογική μελέτη (case study) εντοπισμού ηχοδιαφυγών με ακουστική απεικόνιση	232
Διερεύνηση δονητικής συμπεριφοράς παραδοσιακού ξύλινου και εκτυπωμένου τζουρά	240
Πειραματική έρευνα για την εφαρμογή του συστήματος σκίασης τύπου ακουστικών περσίδων για την μείωση του θορύβου στην πρόσοψη γραφειακού κτιρίου	250

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3Α: Υποβρύχια Ακουστική

Εφαρμογή των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων σε αντίστροφα προβλήματα θαλάσσιας Ακουστικής 264

Παραγωγή ήχων από το λεοντόψαρο (*Pterois miles*), επίδραση του μεγέθους και του φύλου 272

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4: Μουσική Ακουστική

Ξύλο ή μέταλλο; Επίδραση του υλικού στο ηχόχρωμα των Φλάουτων 280

Automatic guitar string detection based on the inharmonicity coefficient 286

Δονητική ανάλυση κυμβάλων και καπακιών τζουρά 294

Μελέτες για την ηχητική κάλυψη των μεγάλων παρελάσεων του καρναβαλιού για την Πάτρα και την Ξάνθη 302

Exploratory analysis of sound datasets in musical acoustics: the case of drumheads 317

Κρουστική διέγερση ράβδου και ακουστικοποίηση στο πεδίο χρόνου-Beam auralization in the time domain using the finite element method 325

Συστηματική μελέτη των σφαιρικών κατευθυντικών ιδιοτήτων του λαούτου, της λάφτας και του ουτιού 333

Αναγνώριση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και εξαγωγή μουσικής πληροφορίας από ηχογραφήσεις μπεντίρ 342

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4Α: Κτηριακή – Αρχιτεκτονική Ακουστική

Μορφές και λειτουργίες στους αθηναϊκούς θεατρικούς χώρους της σύγχρονης εποχής 349

Διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ιερού Ναού Παναγίας Καπνικαρέας 356

Ακουστική & ηλεκτροακουστική αναβάθμιση αμφιθέατρου διαλέξεων στην Ιατρική σχολή του Α.Π.Θ 365

Διερεύνηση των ακουστικών συνθηκών, στον χώρο της Εκκλησίας του Δήμου, στην Αρχαία Πνύκα στην Αθήνα, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες 375

Ακουστική μελέτη και βελτίωση studio ηχογραφήσεων και μουσικής εξάσκησης 389

Ακουστική άνεση σε χώρους ευεξίας: Η συμβολή της στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και ανάπλαση των Λουτρών Λαγκαδά 397

Ο ρόλος του συμβούλου Ακουστικής στην ενσωμάτωση των συστημάτων αειφορίας στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό κτιρίων	405
Ακουστικός σχεδιασμός, ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής της νέας Συνεδριακής Αίθουσας Περιφέρειας Θεσσαλονίκης	426
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5: Φυσική Ακουστική	
Χαρακτηρισμός ακουστικών μεταλλικών με χρήση πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ	433
Πυρηνική φυσική με ακουστικά κύματα: καινοτόμοι κρυσταλλικοί ακουστικοί κυματιστές για παραγωγή ακτίνων-γ στενού φάσματος	441
Υπολογιστική μελέτη απόκρισης συντονιστών σωλήνα σε διέγερση N-παλμού από πηγή ήχου πλάσματος λέιζερ	448
Υπολογιστική μελέτη της παραγωγής και διάδοσης υπερήχων σε στερεούς στόχους πυριτίου υπό την επίδραση παλμών laser	456
Προσεγγιστική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από απορροφητική σφήνα	464
New analytical solution for the calculation of the acoustic diffraction field around a rigid edge in time and frequency domain	472
Εισαγωγή κινησιολογικών δεδομένων αλληλεπίδρασης μουσικού – μπαγκέτας – κυμβάλου σε FEM-BEM μοντέλα δονητικής και ακουστικής απόκρισης	480
Εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από σφήνες	490
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5Α: Κτηριακή – Αρχιτεκτονική Ακουστική	
Προβλήματα αποκατάστασης & ηχοπροστασίας στα αρχαία θέατρα της Δ. Ελλάδας & της Ηπείρου	498
Μελέτη ακουστικής αναβάθμισης στο νεοκλασικό κτήριο του Δημοτικού Ωδείου Βόλου	509
Μια υπολογιστική πλατφόρμα για την μελέτη και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης σε μεγάλους κλειστούς χώρους	517
Ακουστική μελέτη και προσομοίωση του ωδείου του Ηρώδη του Αττικού	525
Κυκλική διεργαστηριακή μέτρηση δείκτη ηχομείωσης R_w	533
Εφαρμογές προσαρμοζόμενης ακουστικής σε αίθουσα πολλαπλών χρήσεων σχολικού συγκροτήματος στον Βόλο	541

Βελτιστοποίηση σχεδίασης στις χαμηλές συχνότητες παν-κατευθυντικών πηγών ήχου για μετρήσεις	549

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6: Γενική Ακουστική – Ακουστικές μετρήσεις και όργανα

Χαρακτηρισμός και έλεγχος υπερ-υψίσυχων τρεχόντων ακουστικών κυμάτων σε κρυσταλλικά στερεά με την χρήση ταχείας φασικής απεικόνισης με την χρήση ns λέιζερ	555
Προσομοίωση ακουστικής απόκρισης χώρου για αυθαίρετη επιλογή θέσης δέκτη-πηγής	564
Inversre characterization of sound absorbing media using one dimensional analytical Biot's poroelasticity theory solutions	572
Ταυτοποίηση πλαστικής παραμόρφωσης, σχηματισμού ρωγμών και εξέλιξης αστοχίας σε χάλυβα με την μέθοδο της ακουστικής εκπομπής	580
Ανίχνευση συμβάντων ακουστικής εκπομπής σε μεταλλικές πύλες δεξαμενών ανύψωσης σε ποτάμια	588
Remote microphone virtual sensing with multi-microphone configurations	594

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6Α: Εκπαίδευση και Ακουστική – ομιλία, λόγος

Η χρήση οπτικοακουστικών διαδραστικών αφηγήσεων και δραστηριοτήτων ως μέσο ηχητικής ευαισθητοποίησης παιδιών 9-12 ετών	602
A framework for organizing audio-visual cross-modal correspondences for the Soundsketcher project	609
Ακουστο-απτική διέγερση και αισθησιοκινητικός συγχρονισμός: μια μουσική διδακτική παρέμβαση	617
Κατευθυντικότητα των ελληνικών φωνηέντων στο τραγούδι βάσει συχνοτήτων φωνοσυντονισμού: Μελέτη περίπτωσης κλασικού τραγουδιού και Βυζαντινής ψαλτικής	625
Χαρτογράφηση του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών στο σύγχρονο φωνητικό ιδίωμα του ριζίτικου τραγουδιού	634
Εφαρμογές σοβαρών παιχνιδιών στη συλλογή και συναισθηματική επισημείωση δειγμάτων ομιλίας	642
Η επίδραση της οπτικής επαφής στη δικτυακή μουσική εκτέλεση	650

Μελέτη δικτύων Kolmogorov-Arnold για την αξιόπιστη πολυετικετική κατηγοριοποίηση μουσικών οργάνων

Άγγελος Γερούλανος¹, Παναγιώτης Ζέρβας², Ιωάννης Τζήμας³

¹a.geroulanos@go.uop.gr

²p.zervas@uop.gr

³tzimas@uop.gr

Εργαστήριο Δεδομένων και Μέσων (Data and Media – DM Lab)
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,
Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία εξετάζει τη χρήση των Δικτύων Kolmogorov-Arnold (KANs) σε συνδυασμό με το CNN14 για την ταξινόμηση πολλαπλών ετικετών μουσικών οργάνων σε πολυφωνικές ηχογραφήσεις. Συγκρίνεται η απόδοση του CNN14-KANLinear με τον παραδοσιακό ταξινομητή CNN14-MLP, χρησιμοποιώντας Mel-φασματογραφήματα. Παρότι το MLP παρουσιάζει υψηλότερη ακρίβεια, το KAN πλεονεκτεί στην ερμηνευσιμότητα λόγω της χρήσης B-splines, προσφέροντας μια πιο διαφανή αντιστοίχιση εισόδων-εξόδων. Συζητούνται οι επιπτώσεις αυτών των αποτελεσμάτων για μελλοντικές εργασίες ταξινόμησης μουσικής που δίνουν έμφαση στη διαφάνεια του μοντέλου.

A Study of Kolmogorov-Arnold Networks for Reliable Multi-label Classification of Musical Instruments

ABSTRACT

This paper presents a study on the application of Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) in combination with CNN14 for multi-label classification of musical instruments in polyphonic recordings. We explore the potential of CNN14-KANLinear as an alternative to traditional CNN14-MLP classifiers. Through extensive experiments using Mel-spectrograms of polyphonic recordings, we evaluate the performance of CNN14-KAN compared to CNN14-MLP in terms of accuracy and interpretability. While the MLP outperforms KAN in classification accuracy, KAN offers advantages in model interpretability, providing a more transparent mapping between inputs and outputs due to its B-spline-based function approximation. This paper discusses the implications of these findings for future multi-label music classification tasks that prioritize model transparency and interpretability.

Εισαγωγή

Η πολυετικετική ταξινόμηση [1], [2], [3] έχει αναδειχθεί σε μια κρίσιμη πρόκληση στον τομέα της μηχανικής μάθησης, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε σύνθετες ακουστικές εργασίες όπως η ταξινόμηση πολυφωνικής μουσικής. Σε αντίθεση με την ταξινόμηση μίας ετικέτας, όπου κάθε δείγμα συσχετίζεται μόνο με μία ετικέτα, η πολυετικετική ταξινόμηση περιλαμβάνει την πρόβλεψη πολλών ετικετών για κάθε είσοδο. Αυτό εισάγει ένα μεγαλύτερο επίπεδο πολυπλοκότητας λόγω της επικάλυψης ηχητικών πηγών και των περίπλοκων σχέσεων μεταξύ των ηχοχρωμάτων.

Σε αυτή τη μελέτη, διερευνούμε τον συνδυασμό των Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων (CNNs) και των Δικτύων Kolmogorov-Arnold (KANs) [4] για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Τα CNNs χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργασίες ταξινόμησης ήχου λόγω της ικανότητάς τους να εξάγουν ιεραρχικά χαρακτηριστικά από φασματικές αναπαραστάσεις ηχητικών σημάτων. Τα KANs, αντιθέτως, προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση στη μοντελοποίηση και παρέχουν ερμηνεύσιμες λύσεις σε σύνθετα προβλήματα ταξινόμησης. Ωστόσο, οι δυνατότητές τους για πολυετικετική ταξινόμηση σε πολυφωνικές ηχογραφήσεις παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητες.

Η προσέγγισή μας βασίζεται στην αρχιτεκτονική CNN14 [5], ένα γνωστό μοντέλο CNN που έχει σχεδιαστεί για εργασίες που βασίζονται σε ήχο και το επεκτείνει με δύο διαφορετικές μεθόδους ταξινόμησης: έναν παραδοσιακό ταξινομητή Πολυεπίπεδου Perceptron (MLP) και τον ταξινομητή KANLinear [6]. Ο στόχος είναι να αξιολογηθεί εάν η ερμηνευσιμότητα του KANLinear μπορεί να αντισταθμίσει την πιθανή απώλεια ακρίβειας σε σύγκριση με την πιο καθιερωμένη προσέγγιση MLP.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην υπάρχουσα βιβλιογραφία παρέχοντας μια διεξοδική σύγκριση μεταξύ CNN14-MLP and CNN14-KAN σε μια εργασία πολυετικετικής ταξινόμησης που περιλαμβάνει πολυφωνικές ηχογραφήσεις μουσικών οργάνων. Εστιάζουμε σε μετρήσεις ορθότητας (accuracy), ακρίβειας (precision), ανάκλησης (recall) και αρμονικού μέσου όρου ακρίβειας και ανάκλησης (F1-score) για να τονίσουμε τους συμβιβασμούς μεταξύ αυτών των μοντέλων σε εφαρμογές του πραγματικού κόσμου.

1. Σχετική έρευνα

Η ταξινόμηση πολυφωνικής μουσικής παραμένει μια απαιτητική εργασία λόγω της πολυπλοκότητας του χειρισμού αλληλεπικαλυπτόμενων ηχητικών πηγών. Ενώ τα Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNNs) έχουν επιτύχει σημαντική επιτυχία σε εργασίες ταξινόμησης μίας ετικέτας, η πολυετικετική ταξινόμηση απαιτεί μοντέλα που μπορούν να καταγράψουν τις περίπλοκες σχέσεις μεταξύ πολλαπλών ταυτόχρονων ηχητικών πηγών. Το CNN14 είναι ένα τέτοιο μοντέλο που έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό στην ταξινόμηση ηχητικών συμβάντων μεγάλης κλίμακας, ιδιαίτερα μέσω της ικανότητάς του να εξάγει ιεραρχικά χαρακτηριστικά από φασματογραφήματα [7], [8].

Ωστόσο, τα MLPs τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται ως ταξινομητές σε αυτές τις αρχιτεκτονικές CNN, στερούνται ερμηνευσιμότητας και απαιτούν μεγάλο αριθμό παραμέτρων για να επιτύχουν υψηλή ακρίβεια. Εδώ είναι που τα KANs προσφέρουν

ένα μοναδικό πλεονέκτημα. Προερχόμενα από το θεώρημα αναπαράστασης Kolmogorov-Arnold, τα KANs παρέχουν ένα πλαίσιο για την προσέγγιση πολυμεταβλητών συναρτήσεων χρησιμοποιώντας μια σειρά μονοδιάστατων συνεχών συναρτήσεων, καθιστώντας τα πιο ερμηνεύσιμα από τα παραδοσιακά MLPs [4].

Τα KANs έχουν βρει εφαρμογή σε ποικίλους τομείς, όπως η ταξινόμηση εικόνων και οι εργασίες παλινδρόμησης. Ωστόσο, η αξιοποίησή τους στην πολυετικετική ταξινόμηση, ειδικά σε ακουστικές εργασίες, παραμένει υπό μελέτη. Πρόσφατες εξελίξεις επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας των KANs, ιδιαίτερα για δεδομένα υψηλής διάστασης, όπως τα ηχητικά φασματογραφήματα. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση των παραδοσιακών B-splines με συναρτήσεις βασισμένες σε ReLU έχει βελτιώσει την ταχύτητα εκπαίδευσης και την ακρίβεια, διατηρώντας την ερμηνευσιμότητα των KANs [9]. Επιπλέον, ένας σημαντικός τομέας έρευνας αφορά την ενσωμάτωση των KANs με CNNs σε υβριδικές αρχιτεκτονικές. Ο Liu [4] έδειξε ότι ο συνδυασμός εξαγωγής χαρακτηριστικών από CNNs με τις συναρτήσεις των KANs μπορεί να αποδώσει θετικά αποτελέσματα σε χρονοσειρές και δεδομένα εικόνων, κάτι που συνάδει με τις προκλήσεις της ταξινόμησης πολυφωνικής μουσικής. Παρόλο που ορισμένες μελέτες προτείνουν ότι η προσέγγιση με splines των KANs μειώνει τον αριθμό των εκπαιδευσιμων παραμέτρων και αυξάνει την αποδοτικότητα χωρίς να μειώνεται η ερμηνευσιμότητα, τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι το KANLinear έχει περισσότερες παραμέτρους και παρόμοιες υπολογιστικές απαιτήσεις με τους παραδοσιακούς MLP ταξινομητές.

Παρά τα πλεονεκτήματα, παραμένουν προκλήσεις. Η ευαισθησία των KANs στον θόρυβο περιορίζει την απόδοσή τους σε εφαρμογές με ατελή δεδομένα. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, ιδιαίτερα σε ακουστικές εργασίες με θόρυβο υποβάθρου ή παραμορφωμένες ηχογραφήσεις. Επιπλέον, ενώ προσφέρουν υψηλή ερμηνευσιμότητα, η απόδοση των KANs σε σύνθετες πολυετικετικές ταξινομήσεις, όπως η αναγνώριση πολυφωνικών οργάνων, δεν έχει ακόμη επικυρωθεί σε ευρεία κλίμακα.

Συνοψίζοντας, ενώ το CNN14 παραμένει ένας ισχυρός υποψήφιος για την ταξινόμηση πολυφωνικής μουσικής, η ενσωμάτωση του KAN για ταξινόμηση προσφέρει τη δυνατότητα εξισορρόπησης της ακρίβειας με την ερμηνευσιμότητα. Καθώς ο τομέας της έρευνας των KAN συνεχίζει να εξελίσσεται, ιδιαίτερα με βελτιώσεις στην υπολογιστική αποδοτικότητα και τις υβριδικές αρχιτεκτονικές, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εξερεύνηση της εφαρμοσιμότητας των KAN σε πολυετικετικές ακουστικές εργασίες.

2. Δεδομένα εκπαίδευσης

Το σύνολο δεδομένων για την ταξινόμηση πολυφωνικής μουσικής δημιουργήθηκε μετατρέποντας ακατέργαστες ηχογραφήσεις σόλο οργάνων σε ένα πολυετικετικό σύνολο. Η διαδικασία περιλάμβανε τη συλλογή, τμηματοποίηση, συνδυασμό πολλαπλών οργάνων και επαύξηση δεδομένων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα μετατράπηκαν σε Mel-φασματογραφήματα, κατάλληλα για χρήση σε μοντέλα βαθιάς μάθησης.

Οι σόλο ηχογραφήσεις προέρχονταν από τέσσερα μουσικά όργανα: ηλεκτρική κιθάρα, ντραμς, πιάνο και βιολί. Το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων περιλάμβανε

περίπου 700 δείγματα για κάθε όργανο (ηλ. κιθάρα, ντραμς, βιολί) και 528 δείγματα για το πιάνο. Καθεμία από αυτές τις ηχογραφήσεις τμηματοποιήθηκε σε αποσπάσματα 3 δευτερολέπτων, αποκλείοντας τυχόν σιωπηλά τμήματα βάσει κατωφλίου RMS, ώστε να διατηρηθούν μόνο τα ενεργά μέρη των ηχογραφήσεων. Η τμηματοποίηση έγινε με τη χρήση της βιβλιοθήκης Librosa [11], εξασφαλίζοντας συνεπή ποιότητα επεξεργασίας και σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας 22.050 Hz.

Για την προσομοίωση πολυοργανικών ηχογραφήσεων, τα σόλο αποσπάσματα συνδυάστηκαν συστηματικά σε 11 διαφορετικούς συνδυασμούς κλάσεων, οι οποίοι κυμαίνονταν από ζεύγη οργάνων έως πλήρη κουαρτέτα (π.χ. ντραμς-κιθάρα-πιάνο-βιολί). Για κάθε συνδυασμό δημιουργήθηκαν 1.200 μοναδικά μικτά δείγματα, εξασφαλίζοντας ακουστική ισορροπία και ρεαλιστική αναπαράσταση των ταυτόχρονων ηχογραφήσεων.

Για να αυξηθεί η ευρωστία του συνόλου και να βελτιωθεί η γενίκευση του μοντέλου, εφαρμόστηκε επαύξηση των δεδομένων με τη δημιουργία 300 επιπλέον δειγμάτων ανά συνδυασμό κλάσης. Η επαύξηση περιλάμβανε παραλλαγές όπως μετατοπίσεις τόνου, χρονική διάταξη και θόρυβο υποβάθρου, μιμούμενη φυσικές παραλλαγές σε πραγματικές ηχογραφήσεις. Το τελικό σύνολο περιλάμβανε συνολικά 16.500 δείγματα.

Μετά τη δημιουργία των μικτών και επαυξημένων ηχητικών δειγμάτων, κάθε απόσπασμα διάρκειας 3 δευτερολέπτων μετατράπηκε σε Mel-spectrogram, το οποίο αποτελεί χρονική-συχνотική αναπαράσταση κατάλληλη για εφαρμογές μηχανικής μάθησης [12]. Η μετατροπή έγινε με τη χρήση FFT με παράθυρο 2.048 και βήμα 512. Τα φάσματα ισχύος μετατράπηκαν σε ντεσιμπέλ (dB) και κανονικοποιήθηκαν σε ένα εύρος από -100 dB έως 0 dB. Τα τελικά Mel-spectrograms προσαρμόστηκαν σε μέγεθος 256x256 pixels και αποθηκεύτηκαν ως εικόνες png, διατηρώντας τη λεπτομέρεια των συχνотήτων και εξασφαλίζοντας τη συμβατότητα με τα μοντέλα CNN.

3. Μεθοδολογία

Η αρχιτεκτονική CNN14 χρησιμοποιήθηκε ως ο βασικός μηχανισμός εξαγωγής χαρακτηριστικών για τα μοντέλα. Το CNN14 αποτελείται από έξι συνελκτικά μπλοκ, με κάθε μπλοκ να περιλαμβάνει πολλαπλά συνελκτικά επίπεδα (conv layers), ομαλοποίηση παρτίδας (batch normalization), συνάρτηση ενεργοποίησης ReLU και μέγιστη συγκέντρωση (max-pooling) [5]. Αυτά τα μπλοκ εξάγουν προοδευτικά χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου από τα Mel-spectrograms, όπως αρμονικές δομές και ρυθμικά μοτίβα. Στο τέλος, ένα επίπεδο καθολικής συγκέντρωσης (global pooling) συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά σε μια σταθερή αναπαράσταση, ανεξάρτητη από τις διαστάσεις του Mel-spectrogram. Αυτή η αναπαράσταση εισάγεται στον ταξινομητή, που μπορεί να είναι είτε MLP είτε KANLinear. Ο ταξινομητής KANLinear [6] βασίζεται στο θεώρημα Kolmogorov-Arnold, σύμφωνα με το οποίο κάθε πολυμεταβλητή συνεχής συνάρτηση μπορεί να αναπαρασταθεί ως πεπερασμένο άθροισμα μονομεταβλητών συναρτήσεων και πρόσθεσης. Ο KANLinear χρησιμοποιεί B-splines για να προσεγγίσει τη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών εισόδου και των εξόδων, εισάγοντας δύο κύριες υπερπαραμέτρους: τον αριθμό των B-splines και το μέγεθος του πλέγματος. Αυτές οι υπερπαραμέτροι καθορίζουν την ευελιξία του μοντέλου στην προσέγγιση των

δεδομένων. Η τμηματική προσέγγιση των splines επιτρέπει την ανάλυση κάθε τμήματος του χώρου χαρακτηριστικών εισόδου ξεχωριστά, διευκολύνοντας την κατανόηση του πώς οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά εισόδου επηρεάζουν την έξοδο. Αυτή η ερμηνευσιμότητα καθιστά το KANLinear πιο διαφανές σε σχέση με τα MLP, στα οποία η πολυπλοκότητα των βαρών καθιστά δύσκολη την ερμηνεία των επιδράσεων των εισόδων.

Για λόγους σύγκρισης, υλοποιήθηκε και ένας τυπικός ταξινομητής MLP με ένα κρυφό επίπεδο. Το MLP χαρτογραφεί τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά από το CNN14 στον πολυετικετικό χώρο εξόδου μέσω μη γραμμικών μετασχηματισμών, επιτρέποντας την αποτελεσματική σύλληψη σύνθετων σχέσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών και των ετικετών [13], [14]. Αν και τα MLP είναι ευέλικτα και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ταξινομητικά καθήκοντα, στερούνται της ερμηνευσιμότητας που προσφέρει ο KANLinear.

Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν με τον βελτιστοποιητή Adam [15] με αρχικό ρυθμό εκμάθησης $1e-4$. Ένας χρονοπρογραμματιστής ρυθμού εκμάθησης μειώνει σταδιακά τον ρυθμό εκμάθησης μετά από προκαθορισμένο αριθμό κύκλων, επιτρέποντας αποδοτικότερη σύγκλιση. Επίσης, εφαρμόστηκε η τεχνική του πρόωρου τερματισμού (early stopping) [16], με περίοδο αναμονής 10 εποχών, ώστε να αποτραπεί η υπερπροσαρμογή των μοντέλων.

4. Αποτελέσματα και Ανάλυση

Η αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων CNN14-MLP και CNN14-KAN πραγματοποιήθηκε μέσω καθιερωμένων μετρικών για πολυετικετική ταξινόμηση, όπως η ορθότητα (accuracy), η ακρίβεια (precision), η επανάκληση (recall) και ο αρμονικός μέσος ακρίβειας και επανάκλησης (macro-averaged F1-score). Η ακρίβεια υποδηλώνει το ποσοστό των σωστών προβλέψεων σε σχέση με το σύνολο των προβλέψεων, ενώ η επανάκληση καταδεικνύει το ποσοστό των σωστών προβλέψεων σε σχέση με το σύνολο των πραγματικών περιπτώσεων κάθε κλάσης.

Το μοντέλο CNN14-MLP σημείωσε ορθότητα 0.88 και macro-averaged F1-score 0.87 σε όλους τους συνδυασμούς οργάνων, επιτυγχάνοντας σταθερά υψηλά επίπεδα ακρίβειας και επανάκλησης. Για απλούστερους συνδυασμούς οργάνων, όπως ηλεκτρική κιθάρα και βιολί (gv) ή κιθάρα και πιάνο (gp), το MLP κατέγραψε F1-score 0.95, αντανakλώντας τη σημαντική του απόδοση σε λιγότερο πολύπλοκα ηχητικά σενάρια. Παρά ταύτα, σε πιο σύνθετους συνδυασμούς, όπως πιάνο, κιθάρα, βιολί και ντραμς (dgrn), το μοντέλο εμφάνισε ελαφρώς χαμηλότερο F1-score 0.77, αποκαλύπτοντας τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει στην αποσαφήνιση επικαλυπτόμενων αρμονικών στοιχείων.

Αντίστοιχα, το CNN14-KAN πέτυχε ορθότητα 0.85 και F1-score 0.84. Ανταγωνίστηκε επάξια το MLP στους απλούστερους συνδυασμούς, επιτυγχάνοντας F1-score 0.91 στον συνδυασμό gp και 0.94 στον συνδυασμό pv. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση του μειώθηκε σε πολυπλοκότερα ηχητικά σενάρια, όπως ο συνδυασμός dgrn, όπου το F1-score έπεσε στο 0.71, υποδεικνύοντας τη δυσκολία του KANLinear στην αντιμετώπιση πολυσύνθετων ηχητικών επικαλύψεων και σχέσεων μεταξύ πολλαπλών οργάνων.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα για τα Μοντέλα CNN14-KAN και CNN14-MLP

Class	CNN14-KAN			CNN14-MLP		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
dg (Drums + Guitar)	0,82	0,98	0,89	0,89	0,96	0,93
dpv (Drums + Piano + Violin)	0,77	0,82	0,79	0,79	0,87	0,83
pv (Piano + Violin)	0,87	0,97	0,92	0,88	0,94	0,91
gpv (Guitar + Piano + Violin)	0,95	0,74	0,83	0,95	0,76	0,84
dgpv (Drums + Guitar + Piano + Violin)	0,96	0,56	0,71	0,89	0,69	0,77
gv (Guitar + Violin)	0,91	0,99	0,94	0,92	0,98	0,95
dgv (Drums + Guitar + Violin)	0,88	0,75	0,81	0,91	0,82	0,86
dgp (Drums + Guitar + Piano)	0,93	0,65	0,76	0,86	0,77	0,81
gp (Guitar + Piano)	0,91	0,97	0,94	0,94	0,96	0,95
dv (Drums + Violin)	0,72	0,99	0,84	0,85	0,97	0,91
dp (Drums + Piano)	0,79	0,93	0,86	0,81	0,93	0,87
Total Accuracy	0,85			0,88		
Macro Avg F1	0,84			0,87		

5. Συζήτηση

Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταξύ των μοντέλων CNN14-MLP και CNN14-KAN για την πολυετικετική ταξινόμηση πολυφωνικής μουσικής. Το CNN14-MLP αποδίδει καλύτερα στο avg F1 score, ιδιαίτερα σε σύνθετους συνδυασμούς, ενώ το CNN14-KAN προσφέρει βελτιωμένη ερμηνευσιμότητα μέσω του KANLinear.

Παρά τις θεωρητικές προσδοκίες ότι τα μοντέλα KAN είναι ελαφρύτερα [4], το CNN14-KAN είχε μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων (151.2 εκατομμύρια) από το CNN14-MLP (83.9 εκατομμύρια). Αυτό οφείλεται στον αριθμό των splines και το μέγεθος του πλέγματος, που αυξάνουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Επίσης, η πολυπλοκότητα της πολυφωνικής μουσικής φαίνεται να απαιτεί περισσότερες παραμέτρους, σε αντίθεση με απλούστερες εφαρμογές που δοκιμάστηκαν στις αρχικές μελέτες KAN, όπως η επίλυση εξισώσεων μερικών παραγώγων.

Όσον αφορά την υπολογιστική πολυπλοκότητα, και τα δύο μοντέλα έχουν παρόμοιες απαιτήσεις (1.32 τρισεκατομμύρια πράξεις), αλλά το CNN14-KAN προσφέρει ένα πλεονέκτημα στην ερμηνευσιμότητα. Η χρήση των splines στο KANLinear επιτρέπει την ανάλυση της επιρροής των χαρακτηριστικών εισόδου στην έξοδο, κάτι που δεν έχει πλήρως αξιοποιηθεί ακόμα από εμάς αλλά θα εξεταστεί σε μελλοντική εργασία.

Το CNN14-MLP παραμένει η καλύτερη επιλογή για υψηλά F1-scores, αλλά το CNN14-KAN είναι προτιμητέο σε εφαρμογές όπου η ερμηνευσιμότητα και η διαφάνεια είναι κρίσιμες. Τα προβλέψιμα μοτίβα σφαλμάτων του KAN δείχνουν ότι οι λανθασμένες ταξινομήσεις ακολουθούν κατανοητές τάσεις, προσφέροντας πληροφορίες για την αντίληψη του μοντέλου.

6. Συμπέρασμα

Σε αυτή την εργασία, εξετάσαμε τη χρήση των Δικτύων Kolmogorov-Arnold (KAN) ως εναλλακτική λύση στους παραδοσιακούς ταξινομητές MLP μέσα στην αρχιτεκτονική CNN14 για πολυετικετική ταξινόμηση πολυφωνικών ηχογραφήσεων μουσικής. Τα ευρήματά μας δείχνουν ότι ενώ το CNN14-MLP υπερέρχει σταθερά σε όρους avg F1-score (0.87 έναντι 0.84), το μοντέλο CNN14-KAN προσφέρει μια πιο ερμηνεύσιμη προσέγγιση λόγω της χρήσης του KANLinear.

Το μοντέλο CNN14-MLP παραμένει η καλύτερη επιλογή για σύνθετες πολυφωνικές ηχογραφήσεις, καθιστώντας το προτιμώμενο σε εφαρμογές όπου είναι κρίσιμη η υψηλή ακρίβεια και ανάκληση. Από την άλλη πλευρά, το CNN14-KAN προσφέρει ένα πλεονέκτημα στην ερμηνεία των ταξινομητικών αποτελεσμάτων, καθώς επιτρέπει καλύτερη κατανόηση του πώς τα χαρακτηριστικά εισόδου, όπως τα Mel-φασματογραφήματα, επηρεάζουν τις προβλέψεις.

Η μελλοντική εργασία θα επικεντρωθεί στη βελτίωση των επιπέδων KANLinear για την περαιτέρω ενίσχυση των μετρικών ταξινόμησης, ιδιαίτερα για πιο σύνθετους πολυφωνικούς συνδυασμούς. Επιπλέον, θα εξεταστούν μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση των υπερπαραμέτρων στο KANLinear (hyperparameter tuning), ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία μεταξύ ερμηνευσιμότητας και υπολογιστικού κόστους.

7. Αναφορές

- [1] M.-L. Zhang and Z.-H. Zhou, “A Review on Multi-Label Learning Algorithms,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 26, no. 8, pp. 1819–1837, Aug. 2014, doi: 10.1109/TKDE.2013.39.
- [2] N. Ndou, R. Ajoodha, and A. Jadhav, “Music Genre Classification: A Review of Deep-Learning and Traditional Machine-Learning Approaches,” in *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Apr. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422487.
- [3] H. Phan, T. N. T. Nguyen, P. Koch, and A. Mertins, “Polyphonic Audio Event Detection: Multi-Label or Multi-Class Multi-Task Classification Problem?,” in *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2022, pp. 8877–8881.
- [4] Z. Liu et al., “KAN: Kolmogorov-Arnold Networks,” May 02, 2024, arXiv: arXiv:2404.19756. doi: 10.48550/arXiv.2404.19756.
- [5] Q. Kong, Y. Cao, T. Iqbal, Y. Wang, W. Wang, and M. D. Plumbley, “PANNs: Large-Scale Pretrained Audio Neural Networks for Audio Pattern

Recognition,” Aug. 23, 2020, arXiv: arXiv:1912.10211. doi: 10.48550/arXiv.1912.10211.

[6] B. Azam and N. Akhtar, “Suitability of KANs for Computer Vision: A preliminary investigation,” Jun. 13, 2024, arXiv: arXiv:2406.09087. Available: <http://arxiv.org/abs/2406.09087>

[7] C. Eutizi and F. Benedetto, “On the Performance Improvements of Deep Learning Methods for Audio Event Detection and Classification,” in 2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Jul. 2021, pp. 141–145. doi: 10.1109/TSP52935.2021.9522625.

[8] Y. M. G. Costa, L. S. Oliveira, and C. N. Silla, “An evaluation of Convolutional Neural Networks for music classification using spectrograms,” Applied Soft Computing, vol. 52, pp. 28–38, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2016.12.024.

[9] Q. Qiu, T. Zhu, H. Gong, L. Chen, and H. Ning, “ReLU-KAN: New Kolmogorov-Arnold Networks that Only Need Matrix Addition, Dot Multiplication, and ReLU,” Aug. 12, 2024, arXiv: arXiv:2406.02075. doi

[10] H. Shen, C. Zeng, J. Wang, and Q. Wang, “Reduced Effectiveness of Kolmogorov-Arnold Networks on Functions with Noise,” Jul. 20, 2024, arXiv: arXiv:2407.14882. doi: 10.48550/arXiv.2407.14882.

[11] B. McFee et al., “librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python,” presented at the Python in Science Conference, Austin, Texas, 2015, pp. 18–24. doi: 10.25080/Majora-7b98e3ed-003.

[12] Y. M. G. Costa, L. S. Oliveira, A. L. Koerich, and F. Gouyon, “Music genre recognition using spectrograms,” in 2011 18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, Jun. 2011, pp. 1–4. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5977391?arnumber=5977391>

[13] T. Windeatt, “Ensemble MLP Classifier Design,” in Computational Intelligence Paradigms: Innovative Applications, L. C. Jain, M. Sato-Ilic, M. Virvou, G. A. Tsihrantzis, V. E. Balas, and C. Abeynayake, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 133–147. doi: 10.1007/978-3-540-79474-5_6.

[14] R. R and T. R S, “Speech Emotion Recognition using Multilayer Perceptron Classifier on Ravdess Dataset,” in Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization, ICCAP 2021, December 7-8 2021, Chennai, India, Chennai, India: EAI, 2021. doi: 10.4108/eai.7-12-2021.2314726.

[15] D. P. Kingma and J. Ba, “Adam: A Method for Stochastic Optimization,” arXiv:1412.6980 [cs], Jan. 2017. Available: <http://arxiv.org/abs/1412.6980>

[16] Y. Bai et al., “Understanding and Improving Early Stopping for Learning with Noisy Labels,” in Advances in Neural Information Processing Systems, Curran Associates, Inc., 2021, pp. 24392–24403. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2021/hash/cc7e2b878868cbae992d1fb743995d8f-Abstract.html

[17] M. Grandini, E. Bagli, and G. Visani, “Metrics for Multi-Class Classification: an Overview,” arXiv:2008.05756 [cs, stat], Aug. 2020. Available: <http://arxiv.org/abs/2008.05756>



Exploring Non-Autoregressive Transformers for Efficient Adaptive Music Composition

Αλέξης Σπηλιωτόπουλος^{1,*}, Σπύρος Πολυχρονόπουλος², Ιωάννης Παναγάκης¹

¹Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

²Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

*alexis.spiliot@gmail.com

ABSTRACT

In this study, we investigate the application of a non-autoregressive Transformer encoder-based model, MusicBERT, for symbolic music generation, focusing on generating musical continuations based on given contexts. We performed a modified fine-tuning of a pre-trained MusicBERT model using different token unmasking techniques, including Sequential Unmasking, Random Sampling, Parallel Unmasking, and Causally Biased Iterative Decoding. We assessed each method for coherence, diversity, and computational efficiency. Preliminary results showed that Causally Biased Iterative Decoding performed best. The methods showed low GPU VRAM utilization and rapid execution speeds, making such models promising for real-time music composition.

Εξερεύνηση μη αυτοπαλινδρομικών Μετασχηματιστών για αποτελεσματική προσαρμοστική σύνθεση μουσικής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη μελέτη, διερευνούμε την εφαρμογή ενός μοντέλου που βασίζεται σε Μετασχηματιστή με κωδικοποιητή, το MusicBERT, για συμβολική παραγωγή μουσικής, εστιάζοντας στη δημιουργία μουσικών συνεχειών με βάση δεδομένο περιεχόμενο. Κάναμε μια τροποποιημένη προσαρμογή ενός προεκπαιδευμένου MusicBERT, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές συμπλήρωσης μάσκας, όπως Διαδοχική, Τυχαία και Ταυτόχρονη Συμπλήρωση Μάσκας και Επαναληπτική Αποκωδικοποίηση με αιτιώδη μεροληψία, και αξιολογήθηκαν ως προς τη συνοχή, την ποικιλομορφία και την υπολογιστική απόδοση. Πρώιμα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επαναληπτική αποκωδικοποίηση με αιτιώδη μεροληψία είχε καλύτερη απόδοση. Οι μέθοδοι είχαν χαμηλή χρήση VRAM και γρήγορες ταχύτητες εκτέλεσης, καθιστώντας αυτά τα μοντέλα υποσχόμενα για σύνθεση μουσικής σε πραγματικό χρόνο.

Introduction

The adoption of artificial intelligence (AI) in music composition is revolutionizing the process of music creation, providing innovative tools for generating new musical ideas and improving arranging and mixing. Since the mid-20th century, and increasingly with recent advances in deep learning, and the availability of large amounts of data, AI has enabled automatic music composition by leveraging large datasets. However, real-time music generation with low latency remains a major challenge, particularly for applications like live performances and dynamic soundtracks in video games or virtual reality (VR). Maintaining coherence and expressiveness in AI-generated music is also important for preserving the emotional impact and artistic quality expected by audiences.

Automated music composition has advanced since the early rule-based systems, such as the Illiac Suite [10], and the probabilistic models like Markov chains. Neural networks, particularly Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) [11], were transformative, enabling better handling of longer-term dependencies in music data. Recently, more complex architectures, including Generative Adversarial Networks (GANs) [9] and Transformer models [8], have further transformed the field, with GANs using competing networks for realistic outputs and Transformers surpassing RNNs in capturing long-range dependencies [1][7]. These advancements, supported by greater computational power and access to large, high-quality datasets, allow researchers in AI music to explore more complex models, leading to deeper insights into music generation and improved coherence and expressiveness in the results. However, these systems, particularly Transformer-based ones, require large datasets and significant computational resources for training, and the challenge of fast music generation still remains.

In this paper, we explore the use of non-autoregressive models for music generation, specifically using MusicBERT [2], a Transformer encoder-based architecture. We fine-tuned a pre-trained instance of the MusicBERT model in order to adapt it for generating musical continuations. Given some input musical context, we modified the standard Masked Language Modeling (MLM) task of predicting sequences of tokens for generating musical continuations. Our approach aims to leverage the model's understanding of musical patterns and test various sampling techniques to enhance output quality. This study explores whether non-autoregressive methods can address the limitations of autoregressive models, such as slow generation speeds, while maintaining coherence and creativity, although the results remain preliminary.

1. Related Work

Transformer models have improved symbolic music generation by effectively capturing long-range dependencies and managing the complicated structure of musical compositions. Early approaches, such as the Music Transformer [7], incorporated self-attention mechanisms to produce coherent melodies with longer-term structure. Building on this foundation, models such as Compound Word Transformer [1] improved control over multi-track compositions by integrating hypergraph structures to more effectively represent the relationships between

different musical elements. Additional advancements, like PopMAG [17] and Pop Music Transformer [14], focus on multi-track representations and beat-based modeling for improving the expressiveness and structure of generated music. However, these transformer-based approaches primarily concentrate on autoregressive methods, where each token is generated in a sequential manner. This leads to longer inference times, especially for large compositions, and limits their ability to handle specific infilling tasks or precise musical constraints.

More recently, non-autoregressive approaches have gained traction, particularly in the domain of audio generation. Models like SoundStorm [13] and MAGNET [15] employ parallel decoding strategies to efficiently generate high-quality audio. However, these methods are primarily designed for continuous audio representations, such as speech and sound synthesis, rather than symbolic music. While non-autoregressive models offer faster generation, they often struggle with producing long, coherent sequences and maintaining fidelity in complex musical compositions, as observed in methods like VAMPNet [16] and StemGen [6]. Additionally, these approaches require training models from scratch, which can be computationally expensive and harder to scale, especially for masked symbolic music modeling tasks.

2. Methodology

In this section, we outline our approach for generating musical continuations using MusicBERT, a pre-trained transformer model developed for symbolic music understanding. We modified the fine-tuning process to adapt the model specifically for generating continuation sequences given some musical context. We construct pairs of data consisting of a context, which represents the musical input context, and a continuation, which, as the name suggests, represents the continuation that comes after the context. Our fine-tuning procedure extends the standard MLM task by iteratively predicting tokens within a continuation. By experimenting with various unmasking techniques, we aim to evaluate their effects on the model's ability to maintain coherence, diversity, and computational efficiency during the generation process.

2.1 Model Selection

For our experiments, we used MusicBERT, a transformer encoder-based model pre-trained on symbolic music data. It follows the RoBERTa [4] architecture, using attention mechanisms to capture both local and global patterns in the data. MusicBERT has been pre-trained on large symbolic music datasets, enabling learning a rich representation of musical structures such as harmony, rhythm, and instrumentation. Its ability to handle long-range dependencies in sequential data makes it an ideal choice for tasks involving symbolic music generation and analysis. We pre-trained the model on the Masked Language Modeling (MLM) task [12], masking certain tokens in a sequence and teaching it to predict the missing tokens based on the surrounding context. This makes MusicBERT particularly useful for

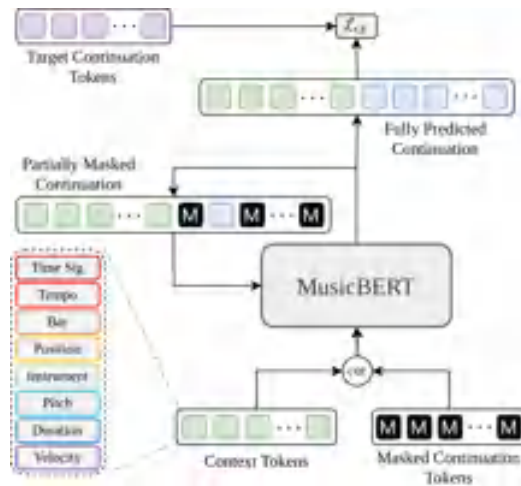


Figure 2.1 A flowchart illustrating the fine-tuning method, where the model receives a concatenated context and masked continuation. The masked tokens are iteratively unmasked and then evaluated against the target continuation using cross-entropy loss. Parallel Unmasking generates the final continuation in one pass. The OctupleMIDI encoding elements are displayed in the lower left.

generating symbolic music continuations, as it can model complex musical dependencies across time.

2.2 Fine-tuning Process

To adapt MusicBERT for generating musical continuations, we fine-tuned the model using a modification of the standard MLM technique, as shown in Figure 2.1. In this process, the model receives two sequences as input: a *context* sequence that contains unmasked tokens representing the initial musical input, and a masked *continuation* sequence that the model must predict. The context is combined with the masked continuation, and the model progressively unmask the continuation by predicting a subset of masked tokens in each iteration, which are then incorporated back into the sequence. This iterative process is continued until all the masked tokens are predicted. We experimented with several unmasking techniques (described in Section 2.2) to evaluate their impact on the quality and coherence of the generated music. For each technique, a different model variant was produced.

2.3 Dataset and Music Token Representation

For our fine-tuning musical corpus, we chose the POP909 [3] dataset, a collection of 909 pop songs transcribed to MIDI format. We performed an 80-20 train-test split on the dataset, with 80% of it used for fine-tuning and the remaining 20% for testing. For each song, multiple context-continuation pairs of varying lengths were constructed, ensuring that the model could potentially learn to generate continuations given a variety of musical prompts. To encode the symbolic musical

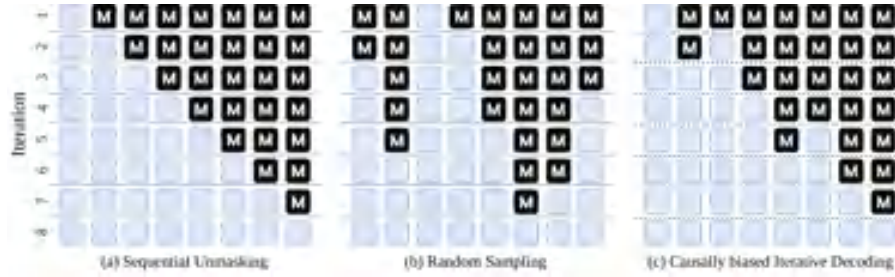


Figure 3.1 The three iterative unmasking methods for an initially masked continuation sequence of 8 tokens (context sequence is not shown).

data, we used the OctupleMIDI [2] encoding, shown in Figure 2.1, which represents each MIDI note as a tuple of eight elements: *bar*, *position*, *instrument*, *pitch*, *duration*, *velocity*, *time signature*, and *tempo*. This method aligns with MusicBERT’s pre-training data encoding, allowing the model to better utilize its knowledge more effectively.

3. Experiments

3.1 Experimental Setup

The experiments were conducted using a single NVIDIA RTX 4060 GPU with 8GB of VRAM. For each method, we fine-tuned MusicBERT for 50 epochs. We set the batch size to 64 and optimized the model using the Adam [5] optimizer with $\beta_1=0.9$, $\beta_2=0.98$, and $\epsilon=1e-6$. Additionally, we applied L2 weight decay of 0.1 to prevent overfitting. The learning rate was linearly warmed up over the first 50,000 steps to a peak value of $5e-5$, followed by a polynomial decay schedule throughout the training process. A dropout rate of 0.1 was applied across all layers.

3.2 Sampling Techniques

During fine-tuning and evaluation, we experimented with four different sampling techniques—three iterative and one non-iterative—to predict the masked tokens in the continuation sequence by sampling from the model’s output logits. A brief visualization of the three iterative methods is shown in Figure 3.1.

In *Sequential Unmasking*, tokens are predicted in a left-to-right manner. In each iteration, the model predicts the leftmost masked token in the continuation part of the input, which is then updated with the newly predicted token. This process continues until all tokens in the continuation have been unmasked, while the context remains unchanged throughout the iterations. In *Random Sampling*, tokens are unmasked at random. The continuation is updated with these new tokens, and this process is repeated until all masked tokens have been predicted. *Parallel Unmasking* predicts the entire continuation sequence in one pass, without any iterative steps. This method follows the same MLM procedure used when MusicBERT was pre-trained. Lastly, we used a method similar to the *Causally Biased Iterative Decoding* method, inspired by the StemGen [6], in which tokens

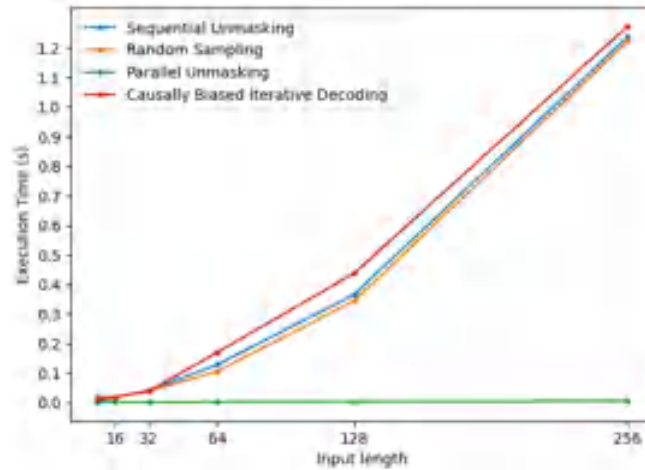


Figure 4.1: Prediction times for different input lengths across each unmasking method. The numbers shown on the x-axis represent the total number of notes in the concatenated context-continuation pairs, while the actual input length is 8 times larger due to the OctupleMIDI format.

earlier in the continuation sequence are prioritized for unmasking, creating a causal structure in which earlier predictions influence subsequent ones. A ranking function combines the model's confidence, a bias toward earlier tokens, and random noise to potentially balance maintaining structure and having diversity in the generated sequence.

For all methods, predictions were made by sampling from the top-k ($k=5$) probabilities from the model's output distribution. This top-k sampling limits the selection of the next token to the k most likely candidates, promoting diversity while reducing the risk of repetitive predictions.

4. Preliminary Results

We evaluated each sampling technique using random context-continuation pairs from the test set. As shown in Figure 4.1, parallel unmasking maintains near-constant execution time, while the other methods scale linearly with input length. All techniques offer sub-second performance for inputs smaller than 200 tokens, making them ideal for continuous real-time generation. Even with larger inputs, times up to 1.3s remain within a practical range for real-time applications. Also, inference required only around 2GB of GPU memory, making these methods accessible on consumer-grade GPUs.

However, all the methods showed significant flaws in the musical quality of the generated continuations, most likely due to insufficient training. More specifically, the most challenging sub-tokens to predict in the OctupleMIDI encoding were the bar and position sub-tokens, which frequently lead the model to bad note placement behavior, with notes either densely clustered or too sparse across bars. This tendency of the model to place notes far apart was observed across all techniques, resulting in

large pauses in the music. Additionally, in the *Sequential Unmasking* method, the pitch sub-token was overly repetitive, reducing the output's diversity and expressiveness. On the contrary, *Random Sampling* led to excessive prediction variability, illustrating that relying too heavily on random selection degrades music quality. The *Causally Biased Iterative Decoding* method, however, demonstrated a better balance between structure and diversity. Although its performance was initially poor during fine-tuning, it eventually achieved a more balanced output, though still not entirely sufficient. Adjusting the factors in the ranking function revealed a clear influence on the quality of the generated music, as expected. At last, the *Parallel Unmasking* method showed the worst results, which we attribute to the lack of iterative refinement.

In general, qualitative evaluations showed that the generated music maintained the key of the input prompt, indicating that the methods captured some structural aspects of the music. As training progressed, the differences between sampling methods became more pronounced, with each method exhibiting distinct characteristics in terms of coherence and variability.

5. Conclusion

In this study, we investigated the use of a non-autoregressive Transformer-based model, MusicBERT, for symbolic music generation. Through fine-tuning the pre-trained MusicBERT, we tested various sampling techniques to assess their impact on generating musical continuations. While we achieved notable efficiency in terms of low GPU VRAM usage and fast execution times, the generated sequences revealed notable issues in musical quality, such as incorrect note placement, large pauses, and variability in structure. The Causally Biased Iterative Decoding method showed the most promise in balancing structure and diversity, though further improvement is needed. Future work will focus on addressing these challenges through extended training and evaluation. While the results are preliminary, our approach demonstrates potential for efficient real-time music generation in resource-constrained environments.

6. References

- [1] Hsiao, W.-Y., Liu, J.-Y., Yeh, Y.-C. and Yang, Y.-H. "Compound Word Transformer: Learning to Compose Full-Song Music over Dynamic Directed Hypergraphs", *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, **35(1)**, pp 178-186 (2021)
- [2] Zeng, M., Tan, X., Wang, R., Ju, Z., Qin, T., & Liu, T. "MusicBERT: Symbolic Music Understanding with Large-Scale Pre-Training" in Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL-IJCNLP, pages 791-800 (2021).
- [3] Z. Wang, K. Chen, J. Jiang, Y. Zhang, M. Xu, S. Dai, G. Bin, and G. Xia, "POP909: A Pop-song Dataset for Music Arrangement Generation," in *ISMIR* (2020)
- [4] Liu, Y., Ott, M., & Goyal, N. Jingfei Du, Mandar Joshi, Danqi Chen, Omer Levy, Mike Lewis, Luke Zettlemoyer, and Veselin Stoyanov "Roberta: A robustly

- optimized bert pretraining approach” *arXiv preprint arXiv:1907.11692*, 1(3.1), 3-3 (2019).
- [5] Kingma, Diederik P. "Adam: A method for stochastic optimization." *arXiv preprint arXiv:1412.6980* (2014).
- [6] Parker, J., Spijkervet, J., Kosta, K., Yesiler, F., Kuznetsov, B., Wang, J., Avent, M., Chen, J., & Le, D. "STEMGEN: A Music Generation Model That Listens." *ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp 1116-1120. (2023).
- [7] Huang, C.A., Vaswani, A., Uszkoreit, J., Shazeer, N.M., Simon, I., Hawthorne, C., Dai, A.M., Hoffman, M.D., Dinculescu, M., & Eck, D. "Music Transformer: Generating Music with Long-Term Structure." *International Conference on Learning Representations* (2018).
- [8] Vaswani, A., Shazeer, N.M., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. "Attention is All you Need". *Neural Information Processing Systems* (2017).
- [9] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. "Generative adversarial nets" *Advances in neural information processing systems*, 27 (2014).
- [10] L. Hiller, L. Isaacson. *"Experimental Music: Composition with an Electronic Computer"* McGraw-Hill, New York (1959).
- [11] S. Hochreiter and J. Schmidhuber "Long Short-Term Memory" *Neural Comput.* **9**(8), pp 1735–1780 (1997)
- [12] Devlin, J., Chang, M., Lee, K., & Toutanova, K. "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding" *North American Chapter of the Association for Computational Linguistics* (2019).
- [13] Borsos, Z., Sharifi, M., Vincent, D., Kharitonov, E., Zeghidour, N., & Tagliasacchi, M. "SoundStorm: Efficient Parallel Audio Generation". *ArXiv*, abs/2305.09636 (2023)
- [14] Huang, Y., & Yang, Y. "Pop Music Transformer: Generating Music with Rhythm and Harmony". *ArXiv*, abs/2002.00212 (2020).
- [15] Ziv, A., Gat, I., Lan, G.L., Remez, T., Kreuk, F., D'efosse, A., Copet, J., Synnaeve, G., & Adi, Y. "Masked Audio Generation using a Single Non-Autoregressive Transformer" *ArXiv*, abs/2401.04577 (2024).
- [16] Garcia, H.F., Seetharaman, P., Kumar, R., & Pardo, B. "VampNet: Music Generation via Masked Acoustic Token Modeling" *ArXiv*, abs/2307.04686 (2023).
- [17] Ren, Y., He, J., Tan, X., Qin, T., Zhao, Z., & Liu, T. "PopMAG: Pop Music Accompaniment Generation" *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia* (2020).



Εφαρμογές αλγορίθμων γενετικής τεχνητής νοημοσύνης για την παραγωγή ηχητικού περιεχομένου στα νέα μέσα και την επικοινωνία

Αλέξανδρος Εμβολιάδης^{1*}, Πάρις Ξυλογιάννης¹, Νικόλαος Βρύζας¹, Λάζαρος
Βρύσης¹, Χαράλαμπος Δημούλας¹

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

*alemvoliadis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάλυση μεθόδων για την παραγωγή πολυμεσικών δεδομένων με ιδιαίτερη έμφαση στην επεξεργασία και παραγωγή ηχητικών σημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία παρουσιάζει σύγχρονες τεχνικές βασισμένες σε αρχιτεκτονικές Βαθέων Νευρωνικών Δικτύων (BNΔ) που στοχεύουν στην παραγωγή δεδομένων ήχου σε διάφορους τομείς (παραγωγή μουσικής, ομιλίας, περιβαλλοντικών ήχων και άλλα). Η εργασία ξεκινά με μια σύντομη ιστορική αναδρομή σε τεχνικές προσομοιώσεις καθώς και αναφορά σε σύγχρονες προσεγγίσεις. Συνεχίζει με την παρουσίαση νευραλγικών αρχιτεκτονικών BNΔ, ικανές να παράξουν πληθώρα τύπων δεδομένων. Τέλος, η εργασία αναλύει μερικά σενάρια εφαρμογής για την παραγωγή ηχητικού περιεχομένου και παρουσιάζει τα συμπεράσματα.

Generative Artificial Intelligence applications for audio content production in new media and communication

ABSTRACT

This work aims to analyze methods for generating multimedia data, with a particular emphasis on the processing and production of audio signals. Specifically, the paper presents modern techniques based on Deep Neural Network (DNN) architectures that focus on generating audio data across various domains (such as music production, speech, environmental sounds, and more). The work begins with a brief historical overview of simulation techniques and references to contemporary approaches. It continues by presenting neural DNN architectures capable of producing a wide variety of data types. Finally, the paper analyzes several application scenarios for audio content generation and presents the conclusions.

1. Εισαγωγή

Οι εξελίξεις στη γενετική τεχνητή νοημοσύνη (Generative AI) έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον από ακαδημαϊκούς, επιχειρηματίες και το ευρύ κοινό, κυρίως λόγω της ανάπτυξης ισχυρών μοντέλων (Foundational Models) με πρακτική εφαρμογή και διάθεση σε ευρεία χρήση. Παρότι αρχικά προσανατολισμένα στη μετατροπή κειμένου σε κείμενο, οι πολυτροπικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηχητικού περιεχομένου, αναπτύσσονται ραγδαία.

1.1 Τεχνικές Προσομοίωσης και τεχνητή νοημοσύνη

Από τα μέσα του 20ού αιώνα, οι τεχνικές προσομοίωσης εξελίχθηκαν σημαντικά, με τη μέθοδο Monte Carlo [1] να επιλύει ντετερμινιστικά προβλήματα με πιθανοτικές διεργασίες. Παρά τις επιτυχίες της, η μέθοδος έχει περιορισμούς, όπως το υψηλό υπολογιστικό κόστος και την εξάρτηση από γεννήτριες τυχαίων αριθμών.

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις ενσωματώνουν Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (BNΔ), τα οποία, μέσω πολλαπλών επιπέδων, αναλύουν και συνθέτουν δεδομένα υψηλής πολυπλοκότητας. Σημαντικές αρχιτεκτονικές είναι τα Variational Autoencoders (VAEs) [2], τα Generative Adversarial Networks (GANs) [3], και τα Diffusion Models [4], με καθένα να προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις στην παραγωγή συνθετικών δεδομένων.

1.3 Αρχιτεκτονικές BNΔ για γέννηση δεδομένων

Συγκεκριμένα, οι VAEs είναι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στην κωδικοποίηση της εισόδου. Εισάγουν ένα πλήθος κατανομών λανθάνοντος χώρου και το μοντέλο εκπαιδεύεται στην ακριβή ανάκτηση της εισόδου, ενώ οι κατανομές προσεγγίζουν Γκαουσιανές κατανομές. Εφόσον εξαχθούν οι παράμετροι των κανονικών κατανομών είναι δυνατό να προσομοιωθεί ένα δείγμα του συνόλου εκπαίδευσης, λαμβάνοντας τυχαία δείγματα από τον λανθάνοντα χώρο. Τα GANs αποτελούνται από 2 αρχιτεκτονικές BNΔ: την Γεννήτρια (Generator) και τον Επικριτή (Critic/Discriminator). Οι 2 αυτές αρχιτεκτονικές εκπαιδεύονται ταυτόχρονα, με την Γεννήτρια να λαμβάνει σαν είσοδο θόρυβο και να προσομοιώνει το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, και τον Επικριτή να διακρίνει μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δειγμάτων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, η Γεννήτρια είναι δυνατό να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια δείγματα του συνόλου εκπαίδευσης.

Ωστόσο, οι 2 παραπάνω αρχιτεκτονικές έχουν κι αυτές τους περιορισμούς τους. Οι VAEs είναι γνωστοί για την στάθμιση μεταξύ ποιότητας των συνθετικών δεδομένων και της ποικιλομορφίας τους [5], ενώ συχνά παράγουν θαμπά δείγματα. Όσον αφορά τα GANs, η Γεννήτρια είναι πιθανό να μάθει να παράγει συγκεκριμένα δείγματα από το σύνολο εκπαίδευσης (mode collapse) [5]. Τέλος, η εκπαίδευση των GANs χαρακτηρίζεται από μεγάλη αστάθεια λόγω της ανταγωνιστικής εκπαίδευσης [6].

Αυτούς τους περιορισμούς καλούνται να επιλύσουν τα μοντέλα Diffusion. Οι συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές, λαμβάνουν σαν είσοδο δείγματα του συνόλου εκπαίδευσης και εισάγουν σταδιακά θόρυβο. Το τελικό δείγμα αποτελείται επί το

πλείστον από θόρυβο, και η αρχιτεκτονική εκπαιδεύεται στην πρόβλεψη του θορύβου σε κάθε στάδιο. Αυτή η διαδικασία αποθορυβοποίησης δίνει στα μοντέλα Diffusion ένα σημαντικό προβάδισμα στην σύνθεση ευκρινών και αναλυτικών δειγμάτων σε σύγκριση με τους VAEs και τα GANs. Ωστόσο, η συνεχής εισαγωγή θορύβου και σταδιακή αποθορυβοποίηση οδηγούν σε χρονοβόρα εκπαίδευση των συγκεκριμένων μοντέλων [5].

2. Εφαρμογές στην παραγωγή ηχητικού περιεχομένου

Η παρούσα ενότητα αναλύει σχολαστικά μερικές εφαρμογές της γενετικής τεχνητής νοημοσύνης για την παραγωγή ηχητικών δεδομένων. Αρκετές από τις περιπτώσεις χρησιμοποιούν πολυτροπικά δεδομένα σαν είσοδο για την σύνθεση ηχητικού περιεχομένου, κάτι που θα αναδειχθεί εντός της ενότητας.

2.1 Παραγωγή ομιλίας

Ένα από τα πρώτα προβλήματα που καταπιάστηκε η επιστημονική κοινότητα όσον αφορά την εφαρμογή της γενετικής τεχνητής νοημοσύνης, με πληθώρα υλοποιήσεων αλλά και εμπορικών προϊόντων, είναι η παραγωγή ομιλίας. Προσεγγίσεις τέτοιου τύπου δέχονται σαν είσοδο κείμενο ή/και φωνή για την παραγωγή λόγου βασισμένου στη φωνή και το κείμενο. Συνήθως, αυτές αποτελούνται από διαφορετικά στάδια. Αρχικά, το κείμενο και η φωνή τμηματοποιούνται και κάθε τμήμα επεξεργάζεται ξεχωριστά. Έπειτα, το σύστημα μετατρέπει το κείμενο σε φωνητικά στοιχεία, ενώ υπόκεινται σε φασματική ανάλυση. Τέλος, ο Vocoder είναι υπεύθυνος για την σύνθεση των τελικών ακουστικών κυμάτων. Σύγχρονες προσεγγίσεις υιοθετούν τη συγκεκριμένη διοχέτευση και εκμεταλλεύονται αρχιτεκτονικές που περιγράφονται στην ενότητα. Για παράδειγμα, η [7] εξελίσει τους VAEs διακριτοποιώντας τον λανθάνων χώρο (Vector Quantization). Εφαρμόζουν τη μέθοδο τους σε εικόνες και ομιλία. Συγκεκριμένα για την ομιλία, παρουσιάζουν πως το σύστημα μπορεί να παράξει τυχαία ομιλία και να πραγματοποιήσει μεταφορά ομιλητή, λαμβάνοντας σαν είσοδο αποκλειστικά ομιλία. Η [8] εκμεταλλεύεται ένα Diffusion μοντέλο για την παραγωγή κυματομορφής από κείμενο. Οι ενδιαμέσες φασματικές αναπαραστάσεις δίνονται σαν είσοδος στο Diffusion μοντέλο, που μαθαίνει, σύμφωνα με ένα δοσμένο κείμενο την αντήχηση των λέξεων.

Τέλος, άξια αναφοράς είναι η [9] όπου δέχεται σαν είσοδο κείμενο και δείγματα από κάποιον ομιλητή και παράγει ομιλία βάσει του δοσμένου κειμένου και ομιλητή. Χρησιμοποιώντας GANs, το κείμενο και τα δείγματα ομιλίας κωδικοποιούνται ξεχωριστά και συσχετίζονται για την παραγωγή ενός φασματογραφήματος, που μετατρέπεται σε κυματομορφή.

2.2 Παραγωγή Περιβαλλοντικών Ήχων

Η παραγωγή περιβαλλοντικών ήχων βρίσκει ευρεία πεδία εφαρμογής. Η σύνθεση δειγμάτων υψηλής ποιότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές επαυξημένης/εικονικής πραγματικότητας (AR/VR). Μέθοδοι που στοχεύουν στην γέννηση συνθετικών δειγμάτων βασίζονται σε γενικότερες μεθόδους γέννησης ήχου. Πάνω σε αυτήν την ιδέα βασίστηκαν οι [10]. Εκμεταλλεύονται έναν Autoencoder και ένα γλωσσικό μοντέλο (Language Model). Αφού εκπαιδευτεί το μοντέλο στο να

κάνει ακριβή ανάκτηση του αρχικού δείγματος, ήταν δυνατό να εκπαιδευτεί μια αυτοπαλίνδρομη διαδικασία ώστε να γεννά δείγματα του λανθάνοντος χώρου. Τέλος, εκπαιδεύοντας έναν κωδικοποιητή κειμένου, ήταν δυνατή η ανάπτυξη ενός μοντέλου που λαμβάνει κείμενο σαν είσοδο και παράγει ήχο. Κατά την ίδια κατεύθυνση κινείται και η [11], όπου η είσοδος στο σύστημα είναι ένα βίντεο. Το σύστημα αποτελείται από τρία στάδια. Αρχικά, κάθε καρέ του βίντεο κωδικοποιείται ξεχωριστά. Τα παραγόμενα διανύσματα συνδυάζονται σε ένα ίδιου μήκους με την ηχητική κυματομορφή. Το υπερ-διάνυσμα κωδικοποιείται περαιτέρω και συνδυάζεται με την κωδικοποιημένη του έκδοση, όπου χρησιμοποιείται σαν είσοδος σε μία παραλλαγή ενός GAN.

Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την σύνθεση δειγμάτων ηχητικών τοπίων λαμβάνει υπόψιν πολυτροπικά δεδομένα. Το σύστημα λαμβάνει σαν είσοδο βίντεο και ήχο. Κάθε τροπικότητα επεξεργάζεται ξεχωριστά. Εξάγονται λεζάντες για κάθε τροπικότητα ξεχωριστά. Οι λεζάντες χρησιμοποιούνται για να εκπαιδεύσουν ένα Μεγάλο Γλωσσικό Μοντέλο (Large Language Model) για να συσχετίσει και να συνδυάσει τις λεζάντες σε μία υπερ-λεζάντα. Κάθε υπερ-λεζάντα χρησιμοποιείται σαν είσοδος σε ένα προεκπαιδευμένο σύστημα [12] για την συσχέτιση ήχου και υπερ-λεζάντας. Λαμβάνοντας το διάνυσμα από το κείμενο, ένα μοντέλο Diffusion είναι υπεύθυνο να προσομοιώνει το αντίστοιχο ηχητικό διάνυσμα. Αυτή χρησιμοποιείται για την προσομοίωση Φασματογραφημάτων ως είσοδοι σε ένα GAN που παράγει κυματομορφές.

2.3 Προσομοίωση Ακουστικής Χώρων

Η μέτρηση των ακουστικών χαρακτηριστικών ενός χώρου συχνά πραγματοποιείται με την καταγραφή της κρουστικής του απόκρισης (IR). Η προσομοίωση αυτών των χαρακτηριστικών αναβαθμίζει την εμπειρία του χρήστη σε εφαρμογές VR αλλά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ακουστικών φίλτρων.

Σύγχρονες μέθοδοι βασίζονται σε GANs και ανταγωνιστική εκπαίδευση. Για παράδειγμα η [13] χρησιμοποιεί ακουστικές παραμέτρους του χώρου, όπως ο χρόνος αντήχησης (Reverberation time, T_{60}), ο λόγος απευθείας και αντηχητικού σήματος (Direct-to-Reverberant Ratio), ο πρώιμος χρόνος εξασθένησης (Early Decay Time) και ο λόγος της πρώιμης προς την καθυστερημένη ηχητική ενέργεια (Early-to-Late Index) που εξάγονται απευθείας από τις κρουστικές αποκρίσεις των χώρων (RIRs). Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται ως συνθήκη για την προσομοίωση κρουστικών αποκρίσεων.

Με την ανάδυση των πολυτροπικών μοντέλων εμφανίζονται και αντίστοιχες μέθοδοι για την προσομοίωση κρουστικών αποκρίσεων χώρων. Για παράδειγμα, η [14] λαμβάνει σαν είσοδο τις θέσεις ομιλητή και ακροατή, καθώς και την τρισδιάστατη αναπαράσταση του δωματίου σε μορφή πλέγματος (mesh). Αφού το πλέγμα απλοποιηθεί και κωδικοποιηθεί, συνδυάζεται με τις θέσεις ομιλητή/ακροατή και δίνεται σαν είσοδος σε μια γεννήτρια ενός GAN. Επιπλέον εισάγουν ως συνάρτηση αντικειμενικής απώλειας τη διαφορά μεταξύ του Διαγράμματος Αποσύνθεσης Ενέργειας (Energy Decay Relief) πραγματικής και συνθετικής κρουστικής απόκρισης.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η [15]. Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει σαν είσοδο μια φωτογραφία του δωματίου. Εξάγει το βάθος της εικόνας χρησιμοποιώντας ένα προ-εκπαιδευμένο μοντέλο [16]. Στη συνέχεια, η φωτογραφία

με το εκτιμώμενο βάθος συνδυάζονται και λειτουργούν ως είσοδος σε ένα προ-εκπαιδευμένο μοντέλο υπολογιστικής όρασης. Το διάνυσμα που προκύπτει, συνδυάζεται με θόρυβο και εισάγεται σε ένα GAN. Η μέθοδος παράγει κρουστικές αποκρίσεις υψηλής ποιότητας, ενώ είναι απλή στη χρήση από το ευρύ κοινό.

2.4 Παραγωγή Μουσικής

Η παραγωγή μουσικής είναι ένας ταχέως εξελισσόμενος τομέας της τεχνητής νοημοσύνης που αποσκοπεί στη δημιουργία, μετατροπή ή επεξεργασία της μουσικής με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Περιλαμβάνει μια ποικιλία εργασιών, καθεμία από τις οποίες ανταποκρίνεται σε διαφορετικές δημιουργικές ανάγκες.

Μια από τις πρώτες μεθόδους που ήταν επιτυχής στην παραγωγή μουσικής υψηλής ποιότητας, με ρυθμό δειγματοληψίας 48 kHz και χαμηλή καθυστέρηση, παρουσιάζεται στο [17]. Το συγκεκριμένο μοντέλο λειτουργεί με μία προσέγγιση δύο σταδίων: αρχικά ένα μοντέλο VAE εκπαιδεύεται ώστε να παράγει ποιοτικές αναπαραστάσεις των ηχητικών εισόδων, ενώ στην συνέχεια αξιοποιώντας ένα μοντέλο Επικριτή εκπαιδεύεται με ανταγωνιστική βελτιστοποίηση (adversarial fine-tuning) για τη περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου ήχου. Κατ' αυτόν τον τρόπο καταφέρνει να μεταφέρει τον ήχο από ένα όργανο σε ένα άλλο ή να αλλάζει το ύφος της μουσικής.

Η μέθοδος [18] αποτελεί μία από τις πιο σύγχρονες προσεγγίσεις για την παραγωγή συνθετικής μουσικής. Σε αντίθεση με προηγούμενες μεθόδους πολλαπλών σταδίων, χρησιμοποιεί ένα γλωσσικό μοντέλο ενός μοναδικού σταδίου για την παραγωγή μουσικής υψηλής ποιότητας από κείμενα και μελωδίες. Το μοντέλο βασίζεται στον Υπολειμματικό Διανυσματικό Κβαντισμό (Residual Vector Quantization) της μεθόδου [19], επιτυγχάνοντας την παραγωγή μουσικών ηχητικών ροών σε υψηλή ανάλυση 32kHz.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετές εμπορικές λύσεις, με την Suno AI [20] να αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον παράδειγμα. Η εφαρμογή επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν ολοκληρωμένα μουσικά κομμάτια, παρέχοντας μια συνεκτική περιγραφή για το παραγόμενο τραγούδι.

3. Εφαρμογές στα νέα μέσα και την επικοινωνία

Η διερεύνηση που παρουσιάστηκε σε σχέση με τις τελευταίες δυνατότητες στην παραγωγή ηχητικού περιεχομένου με χρήση μοντέλο γενετικής TN, μπορεί να αξιοποιηθεί στη γενικότερη προσπάθεια επέκτασης της εργαλειοθήκης των δημοσιογράφων και των παραγωγών περιεχομένου.

Η παραγωγή ομιλίας μπορεί να αξιοποιηθεί για την αποτελεσματικότερη δημιουργία εκφωνήσεων (voiceover) σε οπτικοακουστικό περιεχόμενο. Αυτό δεν είναι μόνο μία διέξοδος για την ενίσχυση των παραδοσιακών γραμμών εργασιών, αλλά μπορεί να διευκολύνει το άνοιγμα σε νέες μορφές περιεχομένου που είναι πιο προσιτές στις νεότερες γενιές και υποστηρίζονται από σύγχρονα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Παράλληλα μπορεί να αξιοποιηθεί σε συνδυασμό με συστήματα αυτόματης μετάφρασης για να διασφαλίσει την προσβασιμότητα της κοινότητας σε μορφές περιεχομένου όπου ως τώρα υπήρχαν γλωσσικοί περιορισμοί. Διασφαλίζεται επίσης έτσι η προσβασιμότητα σε πολυγλωσσικό περιεχόμενο σε άτομα με προβλήματα όρασης. Τα εργαλεία επεξεργασίας ήχου βάσει κειμένου (text-based

audio editing) αποτελούν μία πολύ ενδιαφέρουσα πτυχή που μπορεί να αλλάξει εντυπωσιακά τις υπάρχουσες ροές εργασιών. Η παραγωγή μουσικής μπορεί να λειτουργήσει επίσης ως καταλύτης σε νέες δημιουργικές πρακτικές για την υποστήριξη του παραγόμενου περιεχομένου, και τη δημιουργία εκπαιδευτικού και άλλου υλικού. Η παραγωγή περιβαλλοντικών ήχων και η προσομοίωση χώρων αποτελούν τεχνικές που αναμένεται να έχουν μεγάλη εφαρμογή στις διαδικασίες ηχητικού σχεδιασμού, αλλά και σε νέες μορφές περιεχομένου όπως η δημοσιογραφία εμβύθισης και οι εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (xR) και εικονικής συν-τοποθέτησης (co-location), όπου οι συνδιαλεγόμενοι τοποθετούνται σε κοινό εικονικό χώρο.

Στην παρούσα φάση του πεδίου, είναι πολύ σημαντική η αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων των παραπάνω τεχνικών μέσω πειραμάτων ακρόασης. Παράλληλα με τις νέες δυνατότητες, εγείρονται προβληματισμοί σχετικά με ηθικές και νομικές πτυχές του ζητήματος. Σχετικά ανοιχτά ζητήματα αφορούν την πνευματική ιδιοκτησία του παραγόμενου περιεχομένου. Επιπλέον, η ακεραιότητα του περιεχομένου που έχει παραχθεί με μοντέλα GTN και η ενημέρωση του κοινού για τον τρόπο παραγωγής του περιεχομένου. Τέλος, σημαντικά είναι τα εργασιακά ζητήματα, που αφορούν την κατάργηση θέσεων εργασίας, αλλά και τους προβληματισμούς και δυσπιστία των εργαζομένων σε σχέση με την απόκτηση δεξιοτήτων και ψηφιακού γραμματισμού.

4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να παρουσιάσει εφαρμογές της γενετικής τεχνητής νοημοσύνης στην παραγωγή ηχητικών δεδομένων. Παρουσιάστηκαν διάφορες αρχιτεκτονικές BNA με τα προτερήματα και περιορισμούς τους αλλά και ο τρόπος με τον οποίο ενσωματώνονται σε συστήματα παραγωγής ομιλίας, περιβαλλοντικών ήχων, κρουστικές αποκρίσεις χώρων και μουσικής. Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται φανερό πως το πεδίο της γενετικής τεχνητής νοημοσύνης είναι ραγδαία εξελισσόμενο και παρουσιάζει πλήθος εφαρμογών. Η ανάδυση των ισχυρών μοντέλων δίνει τη δυνατότητα στην ανάπτυξη μεθοδολογιών χωρίς την απαίτηση εκπαίδευσης από την αρχή. Οι εξελίξεις στον κλάδο της επεξεργασίας πολυτροπικών δεδομένων επιδρούν θετικά στην γενετική τεχνητή νοημοσύνη, επιτρέποντας την ανάπτυξη εύρωστων μοντέλων. Τέλος, γίνεται φανερό πως η συνεισφορά όλων αυτών, οδηγεί σε σύνθετες αρχιτεκτονικές και μεθοδολογίες, που όμως είναι ικανές για την επίλυση πολλαπλών προβλημάτων ταυτόχρονα.

8. Αναφορές

- [1] Benov, D. M. (2016). The Manhattan Project, the first electronic computer and the Monte Carlo method. *Monte Carlo Methods and Applications*, 22(1), 73-79.
- [2] Kingma, D. P. (2013). Auto-encoding variational bayes. *arXiv preprint arXiv:1312.6114*.
- [3] Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2020). Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*, 63(11), 139-144.
- [4] Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*, 33, 6840-6851.

- [5] Vivekananthan, S. (2024). Comparative Analysis of Generative Models: Enhancing Image Synthesis with VAEs, GANs, and Stable Diffusion. *arXiv preprint arXiv:2408.08751*.
- [6] Ahmad, Z., Jaffri, Z. U. A., Chen, M., & Bao, S. (2024). Understanding GANs: fundamentals, variants, training challenges, applications, and open problems. *Multimedia Tools and Applications*, 1-77.
- [7] Van Den Oord, A., & Vinyals, O. (2017). Neural discrete representation learning. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [8] Popov, V., Vovk, I., Gogoryan, V., Sadekova, T., & Kudinov, M. (2021, July). Grad-tts: A diffusion probabilistic model for text-to-speech. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 8599-8608). PMLR.
- [9] Casanova, E., Weber, J., Shulby, C. D., Junior, A. C., Gölge, E., & Ponti, M. A. (2022, June). Yourtts: Towards zero-shot multi-speaker tts and zero-shot voice conversion for everyone. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 2709-2720). PMLR.
- [10] Kreuk, F., Synnaeve, G., Polyak, A., Singer, U., Défossez, A., Copet, J., ... & Adi, Y. (2022). Audiogen: Textually guided audio generation. *arXiv preprint arXiv:2209.15352*.
- [11] Liu, S., Li, S., & Cheng, H. (2021). Towards an end-to-end visual-to-raw-audio generation with GAN. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 32(3), 1299-1312.
- [12] Elizalde, B., Deshmukh, S., Al Ismail, M., & Wang, H. (2023, June). Clap learning audio concepts from natural language supervision. In *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1-5). IEEE.
- [13] Ratnarajah, A., Tang, Z., & Manocha, D. (2020). IR-GAN: Room impulse response generator for far-field speech recognition. *arXiv preprint arXiv:2010.13219*.
- [14] Ratnarajah, A., Tang, Z., Aralikatti, R., & Manocha, D. (2022, October). Mesh2ir: Neural acoustic impulse response generator for complex 3d scenes. In *Proceedings of the 30th ACM International Conference on Multimedia* (pp. 924-933).
- [15] Singh, N., Mentch, J., Ng, J., Beveridge, M., & Drori, I. (2021). Image2reverb: Cross-modal reverb impulse response synthesis. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (pp. 286-295).
- [16] Tosi, F., Aleotti, F., Poggi, M., & Mattoccia, S. (2019). Learning monocular depth estimation infusing traditional stereo knowledge. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 9799-9809).
- [17] Caillon, A., & Esling, P. (2021). RAVE: A variational autoencoder for fast and high-quality neural audio synthesis. *arXiv preprint arXiv:2111.05011*.
- [18] Copet, J., Kreuk, F., Gat, I., Remez, T., Kant, D., Synnaeve, G., ... & Défossez, A. (2024). Simple and controllable music generation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 36.
- [19] Défossez, A., Copet, J., Synnaeve, G., & Adi, Y. (2022). High fidelity neural audio compression. *arXiv preprint arXiv:2210.13438*.
- [20] <https://suno.com/>



Περιβάλλον ακουστικής προσομοίωσης χώρων για την αναζήτηση τοποθεσίας κινηματογράφησης

Νικόλαος Βρύζας^{1,*}, Λάζαρος Βρύσης¹, Μαρίνα Σταματιάδου¹, Χαράλαμπος Δημούλας¹, Γεώργιος Καλλίρης¹, Ιωάννης Μουρτζόπουλος²

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

² Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

*nvryzas@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιλογή χώρων αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας κινηματογράφησης προπαραγωγής. Το πρόγραμμα SCENE στοχεύει στην υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος που καλύπτει τις ανάγκες αυτής της διερεύνησης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται το εργαλείο Ακουστικής προσομοίωσης χώρων. Πρόκειται για ένα περιβάλλον όπου χρήστες μπορούν να παρέχουν καταγραφές χώρων που σχετίζονται με τοποθεσίες σχετικές με την πολιτιστική κληρονομιά, ακολουθώντας ένα πρότυπο οδηγιών. Οι καταγραφές χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ακουστικής απόκρισης του χώρου σε διάφορες θέσεις πηγής-ακροατή, το οποίο παρέχεται στους χρήστες μέσα από μια γραφική διεπαφή που παρέχει αναπαραγωγή σε πραγματικό χρόνο.

A room acoustic simulation tool for filming location scouting

ABSTRACT

Location scouting is an integral part of the pre-production filming process. The SCENE program aims to implement an integrated system that meets the needs of this investigation. In the current paper, the room acoustic simulation tool is presented. It is an environment where users can provide space records related to heritage sites, following a set of guidelines. The recordings are used to simulate the acoustic response of the room at various source-listener positions, which is provided to users through a graphical interface that provides real-time rendering and playback.

1. Εισαγωγή

Το έργο SCENE (Searchable multi-dimensional Data Lakes supporting Cognitive Film Production & Distribution for the Promotion of the European Cultural HeritagE) στοχεύει στην υλοποίηση μιας πλατφόρμας βασισμένης σε αρχιτεκτονική λιμνών δεδομένων για την αποτελεσματική συνεργασία και ανταλλαγή γνώσης των ενδιαφερομένων μερών της κινηματογραφικής παραγωγής. Σε αυτό το πλαίσιο, θα είναι προσβάσιμα για εξερεύνηση τρισδιάστατα μοντέλα τοποθεσιών που σχετίζονται με την ευρωπαϊκή πολιτιστική κληρονομιά, παρέχοντας επίσης μια προσομοίωση αλλαγής φωτισμού και ένα εργαλείο προσομοίωσης ακουστικής απόκρισης χώρων. Ο βασικός στόχος του εργαλείου προσομοίωσης ήχου είναι ότι να παρέχει σε παραγωγούς και οι σχεδιαστές ήχου πρόσβαση σε ένα εικονικό περιβάλλον όπου μπορούν να ακούσουν μία εκτίμηση του ηχητικού αποτελέσματος σε συγκεκριμένο χώρο χωρίς τη φυσική μετάβαση εκεί. Αυτή η λειτουργικότητα, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα εργαλεία που αναπτύσσονται στο έργο, διευκολύνει τη διαδικασία εντοπισμού και επιλογής τοποθεσίας κινηματογράφησης, προσφέροντας ταυτόχρονα μια πιο οικονομική και οικολογική εναλλακτική από την επιτόπια έρευνα.

Ιδιαίτερη συμβολή στην εξέλιξη του πεδίου της ακουστικής προσομοίωσης χώρων, αλλά και στην αξιοποίηση σχετικών προσομοιώσεων για την παροχή εμπειρίας χρήσης κατέχουν τα διαθέσιμα σύνολα δεδομένων. Η βάση ReverbDB [1] περιλαμβάνει ένα σύνολο πραγματικών Κρουστικών Αποκρίσεων Χώρου (KAX), που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση εύρωστων μοντέλων αυτόματης αναγνώρισης ομιλίας. Η βάση dEchorate [2] περιλαμβάνει πολυκαναλικές καταγραφές KAX σε ένα σύνολο δωματίων. Το σύνολο δεδομένων OpenAir [3] περιλαμβάνει αποκρίσεις χώρων που σχετίζονται με μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς και υποστηρίζει διαφορετικές τεχνικές καταγραφής, καθώς και οπτικοακουστικό υλικό. Η συμπερίληψη γεωμετρικής πληροφορίας του χώρου μπορεί να αποτελέσει μια επιπλέον σημαντική πληροφορία για την ακουστική προσομοίωση χώρων [4]. Μία επιπλέον επικρατής τεχνική για την καταγραφή της ακουστικής απόκρισης των χώρων αποτελούν οι αποκρίσεις με χρήση μικροφώνων ηχητικού πεδίου και συνιστωσών του προτύπου B-Format Ambisonics [3], [5], [6].

Για την αξιοποίηση σχετικών τεχνικών σε εφαρμογές που απευθύνονται σε μη εξειδικευμένους χρήστες, κομβική είναι η ύπαρξη εργαλείων και υπηρεσιών. Το Pyroomacoustics [7] είναι μια βιβλιοθήκη σε γλώσσα python για την προσομοίωση χώρων, όπως και το GruRIR [8], που παρέχει επιπλέον δυνατότητες παραλληλοποίησης των υπολογισμών μέσω κάρτας γραφικών για αποδοτικότερη αξιοποίηση υπολογιστικών πόρων. Δυνατότητες ενσωμάτωσης πληροφορίας ακουστικής χώρων παρέχουν επίσης τα σύγχρονα περιβάλλοντα δημιουργίας βιντεοπαιχνιδιών, με περισσότερες ή λιγότερες δυνατότητες παραμετροποίησης [9]. Η χρήση προγραμμάτων φυλλομετρητών είναι μία πολύ βολική επιλογή για την παροχή περιβαλλόντων ακουστικής προσομοίωσης σε τελικούς χρήστες μέσω διαδικτύου, χωρίς να απαιτεί πρότερη γνώση ή υποδομή από αυτούς [10].

2. Το πρόγραμμα SCENE

Όπως αναφέρθηκε, στόχος του ερευνητικού προγράμματος είναι η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών για την ενίσχυση των διαδικασιών κινηματογραφικής προπαραγωγής, παραγωγής και μεταπαραγωγής. Στο επίπεδο της προπαραγωγής, οι βασικές εργασίες που υποστηρίζονται είναι η αναζήτηση τοποθεσίας βάσει κριτηρίων και η τρισδιάστατη μοντελοποίηση χώρων.

2.1 Αναζήτηση τοποθεσίας

Κατά τη διαδικασία αναζήτησης τοποθεσίας υπάρχουν διάφορα δεδομένα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται. Αυτά αφορούν γεωγραφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά (π.χ. πόλη, θάλασσα, δάσος) που αναφέρονται στις σκηνές που πρέπει να γυριστούν. Άλλα κριτήρια μπορεί να είναι η προσβασιμότητα, το κόστος, η εγγύτητα σε άλλες επιθυμητές τοποθεσίες κλπ. Η πλατφόρμα του SCENE σκοπεύει να προσφέρει δυνατότητες ευφυούς αναζήτησης με χρήση φυσικής γλώσσας μέσω μεγάλων γλωσσικών μοντέλων για την αποτελεσματικότερη ανακάλυψη υποψήφιων τοποθεσιών.

2.1 Μοντελοποίηση χώρων

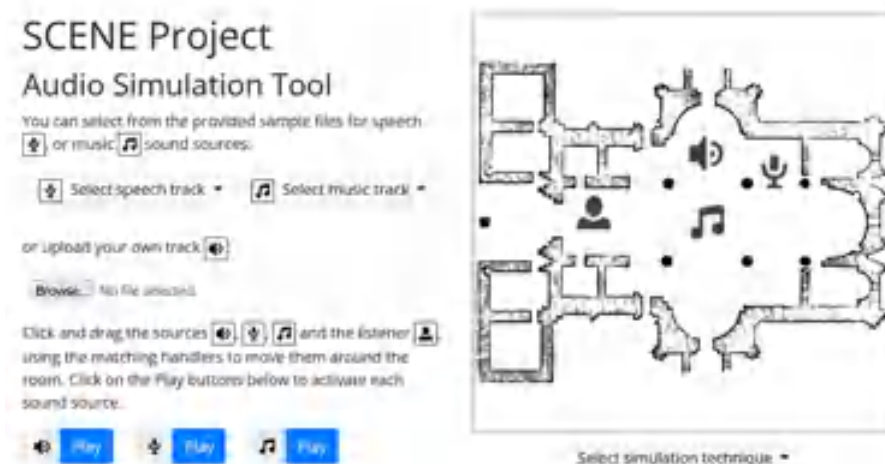
Η τυπική διαδικασία για την τελική επιλογή της τοποθεσίας κινηματογράφησης, όπως προκύπτει από την ανάλυση απαιτήσεων χρηστών που προηγήθηκε περιλαμβάνει μετάβαση στην τοποθεσία για αυτοψία και λήψη φωτογραφικού υλικού. Το SCENE αποσκοπεί στη δημιουργία μια βάσης (λίμνης) δεδομένων όπου να υπάρχουν τρισδιάστατες μοντελοποιήσεις χώρων με δυνατότητα πλοήγησης και παραμετροποίησης. Αυτό αρχικά αφορά τη διάθεση τρισδιάστατων οπτικών μοντέλων, όπου οι παραγωγοί μπορούν να έχουν μια πλήρη εποπτεία του χώρου και τον σχεδιασμό των σκηνών, καθώς και να προσαρμόσουν τις συνθήκες φωτισμού, χωρίς την απαίτηση για εξειδικευμένο εξοπλισμό, λογισμικό ή εκπαίδευση. Παράλληλα παρέχονται μοντέλα ακουστικής προσομοίωσης για την εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου και την αξιολόγηση της καταλληλότητάς του από αυτή τη σκοπιά.

3. Περιβάλλον ακουστικής προσομοίωσης χώρων

3.1 Γραφική διεπαφή και είδη χρηστών

Το πρώτο είδος χρήστη αφορά τη λειτουργικότητα της πλοήγησης στο υλικό της βάσης δεδομένων και της διάδρασης με αυτό [11]. Έχει σχεδιαστεί ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο βασίζεται στη βιβλιοθήκη JavaScript Google Resonance Audio [12]. Πρόκειται για μια βιβλιοθήκη που επιτρέπει την αναπαραγωγή αμφιωτικού ήχου σε πραγματικό χρόνο με βάση συγκεκριμένη παραμετροποίηση. Πιο ειδικά, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το είδος και τον αριθμό των ηχητικών πηγών (μουσική, ομιλία κλπ). Το περιβάλλον παρέχει κάποια προεπιλεγμένα αρχεία ήχου για δοκιμές,

αλλά δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να ανεβάσει τα δικά του αρχεία. Αυτό είναι βολικό ιδίως για την ακρόαση της προσομοίωσης της επίδρασης του χώρου σε πραγματικές ηχογραφήσεις ηθοποιών που έχουν πραγματοποιηθεί σε στούντιο. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη θέση των πηγών και του ακροατή στον χώρο. Για τη σχετική παραμετροποίηση αξιοποιείται κάτοψη του χώρου που προκύπτει από το τρισδιάστατο μοντέλο. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια από τις διαθέσιμες τεχνικές προσομοίωσης επιθυμεί.



Σχήμα 2.1 Στιγμιότυπο του εργαλείου ακουστικής προσομοίωσης χώρων

Το δεύτερο είδος χρήστη αφορά τη συνεισφορά περιεχομένου. Η συνεισφορά γίνεται μέσω ηχογραφήσεων σε καινούργιους χώρους, με βάση ένα σύνολο οδηγιών. Ανάλογα με την τεχνική προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί ακολουθείται μια διαφορετική διαδικασία, ενώ ο χρήστης δηλώνει την τεχνική που χρησιμοποίησε. Στόχος του έργου είναι η δυνατότητα συνεχούς επέκτασης με νέους διαθέσιμους χώρους. Για αυτό τον λόγο παρέχονται τα εργαλεία για την υλοποίηση προσομοιώσεων με διαφορετικές τεχνικές, δίνοντας στους χρήστες τη δυνατότητα συνεισφοράς ανάλογα με τον διαθέσιμο εξοπλισμό τους.

3.2 Τεχνικές ακουστικής προσομοίωσης χώρων

Η πρώτη επιλογή απαιτεί τη χρήση φορητής ψηφιακής συσκευής εγγραφής B-Format χαμηλού κόστους. Αυτό επιτρέπει την καταγραφή κρουστικών αποκρίσεων για κάθε συνιστώσα, X, Y, Z, W του προτύπου B-Format. Η επιλογή αυτή προτιμάται τόσο για το πλεόνασμα πληροφορίας που προσφέρει, και τη συμβατότητά της με περιβάλλοντα εμβύθισης, όσο και γιατί είναι σε σύμπτωση με δημοφιλή υπάρχοντα αποθετήρια, όπως το γνωστό σύνολο δεδομένων OpenAir [3]. Για την ακουστική διέγερση του χώρου χρησιμοποιούνται ημιτονοειδείς σαρώσεις ή και σκάσιμο μπαλονιού. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται σε μοντέλα βαθιάς

μάθησης. Ως είσοδος χρησιμοποιείται μια καταγραφή ομιλίας στον χώρο ενδιαφέροντος και μια καταγραφή ομιλίας σε συνθήκες στούντιο. Το μοντέλο στοχεύει στη μεταφορά ύφους (style transfer) από την ηχογράφιση του χώρου στην κατά προσέγγιση ανηχική ηχογράφιση. Αυτό μπορεί να γίνει είτε απευθείας (end-to-end) είτε μέσω ενός ενδιάμεσου σταδίου τυφλού υπολογισμού παραμέτρων αντήχησης και ενός σταδίου φιλτραρίσματος της ανηχικής ηχογράφησης βάσει αυτών των παραμέτρων.

4. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Στην εργασία παρουσιάστηκε το πλαίσιο λειτουργίας που υλοποιείται στο πλαίσιο του προγράμματος SCENE, και ειδικότερα το εργαλείο προσομοίωσης ακουστικής χώρων. Πρόκειται για μία γραφική διεπαφή που επιτρέπει στον τελικό χρήστη να πλοηγηθεί στη βάση δεδομένων της πλατφόρμας και να ακούσει την ακουστική απόκριση διαφορετικών χώρων παραμετροποιώντας το είδος, τον αριθμό και τις θέσεις των ηχητικών πηγών. Παράλληλα μπορεί να συμβάλλει στην επέκταση της βάσης παραχωρώντας καταγραφές νέων χώρων, ακολουθώντας ένα σύνολο βασικών οδηγιών.

Στις ερευνητικές κατευθύνσεις του έργου είναι η υλοποίηση και αξιολόγηση των τελικών μοντέλων ακουστικής προσομοίωσης και η ενσωμάτωσή τους στο περιβάλλον, καθώς και η εξέλιξη της γραφικής διεπαφής με στόχο την αναβάθμιση εμπειρίας χρήστη.

5. Ευχαριστίες



Η παρούσα έρευνα είναι μέρος του ερευνητικού έργου SCENE που έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα της ΕΕ Horizon Research and Innovation με αριθμό No 101095303.

6. Αναφορές

- [1] Szöke, I., Skácel, M., Mošner, L., Paliesek, J., & Černocký, J. “Building and evaluation of a real room impulse response dataset.” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 13(4), 863-876 (2019).
- [2] Carlo, D. D., Tandeitnik, P., Foy, C., Bertin, N., Deleforge, A., & Gannot, S. (2021). dEchorate: a calibrated room impulse response dataset for echo-aware signal processing. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2021, 1-15.
- [3] Murphy, D. T., & Shelley, S. (2010, November). Openair: An interactive auralization web resource and database. In Audio Engineering Society Convention 129. Audio Engineering Society.
- [4] Vryzas, N., Vrysis, L., Stamatiadou, M. E., Kotsakis, R., & Dimoulas, C. “The effect of geometry information in blind estimation of room acoustic parameters.” In Audio Engineering Society Convention 154. Audio Engineering Society (2023, May).

- [5] Vryzas, N., Stamatiadou, M. E., Vrysis, L., & Dimoulas, C. “Multichannel mobile audio recordings for spatial enhancements and ambisonics rendering.” In 2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA) (pp. 1-6). IEEE (2023, September).
- [6] Müller, K., & Zotter, F. “Auralization based on multi-perspective ambisonic room impulse responses.” *Acta Acustica*, 4(6), 25 (2020).
- [7] Scheibler, R., Bezzam, E., & Dokmanić, I. “Pyroomacoustics: A python package for audio room simulation and array processing algorithms.” In 2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (pp. 351-355). IEEE (2018, April).
- [8] Diaz-Guerra, D., Miguel, A., & Beltran, J. R. “gpuRIR: A python library for room impulse response simulation with GPU acceleration.” *Multimedia Tools and Applications*, 80(4), 5653-5671 (2021).
- [9] Kamaris, G., Giannatsis, E., Kaleris, K., & Mourjopoulos, J. “Suitability of game engines for virtual acoustic experiments.” In Audio Engineering Society Convention 146. Audio Engineering Society (2019, March).
- [10] McArthur, A., Van Tonder, C., Gaston-Bird, L., & Knight-Hill, A. “A survey of 3D audio through the browser: practitioner perspectives.” In 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA) (pp. 1-10). IEEE (2021, September).
- [11] Vryzas, N., Vrysis, L., Stamatiadou, M.-E., Dimoulas, C. & Kalliris, G. “An acoustic simulation interface for cultural heritage locations scouting” in Proceedings of the 156th Audio Engineering Society Convention (2024)
- [12] Gorzel, M., Allen, A., Kelly, I., Kammerl, J., Gungormusler, A., Yeh, H., & Boland, F. “Efficient encoding and decoding of binaural sound with resonance audio.” In Audio Engineering Society Conference: 2019 AES International Conference on Immersive and Interactive Audio. Audio Engineering Society (2019, March).



Κατασκευή Δεδομένων για την Εκπαίδευση και Αξιολόγηση Συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης στον Εντοπισμό Ηχητικών Συμβάντων

Κωνσταντίνος Θεόδωρος Τσάμης¹, Αιμίλιος Βασίλειος Καμπουρόπουλος², Μάξιμος
Καλιακάτσος Παπακώστας¹

¹Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Σχολή Μουσικής και
Οπτοακουστικών Τεχνολογιών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε.
Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο

²Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Σχολή Καλών Τεχνών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, Πανεπιστημιούπολη Θέρμης, 54124

tsamkonstheod@gmail.com

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα ανίχνευσης ηχητικών συμβάντων το οποίο εκπαιδεύεται με τη χρήση τεχνητού συνόλου δεδομένων που περιλαμβάνει μίξεις ήχων. Το μοντέλο βασίζεται στο Wav2Vec2, ένα προεκπαιδευμένο μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης για την αναγνώριση ομιλίας, και σε ένα LSTM δίκτυο για να προβλέψει την ταυτόχρονη επικάλυψη ηχητικών γεγονότων. Τα δεδομένα εκπαιδεύονται με ηχητικά κανάλια που περιλαμβάνουν έως πέντε ταυτόχρονους ήχους. Τα πρώτα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά, ωστόσο φαίνεται πως η ακρίβεια μειώνεται σε πολύπλοκες μίξεις με μεγαλύτερη πυκνότητα ήχων, γεγονός που υποδεικνύει τα περιθώρια βελτίωσης μελλοντικά.

Data Construction for Training and Evaluation of Artificial Intelligence Systems in Audio Event Detection

ABSTRACT

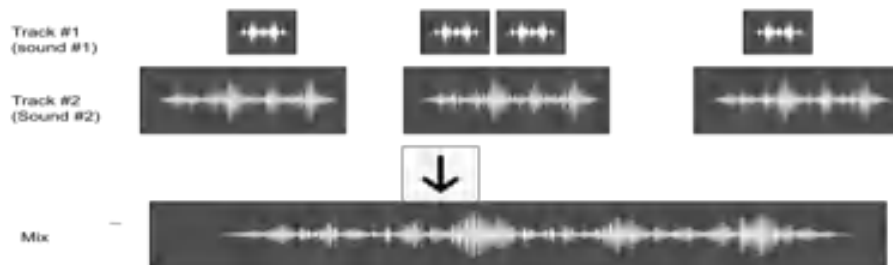
This paper presents a system for detecting audio events, which has been trained using an artificial dataset that includes sound mixtures. The model is based on Wav2Vec2, a pre-trained AI model for speech recognition, and uses LSTM to predict overlapping audio events. The data has been trained on audio channels that contain up to five simultaneous sounds. The initial results are promising, but accuracy decreases in more complex mixtures with higher sound density, indicating the potential for improvements in the future.

Εισαγωγή

Η ανίχνευση ηχητικών συμβάντων (event detection) αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο έρευνας στην επεξεργασία ήχου με στόχο τον εντοπισμό και την καταμέτρηση γεγονότων και πηγών σε ηχητικά αρχεία. Η ανάγκη για τέτοιου είδους εργαλεία παρουσιάζεται σε διάφορους τομείς, όπως παραδείγματος χάρι η ανάλυση μουσικής [1], η επεξεργασία ήχου και βίντεο, η παρακολούθηση της άγριας ζωής [2], αλλά και η υγειονομική περίθαλψη [3]. Πρόσφατη πρόοδος στους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης έχει φέρει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεθόδων που μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα απομονωμένο ηχητικό απόσπασμα [4] ή να διαχωρίσουν πηγές από μίξη ηχητικού σήματος που περιλαμβάνει συγκεκριμένες ασθενώς επισημειωμένες πηγές [5], όμως η ανίχνευση και η καταμέτρηση διακριτών ηχητικών γεγονότων σε πολύπλοκα ηχητικά αρχεία με επικάλυψη πολλαπλών πηγών ήχου παραμένει μια πρόκληση. Στο παρόν κείμενο, αναλύεται η διαδικασία εκπαίδευσης ενός μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης, με τη χρήση ενός αλγορίθμου δημιουργίας τεχνητών συνόλων δεδομένων (dataset), με στόχο την ανίχνευση αλληλεπικαλυπτόμενων ηχητικών συμβάντων σε ηχητικά αρχεία.

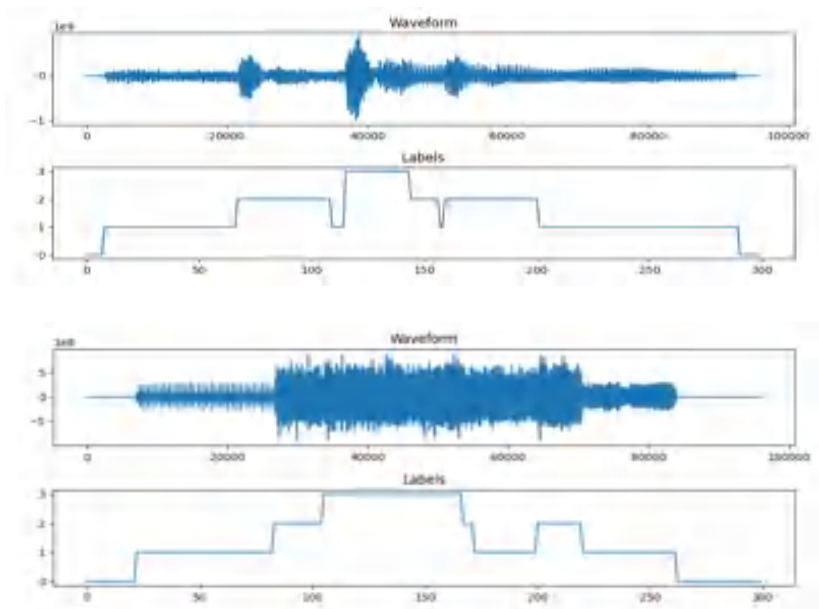
1. Μέθοδος

Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνικό dataset που δημιουργήθηκε μέσω μίξης διαφορετικών κομματιών ήχου. Η διαδικασία δημιουργίας του dataset υλοποιήθηκε με την ανάπτυξη μιας κλάσης, η οποία κατασκευάζει τυχαίες μίξεις ήχου και τις αντίστοιχες επισημάνσεις των ηχητικών συμβάντων. Οι πρωταρχικοί ήχοι είναι επιλεγμένοι από την ιστοσελίδα freemusicarchive.org [1] και εφαρμόζονται πάνω τους φίλτρα για τον εμπλουτισμό και μεγέθυνση του dataset. Συγκεκριμένα, μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε ήχο τα εξής φίλτρα: χαμηλοπερατό φίλτρο (lowpass filter), υψηλοπερατό φίλτρο (highpass filter), αλλαγή τονικού ήχους (pitch shift) και κοκκώδη σύνθεση (granular synthesis). Έπειτα οι ήχοι χρησιμοποιούνται από την κλάση που δημιουργήθηκε τοποθετώντας τυχαίες επιλογές από τους επεξεργασμένους ήχους σε κανάλια με τυχαία ένταση και τελικά δημιουργώντας μια μίξη. Κάθε κανάλι περιέχει μόνο έναν ήχο τοποθετημένο σε τυχαίες θέσεις και εντάσεις. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος καθορίζονται οι παράμετροι: duration (διάρκεια), που ορίζει την διάρκεια της κάθε μίξης, και number_of_tracks (αριθμός καναλιών), που ορίζει πόσα κανάλια θα παραχθούν. Η επιλογή μόνο 1 καναλιού, θα δημιουργήσει μια μίξη χωρίς επικαλύψεις απαρτιζόμενη από έναν μόνο ήχο. Ενώ η επιλογή 5, για παράδειγμα, καναλιών, θα δημιουργήσει μια μίξη με 5 ήχους (1 σε κάθε κανάλι) και επικάλυψη το πολύ μέχρι 5 ταυτόχρονους ήχους.



Σχήμα 1: Διαδικασία παραγωγής μίξης ήχου

Για κάθε μίξη, παράγονται και οι αντίστοιχες επισημάνσεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εκπαίδευση του μοντέλου. Οι επισημάνσεις αυτές είναι μια λίστα τιμών που αντιστοιχεί σε διαστήματα των 20 ms του ήχου και δηλώνει τον αριθμό των ήχων που επικαλύπτονται κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 2: επισημειώσεις τεχνητού συνόλου δεδομένων

Το πρόγραμμα απαρτίζεται από το Wav2Vec2 μοντέλο και στην έξοδο του ένα LSTM δίκτυο.

Το Wav2Vec2 είναι ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης που αναπτύχθηκε από την ομάδα της Meta AI (πρώην Facebook AI Research) για την αναγνώριση ομιλίας. Βασίζεται σε μια προσέγγιση αυτόματης μάθησης χαρακτηριστικών, με στόχο να εκπαιδευτεί πάνω σε μη επισημειωμένα δεδομένα και να προσφέρει αναπαραστάσεις για μοντέλα downstream, όπως η αναγνώριση φωνής και άλλες εργασίες που σχετίζονται με την επεξεργασία ήχου. Το μοντέλο χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη, τον encoder, έναν αρχικό κωδικοποιητή (convolutional neural network - CNN) που λαμβάνει το ακατέργαστο σήμα και το μετατρέπει σε μια χρονική αναπαράσταση, διατηρώντας σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το περιεχόμενο του ήχου σε μικρότερη κρυφή διάσταση (latent space) και τον contextualizer, ένα μετασχηματιστή (Transformer) που λαμβάνει την έξοδο του κωδικοποιητή και κατασκευάζει αναπαραστάσεις που λαμβάνουν υπόψη τις μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις στο σήμα. Χρησιμοποιώντας self-attention, το μοντέλο μπορεί να κατανοήσει το πλαίσιο των ήχων σε βάθος χρόνου. Το Wav2Vec2 χρησιμοποιεί μη επιβλεπόμενη μάθηση (unsupervised learning), όπου μαθαίνει να προβλέπει τμήματα του σήματος ήχου ανά 20 ms που έχουν "καλυφθεί" (masked) κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Αυτή η τεχνική επιτρέπει στο μοντέλο να μαθαίνει ουσιαστικές αναπαραστάσεις χωρίς την ανάγκη για μεγάλα σύνολα δεδομένων με επισημάνση.

Το LSTM (Long Short-Term Memory) είναι ένας τύπος νευρωνικού δικτύου αναδρομής (Recurrent Neural Network - RNN) που σχεδιάστηκε ειδικά για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της μακροχρόνιας εξάρτησης (long-term dependency) στα παραδοσιακά RNNs. Το LSTM αποτελείται από την κυψέλη μνήμης (memory cells), τα οποία έχουν την ικανότητα να διατηρούν ή να απορρίπτουν πληροφορίες. Κάθε κύτταρο LSTM έχει τρεις βασικές πύλες, την πύλη εισόδου (input gate) που αποφασίζει ποιες νέες πληροφορίες θα προστεθούν στη μνήμη, την πύλη λήθης (forget gate), που καθορίζει ποιες πληροφορίες θα απορριφθούν ή θα ξεχαστούν από την κυψέλη μνήμης και την πύλη εξόδου (output gate) υπεύθυνη να ρυθμίζει το ποιο μέρος της μνήμης θα χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί η έξοδος.

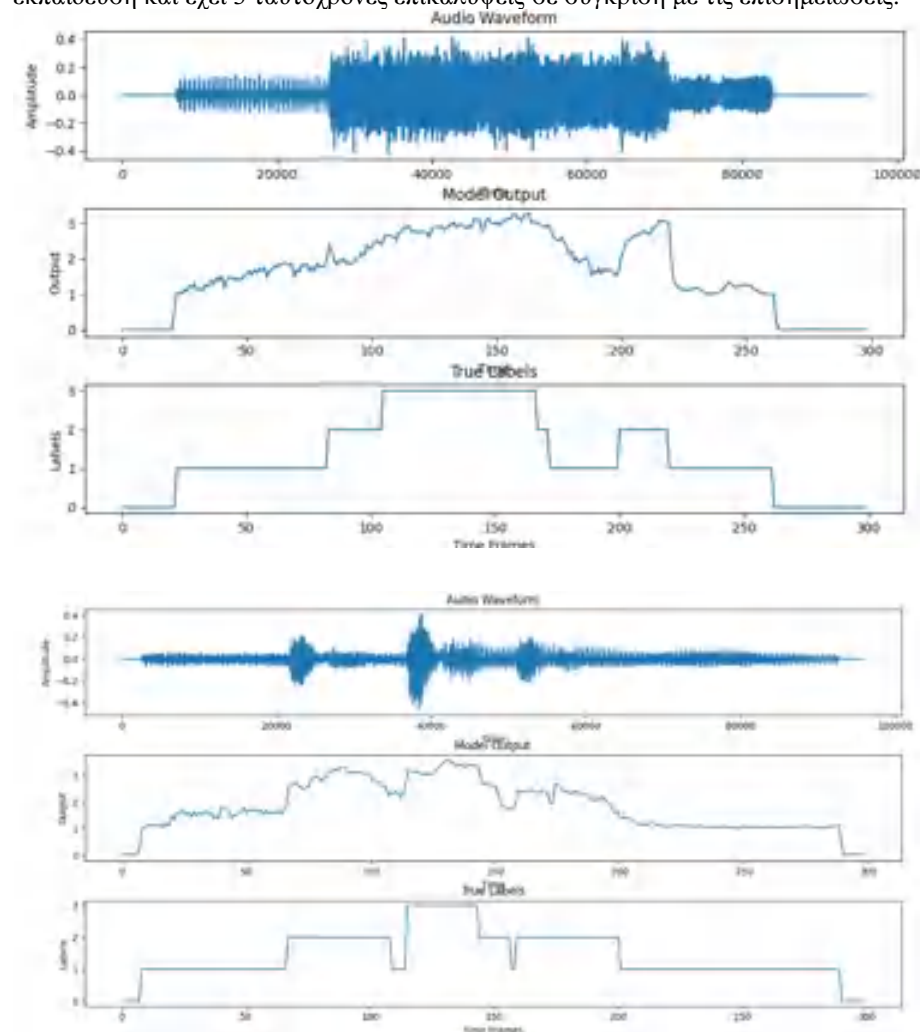
Αυτές οι πύλες επιτρέπουν στο LSTM να διατηρεί χρήσιμες πληροφορίες για μεγαλύτερες χρονικές ακολουθίες, κάτι που το καθιστά εξαιρετικά αποτελεσματικό για εργασίες που σχετίζονται με ακολουθίες, όπως η επεξεργασία ήχου, κειμένου, και βίντεο.

Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε το μοντέλο «facebook/wav2vec2-base» που έχει έξοδο μια αναπαράσταση 768 διαστάσεων. Στην συνέχεια το LSTM μειώνει τις διαστάσεις σε 256 και 128 και, εν τέλει, σε 1 ενώ ταυτόχρονα παρεμβάλει και μια μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης τύπου ReLU.

2. Αποτελέσματα

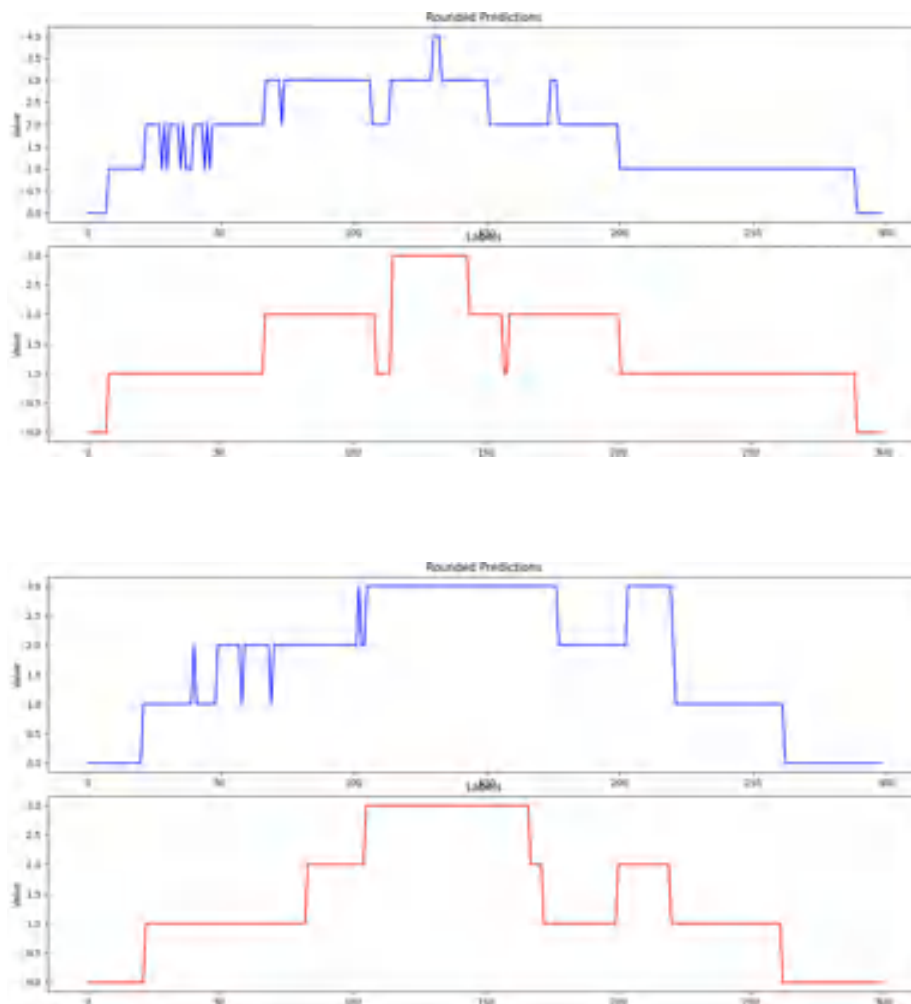
Έπειτα από την εκπαίδευση του μοντέλου σε αρχεία ήχου με μικρή πυκνότητα επικάλυψης το μοντέλο καταφέρνει να προβλέψει σωστά μεγάλο μέρος των απαντήσεων. Η δυσκολία του σε μεγαλύτερη πυκνότητα επικάλυψης ήχων οφείλεται

κυρίως στο γεγονός ότι κατά την εκπαίδευση, για λόγους εξοικονόμησης πόρων, εκπαιδεύτηκε με μέγιστο αριθμό καναλιών ίσο με 5. Συνεπώς, οι μέγιστες ταυτόχρονες επικαλύψεις μπορεί να είναι το πολύ 5. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι προβλέψεις του μοντέλου σε ένα ηχητικό αρχείο που δεν έχει χρησιμοποιηθεί κατά την εκπαίδευση και έχει 3 ταυτόχρονες επικαλύψεις σε σύγκριση με τις επισημειώσεις.



Σχήμα 3: Πρόβλεψη μοντέλου και σύγκρισή με επισημειώσεις

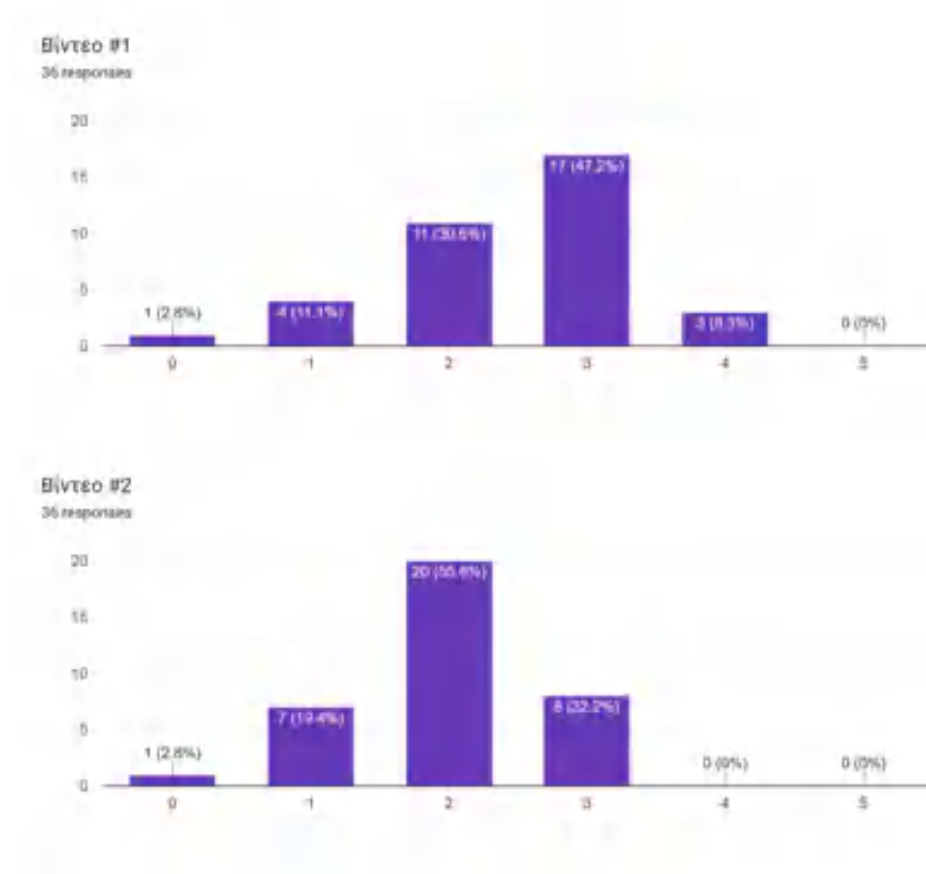
Έπειτα, παίρνοντας από μια στρογγυλοποίηση τις τιμές εξόδου του μοντέλου καταλήγουμε σε αυτό το διάγραμμα όπου είναι πιο διακριτή η σύγκριση με τις επισημειώσεις.



Σχήμα 4: Στρογγυλοποιημένες τιμές πρόβλεψης μοντέλου και σύγκριση με επισημειώσεις

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια έρευνα με σκοπό να ελεγχθεί κατά πόσον το ανθρώπινο αυτί μπορεί να εντοπίσει τις επικαλύψεις των ηχητικών συμβάντων σε ένα ηχητικό απόσπασμα. Συγκεκριμένα, στα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, 36 άτομα κλήθηκαν να καταμετρήσουν τους ταυτόχρονα επικαλυπτόμενους ήχους σε συγκεκριμένο σημείο του ηχητικού αποσπάσματος. Και

στις 2 περιπτώσεις η σωστή απάντηση για το πλήθος των ταυτόχρονων ήχων είναι 3. Στην πρώτη περίπτωση, σχεδόν οι μισοί συμμετέχοντες βρήκαν την σωστή απάντηση με ποσοστό 47% ενώ στην δεύτερη περίπτωση οι συμμετέχοντες απάντησαν σε ποσοστό 88% λανθασμένα. Οι ακριβείς απαντήσεις φαίνονται στο σχήμα παρακάτω. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται η δυσκολία αναγνώρισης και καταμέτρησης των επικαλυπτόμενων ήχων, καθιστώντας αυτό το έργο απαιτητικό για το ανθρώπινο αυτί.



Σχήμα 5: Απαντήσεις ερωτηματολογίου

3. Σύνοψη και μελλοντικές προεκτάσεις

Συνοψίζοντας, τα μέχρι τώρα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνεται να προβλέπουν σε ενθαρρυντικό βαθμό τον σωστό αριθμό επικαλύψεων. Ωστόσο, η έως τώρα απόδοση του μοντέλου περιορίζεται από μερικούς παράγοντες. Αρχικά, το ίδιο το προεκπαιδευμένο μοντέλο είναι σχετικά μικρό, καθώς έπρεπε να μπορεί να

αξιοποιηθεί με τον εξοπλισμό που υπάρχει διαθέσιμος. Επίσης μικρό είναι και το σύνολο δεδομένων, καθώς έπρεπε να ελεγχθεί ένα προς ένα το κάθε ηχητικό αρχείο, διασφαλίζοντας πως δεν υπάρχουν κενά στην αρχή και στο τέλος τους, οδηγώντας σε περιορισμένο πλήθος πρωτόλειων ήχων. Επιπροσθέτως, το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε συνολικά 10,000 (δέκα χιλιάδες) μίξεις ήχων λόγω περιορισμένου εξοπλισμού. Τέλος, λόγω πάλι του εξοπλισμού έπρεπε η εκπαίδευση να περιοριστεί σε πυκνότητα επικάλυψης ήχων με μέγιστο το 5 κάτι που περιορίζει και τις μετέπειτα προβλέψεις σε μέγιστο 5.

Διορθώνοντας τα προβλήματα που αναφέρθηκαν, θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα στις προβλέψεις του μοντέλου.

Μελλοντικά, εκτός από τις αλλαγές που προτάθηκαν, θα άξιζε να προστεθεί και άλλο μοντέλο μηχανικής μάθησης το οποίο θα εκτελεί πολυκάναλη κατηγοριοποίηση των ήχων ή ακόμα και διαχωρισμό των καναλιών.

4. Αναφορές

- [1] Mesaros, A., Heittola, T., Virtanen, T., & Plumbley, M. D. (2021). Sound Event Detection: A tutorial. *IEEE Signal Processing Magazine*, 38, 67-83.
- [2] Nolasco, I., Singh, S., Morfi, V., Lostanlen, V., Strandburg-Peshkin, A., Vidaña-Vila, E., Gill, L., Pamula, H., Whitehead, H., Kiskin, I., Jensen, F. H., Morford, J., Emmerson, M. G., Versace, E., Grout, E., Liu, H., & Ghani, B. (2023). Learning to detect an animal sound from five examples. *Ecological Informatics*, 102258. doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102258.
- [3] Rougui, J. E., Istrate, D., & Souidene, W. (2009). Audio sound event identification for distress situations and context awareness. In 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 3501-3504). Minneapolis, MN, USA. doi: 10.1109/IEMBS.2009.5334581.
- [4] Elizalde, B., Deshmukh, S., Al Ismail, M., & Wang, H. (2023, June). Clap learning audio concepts from natural language supervision. In ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 1-5). IEEE.
- [5] Kong, Q., Chen, K., Liu, H., Du, X., Berg-Kirkpatrick, T., Dubnov, S., & Plumbley, M. D. (2023). Universal source separation with weakly labelled data. *arXiv preprint arXiv:2305.07447*.
- [6] <https://freesound.org/> (Οκτώβριος 2024)
- [7] Baevski, A., Zhou, H., Mohamed, A., & Auli, M. (2020). Wav2Vec 2.0: A Framework for Self-Supervised Learning of Speech Representations. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*.
- [8] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.



Διαδικτυακή εφαρμογή για την ανάλυση συναισθηματικής πληροφορίας

Νικόλαος Βρύζας^{1*}, Λάζαρος Βρύζης¹, Μαρίνα Σταματιάδου¹, Χαράλαμπος Δημούλας¹

¹ Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

*nvryas@auth.gr (υπεύθυνου)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται στο πλαίσιο του έργου SHAZAAM (*Science Hoaxes to Avoid Alienation in Generation Z - A Media literacy Approach*). Το SHAZAAM αποσκοπεί στην υποστήριξη των νέων που ανήκουν στη γενιά Z για την καταπολέμηση της διάδοσης ψευδοεπιστημονικού περιεχομένου. Από τη βιβλιογραφία σε σχέση με το φαινόμενο της παραπληροφόρησης στον γραπτό λόγο, προκύπτει ότι σε μεγάλο βαθμό, το στυλ, και το συναισθήμα γραφής μπορούν να αποτελούν από μόνα τους σημαντική ένδειξη για την αναγνώριση ψευδούς περιεχομένου. Η υπόθεση είναι ότι το ίδιο ισχύει και για την οπτικοακουστική πληροφορία. Παρουσιάζεται μια διαδικτυακή εφαρμογή που παρέχει αναγνώριση συναισθήματος ως υπηρεσία, βασισμένη σε μοντέλα βαθιάς μάθησης. Η εφαρμογή έχει ως στόχο να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την ανάλυση οπτικοακουστικού περιεχομένου από τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης.

A web application for emotion information retrieval

ABSTRACT

This work is carried out within the research project SHAZAAM (*Science Hoaxes to Avoid Alienation in Generation Z - A Media literacy Approach*). SHAZAAM aims to support the youth of Generation Z to combat the spread of pseudoscientific content. From the scientific literature on the phenomenon of misinformation in texts, it appears that to a large extent, the style and emotional content of writing can be an important cue in itself to identify false content. The research hypothesis is that the same applies to audiovisual content. A web application that provides sentiment recognition as a service based on deep learning models is presented. The application is intended to be used as a tool for analyzing audiovisual content from social media.

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται στο πλαίσιο του έργου SHAZAAM (Science Hoaxes to Avoid Alienation in Generation Z - A Media literacy Approach). Το SHAZAAM αποσκοπεί στην υποστήριξη των νέων που ανήκουν στη γενιά Z για την καταπολέμηση της διάδοσης ψευδοεπιστημονικού περιεχομένου. Αυτό γίνεται με δημιουργία ομάδων εστίασης για την αναγνώριση των βασικών χαρακτηριστικών του φαινομένου, με τη δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού, αλλά και την παροχή εργαλείων βασισμένων σε τεχνολογίες αιχμής.

Από τη βιβλιογραφία σε σχέση με το φαινόμενο της παραπληροφόρησης, προκύπτει ότι σε μεγάλο βαθμό, το στυλ, και το συναίσθημα γραφής μπορούν να αποτελούν από μόνα τους σημαντική ένδειξη για την αναγνώριση ψευδούς περιεχομένου. Κείμενα με έντονο συναισθηματικό φορτίο είναι πιο πιθανόν να έχουν ως στόχο την παραπληροφόρηση. Σχετικά πορίσματα προκύπτουν κυρίως από το πεδίο της αναγνώρισης κειμένου και ανάλυσης φυσικής γλώσσας, αλλά και από μελέτες πάνω σε πολυτροπική πληροφορία [1]-[3].

Το κίνητρο για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση του φαινομένου για την περίπτωση της συναισθηματικής πληροφορίας ηχητικού περιεχομένου. Η ερευνητική υπόθεση είναι ότι αφενός τα πορίσματα της βιβλιογραφίας για το φαινόμενο της παραπληροφόρησης μπορούν να επεκταθούν στην ειδική περίπτωση της ψευδοεπιστήμης και αφετέρου ότι το ζήτημα της συναισθηματικής φόρτισης ως σημαντικού κριτηρίου για την εγκυρότητα περιεχομένου έχει εφαρμογή και στην περίπτωση ηχητικού περιεχομένου. Το είδος περιεχομένου που ενδιαφέρει, ύστερα από την ανάλυση των σχετικών ομάδων εργασίας, είναι βίντεο μικρής διάρκειας που διαχέονται στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Αυτό το είδος περιεχομένου είναι από τα πιο δημοφιλή στη συγκεκριμένη ηλικιακή ομάδα [3].

Στην πιο συνήθη περίπτωση, η αναγνώριση ενός τέτοιου βίντεο δεν εμπίπτει στις συνήθεις τεχνικές εντοπισμού παραποίησης περιεχομένου, καθώς τα πλάνα είναι ως επί το πλείστον αληθινά [1]. Η ανάλυση των καναλιών εικόνα, ήχου και κειμένου [1] - [4] μπορούν να συμβάλλουν στην εξαγωγή χαρακτηριστικών που να οδηγούν στην κατηγοριοποίηση σχετικού περιεχομένου. Η έλλειψη επισημειωμένων συνόλων αναφοράς αποτελεί βασικό περιορισμό στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μεθόδων. Η ανάλυση συναισθήματος έχει αποδειχθεί ότι είναι μία από τις πιο κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούν οι δημιουργοί ψευδών πληροφοριών για να απευθύνονται στο κοινό τους [5] και η γλωσσική ανάλυση προωθείται κυρίως στο [6], με την ανάλυση συναισθήματος να καλύπτει μια σημαντική πτυχή ψευδών πληροφοριών σε διάφορους τύπους περιεχομένου (ηχητικό, οπτικό, κείμενο). Ωστόσο, οι πληροφορίες σχετικά με το θέμα είναι πολύ σημαντικές για τον εντοπισμό της διάδοσης ψευδών ειδήσεων Ένας ταξινομητής μόνο για το περιεχόμενο ενός συγκεκριμένου θέματος μπορεί να οδηγήσει σε ένα μοντέλο που είναι άσχετο για μελλοντική χρήση εργαλεία ιστού για την υποστήριξη των δημοσιογράφων και του κοινού.

2. Εργαλεία αναγνώρισης ψευδοεπιστημονικών ισχυρισμών σε βίντεο κοινωνικής δικτύωσης

Αντικείμενο του προγράμματος SHAZAAM είναι η δημιουργία εργαλείων για την ενίσχυση των νέων στην αναγνώριση ψευδοεπιστημονικών ισχυρισμών σε βίντεο που διαχέονται στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Τα εργαλεία που αναπτύσσονται διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες

2.1 Εκπαιδευτικό υλικό και δράσεις μη τυπικής εκπαίδευσης

Καθώς η συγκεκριμένη μορφή περιεχομένου αναγνωρίστηκε ως επικρατέστερη στην προσέγγιση νέων σε ζητήματα ψευδοεπιστήμης, δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο του έργου βίντεο καταπολέμησης γνωστών μύθων τα οποία παρέχονται στο κοινό μέσω της ιστοσελίδας του προγράμματος αλλά και μέσα από προγράμματα μη τυπικής εκπαίδευσης που πραγματοποιούνται σε διάφορες ακριτικές περιοχές της Ελλάδας και της Πορτογαλίας.

2.2 Εκπαιδευτικό ηλεκτρονικό παιχνίδι

Δημιουργήθηκε ένα ηλεκτρονικό παιχνίδι γνώσεων, το “Bad Gang” το οποίο απευθύνεται σε νέους της γενιάς Z και παρέχει ενημέρωση για το ζήτημα της ψευδοεπιστήμης αλλά και για γνωστούς διαδεδομένους μύθους.

2.3 Ανάλυση περιεχομένου μέσων κοινωνικής δικτύωσης

Υλοποιήθηκε διεπαφή σάρωσης περιεχομένου μέσων κοινωνικής δικτύωσης, με έμφαση στα βίντεο μικρής διάρκειας του Instagram. Η διεπαφή επιτρέπει την ανάλυση στατιστικών και τον εντοπισμό δημοφιλών θεματικών. Με αφετηρία τα επιστημονικά ευρήματα που συσχετίζουν τον εντοπισμό περιεχομένου παραπληροφόρησης με τη συναισθηματική πόλωση του περιεχομένου, η παρούσα εργασία προτείνει μια μεθοδολογία πρωτογενούς φιλτραρίσματος του υλικού αξιοποιώντας τεχνολογίες αναγνώρισης συναισθηματικής πληροφορίας σε ηχητικό περιεχόμενο.

3. Αναγνώριση συναισθηματικών μοτίβων σε οπτικοακουστικό περιεχόμενο

Το οπτικοακουστικό περιεχόμενο το οποίο ενδιαφέρει την παρούσα έρευνα μπορεί να μεταφέρει συναισθηματική πληροφορία σε διαφορετικές τροπικότητες πληροφορίας που συνυπάρχουν. Η εξαγωγή της πληροφορίας μπορεί να προσεγγιστεί σαν τα επιμέρους προβλήματα αναγνώρισης συναισθήματος στα επι

3.1 Αναγνώριση συναισθήματος μουσικής

Η μουσική είναι μία πολύ συνηθισμένη παράμετρος σε βίντεο που απευθύνονται στο συναίσθημα του θεατή καθώς είναι ένας πολύ εύκολος και αποτελεσματικός

τρόπος. Για την ανάλυση της συγκεκριμένης πληροφορίας αξιοποιείται μοντέλο αρχιτεκτονικής συνελκτικού νευρωνικού δικτύου, εκπαιδευμένο στη βάση Multi-modal MIREX Emotion Dataset [8] Πρόκειται για ένα σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει μουσικά κομμάτια επισημειωμένα από ακροατές ως προς το προσλαμβανόμενο συναίσθημα.

3.2 Αναγνώριση συναισθήματος ομιλίας

Οποιοδήποτε ενημερωτικό βίντεο περιλαμβάνει κάποια μορφή αφήγησης. Η ερευνητική υπόθεση είναι ότι ο εντοπισμός συναισθηματικής φόρτισης σε βίντεο φερόμενα ως επιστημονικά είναι πιθανή ένδειξη ψευδοεπιστημονικού περιεχομένου. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι ένα διδιάστατο συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο, που λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου σπεκτρογράμματα της κλίμακας Μελ. Είναι εκπαιδευμένο στη βάση AESDD [7], που περιέχει ηχογραφήσεις ηθοποιών με συναισθηματικά φορτισμένες φράσεις σε 5 διακριτές συναισθηματικές κλάσεις.

3.3 Πολυτροπική σύντηξη πληροφορίας

Η πολυτροπική σύντηξη πληροφορίας αφορά την αξιοποίηση διαφορετικών τροπικοτήτων της οπτικοακουστικής πληροφορίας, όπως συναίσθημα μουσικής, συναίσθημα ομιλίας, συναίσθημα γλωσσικής πληροφορίας κειμένου, συναίσθημα προσώπου, συναίσθημα οπτικής πληροφορίας. Αυτή η σύντηξη μπορεί να γίνει είτε σε ανώτερο επίπεδο αξιοποιώντας μοντέλα εξειδικευμένα σε κάθε τροπικότητα ξεχωριστά, είτε δημιουργώντας ένα μοντέλο άκρη-σε-άκρη (end-to-end) που να δέχεται ως είσοδο την οπτικοακουστική πληροφορία και να δίνει μια κοινή έξοδο. Η δεύτερη περίπτωση απαιτεί την ύπαρξη ενός μεγάλου όγκου επισημειωμένων δεδομένων, κάτι που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για το συγκεκριμένο πρόβλημα.



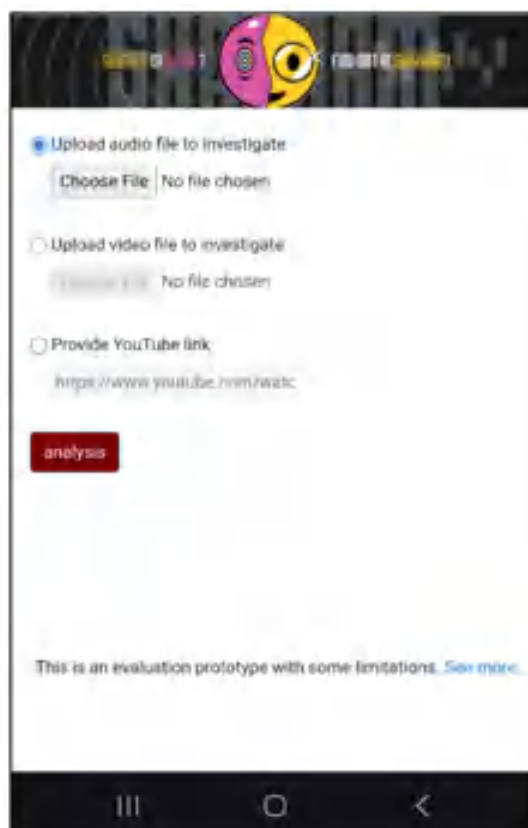
Σχήμα 4.1 Η βασική λειτουργικότητα του εργαλείου αναγνώρισης συναισθηματικής πληροφορίας

4. Διεπαφή αναγνώρισης συναισθηματικής πληροφορίας

Για την υλοποίηση της διεπαφής δημιουργήθηκε μια εικονική μηχανή η οποία λειτουργεί σαν εξυπηρετητής. Η λειτουργικότητα υλοποιήθηκε με τη βιβλιοθήκη flask σε γλώσσα python, υλοποιώντας μια αρχιτεκτονική δικτυακών υπηρεσιών. Παράλληλα με το γραφικό περιβάλλον και τη λειτουργικότητα διάδρασης με τον

χρήστη, οι δικτυακές υπηρεσίες περιλαμβάνουν την ταξινόμηση ηχητικού περιεχομένου χρησιμοποιώντας τα μοντέλα αναγνώρισης συναισθήματος μουσικής και ομιλίας που αναφέρθηκαν, καθώς και ένα στάδιο ταξινόμησης της ηχητικής πληροφορίας σε μουσική, ομιλία ή άλλους ήχους [9]. Για κάθε χρονικό παράθυρο, το ηχητικό περιεχόμενο ταξινομείται ως σήμα ομιλίας, μουσικής, ή άλλος ήχος και καλείται το αντίστοιχο μοντέλο συναισθηματικής ταξινόμησης (Σχήμα 4.1).

Το περιβάλλον αλληλεπίδρασης με τον χρήστη φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Ο χρήστης δίνει ως είσοδο ένα αρχείο ήχου, ένα αρχείο βίντεο ή έναν σύνδεσμο στο YouTube. Στην πρώτη περίπτωση, το αρχείο ήχου καταταμείται και στέλνεται ως είσοδος στις υπηρεσίες αναγνώρισης συναισθήματος. Στην περίπτωση του βίντεο, απομονώνεται περιλαμβάνεται ένα στάδιο απομόνωσης της ηχητικής πληροφορίας, ενώ στην περίπτωση του συνδέσμου προβλέπεται ένα επιπλέον στάδιο λήψης του αρχείου.



Σχήμα 4.2 ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής SHAZAAM

5. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Παρουσιάστηκε ένα σύστημα αναγνώρισης συναισθηματικής πληροφορίας ηχητικού περιεχομένου. Ο στόχος είναι το σύστημα να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο εντοπισμού ψευδοεπιστημονικού οπτικοακουστικού περιεχομένου. Η προτεινόμενη λειτουργικότητα παρέχεται και ως γραφική διεπαφή για τη χρήση χωρίς τεχνικές γνώσεις.

Οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις αφορούν την αξιολόγηση της μεθόδου σε σύνολα πραγματικών δεδομένων, η αξιολόγηση του εργαλείου από το κοινό απεύθυνσης και η ενσωμάτωσή του σε ένα πολυτροπικό σύστημα αναγνώρισης συναισθήματος.

6. Ευχαριστίες



Η παρούσα έρευνα υποστηρίζεται από το European Media and Information Fund. Η ευθύνη του περιεχομένου βαρύνει αποκλειστικά τους συγγραφείς και δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τις θέσεις του EMIF, του Calouste Gulbenkian και του European University Institute.

7. Αναφορές

- [1] Li, Xiaojun, et al. "A CNN-based misleading video detection model." *Scientific Reports* **12.1** pp 6092 (2022).
- [2] Papadopoulou, O., et al. "A corpus of debunked and verified user-generated videos." *Online information review* **43.1**: 72-88.(2019)
- [3] Qi, P., et al. "Fakesv: A multimodal benchmark with rich social context for fake news detection on short video platforms." *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Vol. 37. No. 12. (2023).
- [4] Papadamou, K., Zannettou, S., Blackburn, J., De Cristofaro, E., Stringhini, G., & Sirivianos, M.. "It is just a flu": assessing the effect of watch history on YouTube's pseudoscientific video recommendations. In *Proceedings of the international AAAI conference on web and social media* (Vol. 16, pp. 723-734) (2022)
- [5] Alonso, M. A., Vilares, D., Gómez- Rodríguez, C., & Vilares, J.. "Sentiment analysis for fake news detection." *Electronics*, **10(11)**, 1348 (2021).
- [6] Mishra, S., Shukla, P., & Agarwal, R.. "Analyzing machine learning enabled fake news detection techniques for diversified datasets." *Wireless Communications and Mobile Computing* 2022, **1-18** (2022).
- [7] Vryzas, N., Kotsakis, R., Liatsou, A., Dimoulas, C. A., & Kalliris, G. (2018). Speech emotion recognition for performance interaction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 66(6), 457-467.
- [8] Panda R., Malheiro R., Rocha B., Oliveira A. & Paiva R. P. "Multi-Modal Music Emotion Recognition: A New Dataset, Methodology and Comparative Analysis". *10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research -- CMMR'2013*, Marseille, France (2013)

- [9] Vrysis, L., Tsipas, N., Thoidis, I., & Dimoulas, C.. “1D/2D deep CNNs vs. temporal feature integration for general audio classification.” *Journal of the Audio Engineering Society*, **68(1/2)**, 66-77. (2020)
- [10] Vryzas, N., Vrysis, L., Kostarella, I., Dimoulas, C. A., “Investigating audio emotional patterns in pseudoscience” in *Proceedings of the 156th Audio Engineering Society Convention* (2024)



Επιστροφή στην Αχαράβη: Καταγραφή και ανάλυση του ηχητικού περιβάλλοντος και ηχοτοπίου μιας προστατευόμενης περιοχής

Θεοφάνης Μαραγκός^{1*}, Άγγελος Τσαλιγόπουλος², Νικόλαος Στεφανάκης³, Ανδρέας
Μνιέστρης¹, Αθανάσιος Επιτήδειος⁴, Γιάννης Ματσίνος², Διονύσιος Θ. Γ.

Κατερέλος⁴

¹Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

²Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

³Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό
Πανεπιστήμιο

⁴Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

* fmaragkos@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λιμνοθάλασσα Αντινιώτη στην Αχαράβη, Κέρκυρα, είναι ένας κρίσιμος υγροβιότοπος ενταγμένος στο δίκτυο Natura 2000, ο οποίος αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις. Το 2006 πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη έρευνα για την καταγραφή του ηχητικού περιβάλλοντος της περιοχής, ενώ ακολούθησε νέα μελέτη δώδεκα χρόνια αργότερα, το 2018-2019. Οι ηχογραφήσεις υψηλής ποιότητας αναλύθηκαν με σκοπό την εξαγωγή ακουστικών δεικτών, συμπεριλαμβανομένων του Δείκτη Ακουστικής Πολυπλοκότητας και του Δείκτη Βιοακουστικής. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές μεταβολές στη βιοποικιλότητα και στα επίπεδα θορύβου με την πάροδο του χρόνου, υπογραμμίζοντας την επιτακτική ανάγκη για προστασία αυτού του μοναδικού οικοσυστήματος από ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Revisiting Acharavi: Recording and analysis of the sound environment and soundscape of a protected area

ABSTRACT

The Antinioti lagoon in Acharavi, Corfu, is a critical wetland within the Natura 2000 network, facing growing conservation challenges. In 2006, an extensive sound environment survey was conducted in the area, with a follow-up study twelve years later in 2018-2019. High-quality recordings were analyzed to extract acoustic biodiversity indices, including the Acoustic Complexity Index and Bioacoustic Index. Results showed significant changes in biodiversity and noise levels over time, highlighting the urgent need to protect this unique ecosystem from human disturbance.

1. Εισαγωγή

Η περιοχή της Αχαράβης στη βόρεια Κέρκυρα, με τη χαρακτηριστική ρηχή λιμνοθάλασσα Αντινιώτη, αποτελεί ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον οικοσύστημα που φιλοξενεί μια πληθώρα πουλιών και μικρών θηλαστικών, μεταξύ των οποίων το απειλούμενο είδος της βίδρας (*Lutra-Lutra*). Παρά το γεγονός πως η λιμνοθάλασσα Αντινιώτη αποτελεί έναν από τους πιο ευαίσθητους και ενδιαφέροντες οικοτόπους στο Ιόνιο και προστατεύεται από τη συνθήκη Natura 2000, η ανάγκη προστασίας της εντείνεται λόγω των σχεδιαζόμενων ξενοδοχειακών μονάδων.

Το 2006 η ευρύτερη περιοχή της λιμνοθάλασσας αποτέλεσε τον τόπο διεξαγωγής μιας εκτεταμένης έρευνας με σκοπό τη χωροχρονική καταγραφή του ηχητικού περιβάλλοντος, καθώς και την ανάπτυξη θεματικών χαρτών ήχου. Αυτή η έρευνα πραγματοποιήθηκε από την πρώτη στην Ελλάδα διεπιστημονική ομάδα Ακουστικής Οικολογίας, η οποία ιδρύθηκε με πρωτοβουλία του ΕΡΗΜΕΕ (Εργαστήριο Ηλεκτροακουστικής Έρευνας και Εφαρμογών) του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Ιονίου Πανεπιστημίου [1].

Η εξέλιξη του κλάδου της ακουστικής, του σχετικού εξοπλισμού και της ανάλυσης του ηχητικού σήματος, έχουν προσφέρει νέα εργαλεία ανάλυσης των ηχητικών περιβαλλόντων με έμφαση στο οικολογικό περιεχόμενό τους. Εκτός από τους δείκτες έντασης που αναδεικνύουν το αποτύπωμα του θορύβου, μέσω του κλάδου της οικολογικής ακουστικής (Ecoacoustics) δημιουργήθηκαν οι ακουστικοί δείκτες [2]. Ως ακουστικός δείκτης μπορεί να οριστεί, το στατιστικό μέγεθος που συνοψίζει κάποια πτυχή της κατανομής της ακουστικής ενέργειας και άλλων πληροφοριών σε μία ηχογράφιση. Ο Δείκτης Ακουστικής Πολυπλοκότητας (ACI) είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους ακουστικούς δείκτες, βασισμένος στην παρατήρηση ότι οι βιοτικοί ήχοι, όπως το κελάηδισμα των πουλιών, έχουν μεταβλητή ένταση, ενώ οι ανθρωπογενείς ήχοι έχουν σταθερή. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η επανάληψη της καταγραφής του ηχητικού περιβάλλοντος της Αχαράβης χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο δειγματοληψιών. Το υψηλής ποιότητας ιστορικό αρχείο των καταγραφών του 2006, αναλύθηκε με τα νέα εργαλεία της οικολογικής ακουστικής και συγκρίθηκε με νέα δεδομένα από εξίσου σύγχρονο εξοπλισμό υψηλής πιστότητας. Στόχος της έρευνας ήταν η ανάλυση των διακυμάνσεων των επιπέδων ακουστικής βιοποικιλότητας και των επιπέδων θορύβου σε βάθος χρόνου.

2. Μέθοδοι

2.1 Περιοχή μελέτης

Η μελέτη διεξήχθη στο βόρειο τμήμα της Κέρκυρας στη λίμνη Αντινιώτη. Η συγκεκριμένη λίμνη έχει υψηλό οικολογικό ενδιαφέρον και είναι μέρος του δικτύου NATURA 2000. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1, το κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης καλύπτεται από μια λιμνοθάλασσα που κυριαρχείται από βιολογικές και ανθρώπινες δραστηριότητες [3]. Το ηχητικό περιβάλλον της περιοχής διαμορφώνεται από ηχητικά γεγονότα που παράγονται από τις δραστηριότητες του τοπικού πληθυσμού και άλλων επισκεπτών κατά την καλοκαιρινή περίοδο, της ενδημικής πανίδας, οικοσίων ζώων και φυσικών φαινομένων. Δώδεκα χρόνια μετά την αρχική

προσπάθεια, την περίοδο 2018-2019 επαναλήφθηκαν οι καταγραφές σε 5 (A04, A05, A06, A07 και A13) από τα 15 σημεία της λιμνοθάλασσας, καλύπτοντας το βορειότερο και πιο απομονωμένο τμήμα της.



Εικόνα 2.1. Περιοχή μελέτης (Πηγή Matsinos et al., 2008)

2.2 Συλλογή Δεδομένων

Χρησιμοποιώντας το ίδιο πρωτόκολλο καταγραφών που είχε χρησιμοποιηθεί το 2006, συλλέχθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα σε δύο χρονικούς κύκλους, έναν ημερήσιο και έναν εποχιακό. Ο ημερήσιος κύκλος περιλάμβανε οκτώ δεκάλεπτες δειγματοληψίες σε ένα εικοσιτετράωρο (μία για κάθε τρεις ώρες), ενώ ο εποχιακός τέσσερις περιόδους για ένα έτος (μία για κάθε ηλιοστάσιο και ισημερία) [3]. Οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν Σεπτέμβρη και Δεκέμβρη του 2018, καθώς και Μάρτη και Ιούνιο του 2019. Κάθε δεκάλεπτη δειγματοληψία ήταν χωρισμένη σε σαράντα μικροπεριόδους των 15 δευτερολέπτων. Ο διαμερισμός αυτός κρίθηκε αναγκαίος για την καλύτερη συλλογή των δεδομένων και για την πληρέστερη αποτύπωση της μικρομεταβολής του ηχητικού περιβάλλοντος [4] [5].

Τα ποσοτικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, ακολουθώντας τη μεθοδολογία της προηγούμενης ερευνάς [1], αποτελούνταν από ηχογραφήσεις υψηλής ποιότητας και από ακουστικές μετρήσεις. Τόσο οι ηχογραφήσεις όσο και οι ηχομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τα μικρόφωνα να είναι τοποθετημένα σε τρίποδα ύψους περίπου 170 cm (ύψος αυτιών του μέσου ανθρώπου) στοχεύοντας τις 0 μοίρες προς τον βορρά σε κάθε σημείο. Στην προηγούμενη έρευνα του 2006 είχε χρησιμοποιηθεί η συμπτωτική στερεοφωνική τεχνική ηχογράφηση M/S (Mid/Side) με μικρόφωνα της εταιρείας Schoeps (το CCM-5, με πολικό διάγραμμα παντοκατευθυντικό ως Mid και το CCM-8, με πολικό διάγραμμα δικατευθυντικό ως Side) με την κατάλληλη αντιανεμική προστασία [1]. Η M/S τεχνική επιλέχθηκε διότι αποτελεί μια από τις πιο δημοφιλείς συμπτωτικές τεχνικές στερεοφωνικής ηχογράφησης καθώς είναι πολύ εύκολη στην εφαρμογή, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από την πολύ καλή απόδοση της στερεοφωνικής εικόνας τόσο των ηχητικών πηγών όσο και του περιβάλλοντος χώρου [6] [7].

Για τις καταγραφές του 2018-19 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδο ηχογράφησης ambisonics με το μικροφωνικό σύστημα Ambeo VR της Sennheiser. Το Ambeo αποτελείται από 4 καρδιοειδείς κάψες σε τετραεδρική διάταξη, ενσωματωμένες σε ένα ενιαίο συμπαγές σώμα, με τη δυνατότητα συλλογής ηχητικών κυμάτων από 360 μοίρες. Η ηχογράφηση με τη μέθοδο ambisonics επιλέχθηκε διότι παρέχει πολλές δυνατότητες στη χωροτοποθέτηση του ήχου κατά την αναπαραγωγή [8] και είναι συμβατή με οποιοδήποτε αριθμό καναλιών/ηχείων [9] [10]. Στη συγκεκριμένη έρευνα ήταν σημαντικό να μπορεί να εξαχθεί ηχητική πληροφορία από μόνο ένα κανάλι ήχου που είναι χρήσιμο για περιβαλλοντικές εφαρμογές, στερεοφωνική πληροφορία για σύγκριση με τις προηγούμενες καταγραφές που είχαν πραγματοποιηθεί το 2006, αλλά και για χρήση σε καλλιτεχνικές και παιδαγωγικές εφαρμογές. Επίσης, θα έπρεπε από το σύστημα καταγραφής να μπορεί να εξαχθεί τρισδιάστατη ηχητική πληροφορία για απόδοση σε πληθώρα ηχείων (surround 5.1, 7.1 κ.λπ.) και ταυτόχρονα πληροφορία για αμφιωτική (binaural) τρισδιάστατη απόδοση σε ακουστικά, αναγκαία για πληρέστερη ηχητική αποτύπωση σε εφαρμογές που απαιτούν εμβύθιση (immersion) [11]. Όλες οι ηχογραφήσεις αποκωδικοποιήθηκαν στο Reaper Digital Audio Workstation από A φορμά σε B φορμά Classic FuMa [W, X, Y, Z] με χρήση του αλγόριθμου Ambeo A-B Converter Plugin που συνοδεύει το μικρόφωνο, μαζί με το απαραίτητο φίλτρο για βελτίωση της συχνοτικής απόκρισης του μικροφώνου. Έπειτα, οι ηχογραφήσεις αποκωδικοποιήθηκαν σε στέρεο φορμά και με τη χρήση του JS ATK FOA Decode Stereo.

Η διαδικασία της ηχομέτρησης πραγματοποιήθηκε με χρήση του ηχόμετρου και φασματικού αναλυτή υψηλής ακρίβειας (class 1) της εταιρείας Bruel & Kjaer Type 2250, ενώ το 2006 είχε χρησιμοποιηθεί το Cesva SC-310 (class 1). Στις ηχομετρήσεις, και στις δυο έρευνες, για κάθε χρονικό διάστημα (15 sec) καταγράφηκε η ισοδύναμη συνεχής ηχητική στάθμη Leq με σταθμισμένα φίλτρα A και Z, καθώς επίσης και σε πραγματικό χρόνο η ηχητική στάθμη ανά οκτάβα από 31.5 Hz - 16 kHz. Για τις ηχομετρήσεις του 2006 η συλλογή των δεδομένων έγινε αυτόματα με την επιλογή logging στο ηχόμετρο (40 ηχομετρήσεις χρονικής διάρκειας 15 sec σε 10 λεπτά), ενώ για τις ηχομετρήσεις του 2018-19 η συλλογή έγινε χειροκίνητα (20 ηχομετρήσεις των 15 sec σε 10 λεπτά).

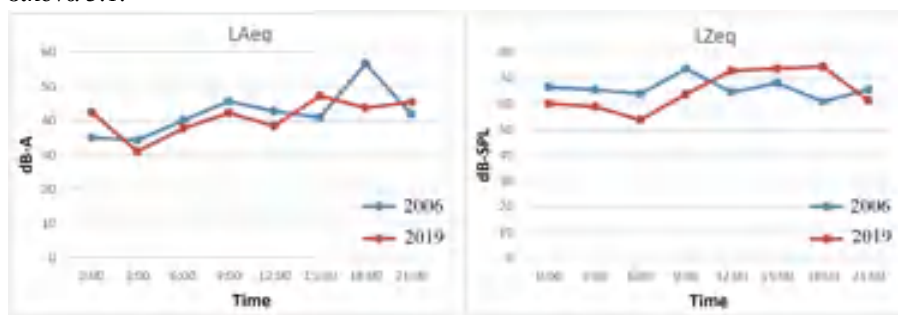
2.3 Ανάλυση Δεδομένων

Τα ασυμπίεστα *.wav αρχεία αναλύθηκαν στο λογισμικό στατιστικής ανάλυσης R χρησιμοποιώντας τα πακέτα seewave, tuneR, ineq και soundecology προκειμένου να εξαχθούν οι ακουστικοί δείκτες βιοποικιλότητας. Επιπλέον, αξιοποιώντας τις μεθόδους και τα εργαλεία που παρέχονται από τον κλάδο της οικολογικής ακουστικής (ecoacoustics), υπολογίστηκαν οι ακουστικοί δείκτες άλφα (α), συμπεριλαμβανομένου του Δείκτη Ακουστικής Πολυπλοκότητας (Acoustic Complexity Index - ACI) [12], του Δείκτη Βιοακουστικής (Bioacoustics Index - BIO) [13-14] και της Ακουστικής Εντροπίας (Acoustic Entropy - H) [15]. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό λογισμικό R, και πιο συγκεκριμένα, τα πακέτα seewave [16] και soundecology [17]. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού R (V.4.3.1). Τα πακέτα dplyr για τη χειραγώγηση και την περίληψη δεδομένων και τα ggplot2 για την οπτικοποίηση δεδομένων.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τους μέσους όρους όλων των δεικτών για κάθε σημείο μέτρησης. Τα δεδομένα συγκρίθηκαν στατιστικά προκειμένου να προσδιοριστεί εάν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιπέδων θορύβου και των επιπέδων των ακουστικών δεικτών για κάθε περίοδο μέτρησης. Επιπλέον, για να εξεταστεί η σχέση μεταξύ του θορύβου και των ακουστικών δεικτών, πραγματοποιήθηκαν συσχετίσεις. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συσχέτισης παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την ένταση και την κατεύθυνση της συσχέτισης μεταξύ των επιπέδων θορύβου και των ακουστικών δεικτών για κάθε περίοδο μέτρησης.

3. Αποτελέσματα

Ο έλεγχος κανονικότητας Shapiro-Wilk έδειξε ότι οι τιμές των δεικτών αποκλίνουν σημαντικά από την κανονική κατανομή ($p < 0.05$). Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν μη παραμετρικές αναλύσεις. Οι ωριαίες διακυμάνσεις της στάθμης του ήχου φαίνονται για την καλοκαιρινή περίοδο και για τις δύο χρονιές στην εικόνα 3.1.

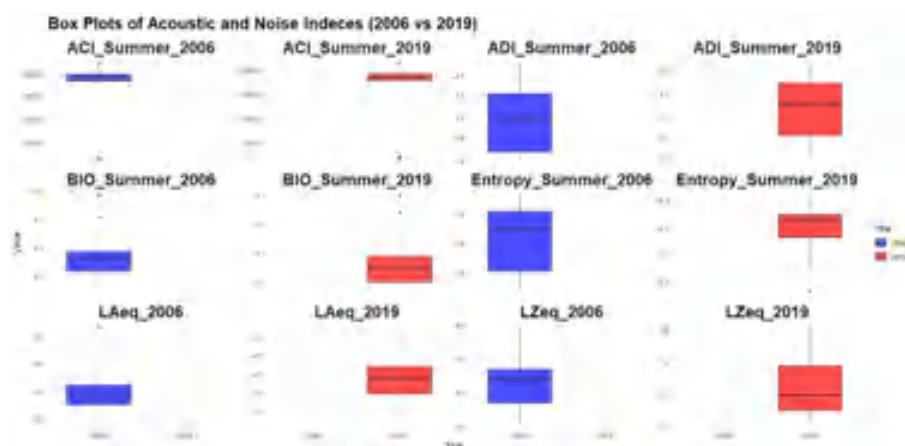


Εικόνα 3.1. Ωριαίες διακυμάνσεις του Leq την καλοκαιρινή περίοδο με φίλτρο A (αριστερά) και γραμμικό (δεξιά)

Οι διαφορές στις μετρήσεις είναι εν γένει μικρές, αποτυπώνοντας την ίδια χαρακτηριστική αύξηση της στάθμης κατά τη μετάβαση από τις νυχτερινές στις πρωινές ώρες. Το γεγονός ότι οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν ήταν καλές και στις δύο περιπτώσεις καθιστούν τις αντίστοιχες ηχογραφήσεις ιδανικές για σύγκριση μεταξύ τους, σε μια προσπάθεια να αναδειχθούν και ποιοτικές διαφορές ανάμεσα στις δύο χρονιές που εξετάζονται. Αξίζει να αναφερθεί ότι αν και οι υπόλοιπες εποχές (άνοιξη, φθινόπωρο, χειμώνας) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες διαφορές στη μέση ηχητική στάθμη, οι διαφορές αυτές φαίνεται οφείλονται κατά κύριο λόγο στις καιρικές συνθήκες (αέρας, βροχή κ.λπ.), καθιστώντας δύσκολη την οποιαδήποτε απόπειρα ποσοτικής σύγκρισης ανάμεσα στις δύο χρονιές.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η διαφορά στα επίπεδα των ακουστικών και θορυβωδών δεικτών κατά τη διάρκεια των ετών, πραγματοποιήθηκαν στατιστικές δοκιμές σύγκρισης (paired samples t-test). Χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες δοκιμές t, συγκρίναμε τους μέσους όρους των ακουστικών δεικτών και δεικτών θορύβου για το καλοκαίρι του 2006 και 2019. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα boxplot στην Εικόνα 3.2, οι δείκτες παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ των περιόδων μέτρησης.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα της δοκιμής t για δείγματα έδειξαν μόνο δύο στατιστικά σημαντικές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης BIO ($t = 1.99$, $p = 0.050$) και ο δείκτης Ακουστικής Εντροπίας ($t = -4.89$, $p = 0.00001$) παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ετών. Αυτές οι διαφορές μπορεί να είναι το αποτέλεσμα περιβαλλοντικών αλλαγών κατά τη διάρκεια των ετών, συμπεριλαμβανομένων αλλαγών στη βλάστηση, τη δομή του ενδιαιτήματος ή ακόμη και τις κλιματικές συνθήκες. Επιπλέον, η αρνητική στατιστική t για τα επίπεδα Ακουστικής Εντροπίας υποδηλώνει ότι το μέσο επίπεδο εντροπίας της πρώτης ομάδας (2006) είναι χαμηλότερο από αυτό της δεύτερης (2019). Εκτός από τις περιβαλλοντικές αλλαγές που έχουν συμβεί, ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η αύξηση του θορύβου από οχήματα, αεροπλάνα κ.λπ. θα μπορούσαν να εξηγήσουν αυτήν την αύξηση των επιπέδων Ακουστικής Εντροπίας. Στη συγκεκριμένη ανάλυση δεν βρέθηκαν άλλες σημαντικές διαφορές. Ωστόσο, παρά το γεγονός έλλειψης κάποιας στατιστικής σημαντικότητας, τα επίπεδα θορύβου (LAeq_mean 2006/2019: $t = 0.28$, $p = 0.781$, $M=38,77$ dBA, LZeq_mean2006/2019: $t = 0.67$, $p = 0.506$, $M=61,84$ dBZ) αναδεικνύουν το γεγονός ότι τα επίπεδα θορύβου ήταν αρκετά υψηλότερα το 2019.

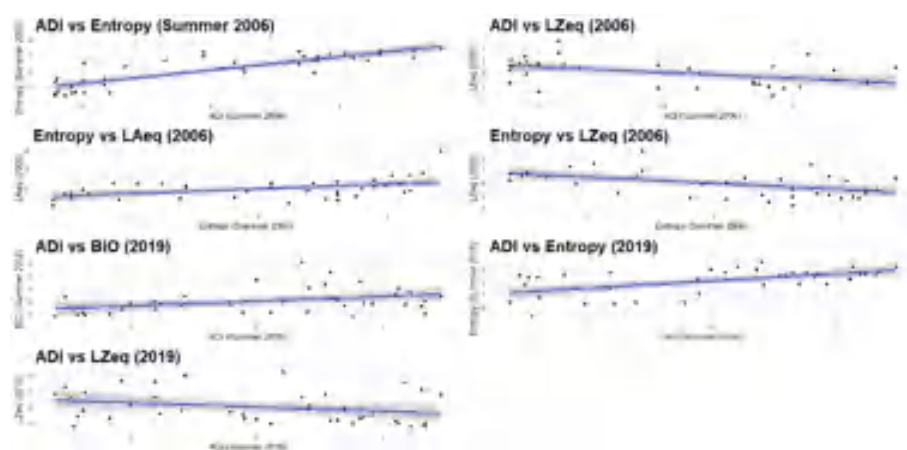


Εικόνα 3.2 Boxplots ακουστικών και δεικτών θορύβου για τα έτη 2006 και 2019

Συνοπτικά, τα t -tests δείχνουν ότι μόνο οι μετρικές BIO και Entropy παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ομάδων, με την Entropy να εμφανίζει ιδιαίτερα σημαντική διαφορά. Οι άλλες μετρικές (ACI, ADI, LAeq και LZeq) δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές.

Προκειμένου να μελετηθεί η σχέση μεταξύ των επιπέδων των δεικτών ακουστικής και θορύβου πραγματοποιήθηκε ανάλυση συσχέτισης κατάταξης Spearman. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολυάριθμες θετικές και αρνητικές συσχετίσεις που υποδηλώνουν τόσο ευθείες όσο και αντίστροφες σχέσεις. Για το καλοκαίρι του 2006, παρουσιάστηκε μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ακουστικής ποικιλίας (ADI) και του δείκτη θορύβου LZeq ($R^2 = -0.4391$, $p = 0.0052$), υποδεικνύοντας ότι καθώς αυξάνεται η μία μεταβλητή, η άλλη τείνει να μειώνεται. Αντίστοιχες αντίστροφες σχέσεις μεταξύ δεικτών θορύβου και ακουστικών δεικτών, έχουν εμφανιστεί τόσο σε αστικά όσο και φυσικά περιβάλλοντα [18]. Το καλοκαίρι του

2019, παρατηρήθηκε θετική συσχέτιση μεταξύ του ADI και του δείκτη βιοακουστικής BIO ($R^2 = 0.3967$, $p = 0.0113$). Τέλος, για το 2019, σημειώθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ του ADI και του LZeq ($R^2 = -0.3265$, $p = 0.0398$). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2, η ανάλυση δείχνει αρκετές σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών, υποδηλώνοντας πιθανές σχέσεις μεταξύ των επιπέδων θορύβου και διαφόρων ακουστικών δεικτών.



Εικόνα 3.3 Scatter plots συσχετισμένων μεταβλητών

Συνολικά, οι ισχυρές θετικές και αρνητικές συσχετίσεις που εντοπίστηκαν απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση για την κατανόηση της οικολογικής και ακουστικής δυναμικής της περιοχής που μελετήθηκε.

4. Συμπεράσματα

Οι ηχογραφήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τις επιλεγμένες τεχνικές στις δύο καταγραφές (2006 και 2018-19) καταδεικνύουν την αναγκαιότητα χρήσης εξοπλισμού υψηλής ποιότητας και πιστότητας κατάλληλου για καταγραφή πεδίου. Η αξιοποίηση των ηχογραφήσεων μπορεί να γίνει σε πολλαπλά επίπεδα, από ερευνητικά έως καλλιτεχνικά. Επιπλέον, η σύγκριση ηχογραφήσεων από τα ίδια σημεία και τις ίδιες χρονικές περιόδους και εποχές μπορεί να αξιοποιηθεί στο εκπαιδευτικό τομέα της Ακουστικής Οικολογίας.

Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι οι δείκτες ακουστικής βιοποικιλότητας και θορύβου παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των ετών 2006 και 2019, με τις μεταβολές αυτές να σχετίζονται πιθανώς με περιβαλλοντικές αλλαγές και ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Οι αρνητικές συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών θορύβου και των ακουστικών δεικτών που εμφανίστηκαν το 2006 και το 2019, αναδεικνύουν την επιρροή του θορύβου στην ακουστική ποικιλία και πολυπλοκότητα σε βάθος χρόνου. Συνεπώς, ο θόρυβος επηρεάζει την οικολογική ισορροπία της περιοχής. Αυτές οι διαπιστώσεις επισημαίνουν την ανάγκη για συνεχιζόμενη παρακολούθηση και προστασία των οικολογικά ευαίσθητων περιοχών.

5. Αναφορές

- [1] Α. Μνιέστρης, et al. «Έρευνα και Μελέτη Ελληνικών Ηχοτοπίων», *Ακουστική* 2006, ΕΛΙΝΑ, Ηράκλειο (2007)
- [2] J. Sueur & A. Farina, Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics*, **8(3)**, 493–502 (2015)
- [3] Y. G. Matsinos, et al. “Spatio-temporal variability in human and natural sounds in a rural landscape”, *Landscape Ecology*, **23**, pp. 945-959 (2008)
- [4] A. D. Mazaris, et al. “Spatio-temporal analysis of an acoustic environment: interactions between landscape features and sounds”, *Landscape Ecology*, Vol. 2009, **24**, pp. 817-831 (2009)
- [5] B.L. Krause. *Wild soundscapes in the national parks: an educational program guide to listening and recording*. National Park Service (2002).
- [6] F. Rumsey & T. McCormick, *Sound and Recording*, Sixth Edition. Focal Press pp 493-498 (2009)
- [7] Θ. Μαραγκός, et al. «Περιπτωσιολογική Μελέτη Τεχνικών Ηχογράφησης Ηχοτοπίων» 4^ο Συνέδριο Ακουστικής Οικολογίας, Μυτιλήνη, Ελλάδα, pp 300-311 (2016)
- [8] D. G. Malham & A. Myatt, “3-D sound spatialization using ambisonic techniques” *Computer music journal*, **19.4**, pp 58-70 (1995)
- [9] M. A. Gerzon, “Multi-system Ambisonic Decoder” *Wireless World* **83**, pp 43-47 (1977)
- [10] M. A. Gerzon, “Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video”, *Journal of the Audio Engineering Society* **33(11)** pp 859–871(1985)
- [11] Θ. Μαραγκός, Α. Μνιέστρης, Α. Επιτήδειος «Ηχογραφώντας το Ηχοτοπίο Εν Κινήσει», 6^ο Συνέδριο Ακουστικής Οικολογίας, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα (2021)
- [12] A. Farina & P. Li “The Acoustic Complexity Indices (ACIs)”. In A. Farina & P. Li (Eds.), *Methods in Ecoacoustics: The Acoustic Complexity Indices*, Springer International Publishing, pp 31–70 (2021)
- [13] J.Sueur, T. Aubin, C. Simonis “Seewave, a Free Modular Tool for Sound Analysis and Synthesis”. *Bioacoustics*, **18(2)**, pp 213–226 (2008)
- [14] LJ Villanueva-Rivera. (2013). An Introduction to the soundecology Package [Computer software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/soundecology/vignettes/intro.html>
- [15] H. Wickham, et al. (2023) dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. Available at: <https://github.com/tidyverse/dplyr> (Accessed: [29/8/2024])
- [16] R: The R Project for Statistical Computing [Internet]. [cited 2024 Aug 29]. Available from: <https://www.r-project.org/>
- [17] H. Wickham, et al. (2023) dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. Available at: <https://github.com/tidyverse/dplyr> (Accessed: [29/8/2024])
- [18] Α. Tsaligopoulos, S. Kyvelou, Α. Karapostoli, Ν. Bobolos, Τ. Tsintzou, D. F. Lekkas, Y. G. Matsinos, “Sound complexity as a strategy for livable and sustainable cities: The case of an urban waterfront”. *Noise Mapping*, **10(1)** (2023)



Investigating the Urban Soundscape of Athens through Soundwalks and Acoustic Measurements

Wiktor Mastela¹, Areti Andreopoulou
Laboratory of Music Acoustic and Technology (LabMAT)
Department of Music Studies, National and Kapodistrian University of Athens
¹wiktormas@music.uoa.gr

ABSTRACT

The soundscape of Athens has its own unique tonal character. The city sound is intertwined with its urban structure and society, creating a distinct environment to which individuals are intrinsically connected. Sound travels through the city, evolving as “the city speaks for itself” [21]. This relationship is explored through soundwalks, a method used to study the sonic environment. By following a specific route and employing an auto-ethnographic approach to the surrounding space, the unique auditory qualities of the city are revealed. Additionally, sound level measurements (dB) are taken during the process to assess and understand the noise pollution of the city. The primary goal, however, is to uncover the intriguing auditory nuances that can be experienced during the soundwalks.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ηχοτοπίο της Αθήνας έχει το δικό του μοναδικό ηχόχρωμα. Ο ήχος της πόλης είναι στενά συνδεδεμένος με την αστική δομή και την κοινωνία, δημιουργώντας ένα ιδιαίτερο περιβάλλον με το οποίο ο άνθρωπος συνδέεται άμεσα. Ο ήχος κυκλοφορεί μέσα στην πόλη και εξελίσσεται, με αποτέλεσμα να «μιλάει» η πόλη από μόνη της [21]. Η μελέτη του ηχοτοπίου της Αθήνας πραγματοποιείται μέσω ηχητικών περιπάτων, που αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση του ηχητικού περιβάλλοντος. Μέσω μιας συγκεκριμένης διαδρομής και μιας αυτο-εθνογραφικής προσέγγισης, αναλύεται η μοναδικότητα της πόλης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εξερεύνησης, μετριοούνται τα επίπεδα έντασης (dB) για την ανάλυση της ηχορύπανσης της Αθήνας. Ο βασικός στόχος είναι να αποκαλυφθούν οι ενδιαφέρουσες ακουστικές αποχρώσεις που ενδέχεται να είναι αντιληπτές μόνο μέσω των ηχητικών περιπάτων.

Introduction

The city has always been a part of human nature. “*The urban fabric is a creation, a collection of essential actions for humans, who create and experience this structure (the city)*” [9]. The sound of the city is linked to the urban structure and society, creating a distinct environment with which humans are connected [1,14]. The variety of sounds constantly emanating from the environment (e.g., sounds of nature, street noise, industrial sounds, etc.) causes people to coexist in a chaotic soundscape created by the modern city [8]. The soundscape of the city shapes the human experience in the urban space and is a central element of the relationship between individuals and their environment.

1. Theoretical Framework

1.1 The Urban Soundscape

The expansion of cities and their populations, along with the increase in technological means in daily life, have led to the extension of anthropogenic sounds into the natural soundscape. The sound surrounding humans now seems to be a part of their everyday life, and to a large extent, humans are influenced by these sounds, simultaneously understanding their position within the auditory environment [18]. Jeziński [8] refers to these as the “*inherent components of human activity within the City,*” which have been largely assimilated. Residents often pay no attention to the acoustic environment around them due to habituation; however, this does not mean that these sounds are not connected to the environment, the city, and themselves [19].

The city is in a constant state of construction and reconfiguration. Human actions determine the levels of noise and quiet that permeate daily life. Nowadays, quiet has nearly disappeared, and noise has gained more ground, creating a continuous ‘drone’ (like an ‘*elevator music*’) [12] that eliminates opportunities for the human ear to rest. The “*tranquil areas*” [16] now seem to represent the oasis, that is, the infinitesimal points of silence in an ‘urban desert,’ far from the ‘invasions of civilization’. Furthermore, urban infrastructure does not support nature, which is at risk of being lost due to human activity [6,23]. On the contrary, within the urban fabric, humans become distanced from the sonic environment and fail to perceive the ‘erosion’ of their urban soundscape.

1.2 The Character of a City

The soundscape of nearly any environment, from rural to urban and industrialized, is largely shaped by sounds that are often unique to the given socio-cultural context (as it is the immediate social recipient of the space) [14]. The nature, extent, and distinctiveness of a city's characteristic sounds depend on the length of time spent in the city, who we are, and our relationship with the urban space [17]. Understanding a city and its landscape can be seen as a process of decoding, which heavily relies on recognizing the sounds (soundmarks) present in it and thus defining the urban environment [7]. This environment is further burdened by the tourism industry, biophilic urbanism [4], and other urban interventions that

shape a city's sound. It is also observed that the environmental burden is transferred to people [15].

However, as *Labelle* [10] notes, a city that permeates sounds within the urban landscape simultaneously becomes a "*musical instrument*" because inhabited areas are filled with a plethora of sounds, providing an acoustic experience, whether positive or negative, and the understanding of these experiences depends on each individual's perception [10]. City sounds are marked with local meanings and intentions [5], while a resident with an acoustic experience (a trained ear) has the ability to derive meanings from the presence of these sounds – the auditory events.

2. Research

2.1 The Soundwalk

As listeners, we are aware of our surroundings, yet through soundwalking, we can gain a deeper understanding and experience of both the natural environment and our connection to it [16]. What this process offers is the assured expansion and acceptance of the concept of Soundwalking as a valid method and means of self-awareness. This is because 'understanding' through soundwalking is achieved not only through the ears but also through the many ways we move and listen (interaction with the environment) [10]. Soundwalks can serve as a means to engage listeners, leading them to hear sounds (in specific soundscapes) where they exist (in nature), as opposed to the 'traditional' way of listening where music (or any auditory creation) is presented to listeners in a concert hall.

The process of soundwalking puts the walker into reflection and simultaneously leads them to a state of listening (*act of listening*) [10] with their entire body and all their senses (multisensorial) [5], making it a more refined process of thought and release from the ordinary [7]. In his text, *DeLaurenti* [3] quotes *Barry Traux*, who states that "*the best way, in fact, to engage with the acoustic complexity of the soundscape is Soundwalking.*" Additionally, according to *Labelle* [10], the act of walking can function as a method of connecting with the environment, perceiving the world, and addressing existing issues. Thus, the walker comes into direct relation with the environment and is led to a state of creation and co-creation [13]. The act of soundwalking can alter a person's perception of space and prompt the community toward a "*kinetic aesthetics*," i.e., designing their own city through minimal interventions but by walking [20]. It partly becomes an instrument of the body that seeks to awaken its own self to its environment.

2.2 Exploration

Soundwalking is the primary tool of this research. Exploring and navigating the city leads to observing the specific environment through sound. Sound is the central element, and each commentary focuses on it, revealing the diversity of the environment. This understanding is achieved not only through soundwalking but also through attentive listening, which is crucial for comprehending the environment. In this study, examines the soundscape of Athens, which significantly alters its sonic landscape, during various events and holidays.

Key days of soundscape variation include Easter week and August 15th, when a large portion of the city's residents leave, causing a noticeable decrease in the city's noise levels. This creates an opportunity to hear different sounds and events that are not audible on regular days due to the noise and commotion created by humans. This period allows citizens to walk and experience a changed soundscape, free from the sounds of horns, motorbikes, and car brakes. Instead, sounds like bird chirping, rustling leaves, sound reflections, and pauses in a constantly 'active' soundscape provide a different experience that is absent from daily urban life. Images of the quarantine period (of 2020) come to mind, evoking positive memories of ghost cities and highlighting the 'microscopic' nature of humans in relation to urban centers. This fresh, 'foreign' experience of an empty city may attract some individuals [8, 11].

A noticeable drop in noise levels can be also observed on November 17th, particularly in central areas of the city, which are clear of cars, offering the chance to explore blocked streets. At this time traffic is halted for safety reasons and various gatherings (*Polytechnic University protests*), leading to a change in the city's soundscape. During a protest, the dominance of human voices, expressing demands and objectives, leads to a significant disruption of the soundscape. Although the chants and noise of the participants prevail, imposing themselves on the environment, moments of silence occasionally break through, offering moments of calm. If a crowd blocks a street, it disrupts the flow and rhythm of daily life, while simultaneously reshaping the environment and its auditory experience. Thus, a silent protest can be a means to improve the environmental condition or at least allow participants to better hear their sound environment. On days like November 17th, the soundscape has the opportunity to 'rest' and be heard.

Another interesting possibility to experience an altered soundscape is during the *half-marathon* when authorities block central areas for runners. The interest in this case lies in the fact that runners do not produce 'excessive sounds,' unlike in protests, allowing the sound environment to be more prominent. Therefore, does noise always indicate human presence? Humans and modern industrial life have surpassed limits, disrupting balances and leading to a more burdened soundscape [2] that humans continue to overlook. This is evident from the tendency to play music everywhere, covering silence, which is perceived as unsettling [16].

2.3 Measurements

The measurements were conducted using a digital sound level meter in conjunction with recordings made with a ZOOM VR recorder. The recordings were carried out in parallel with the soundwalks, following the same one-kilometer (1 km) route each time (through one of the most central streets of the city), with a duration of 20 minutes. The return to the starting point was intended for a deeper reflection on the soundwalk and listening process, without further recording of sound. It should be noted that these are preliminary measurements serving merely as an additional element in the study and analysis of the acoustic environment.

The soundscape recordings were made during the Orthodox Easter holiday of 2024 and for two days in June. Additionally, the day of November 17th (2023) and the

Half-Marathon (2024) were used as material for examining and understanding the noise levels and the overall sound of Athens.

During the Easter days (specifically Easter Sunday and Monday), recordings and measurements of sound levels were conducted. Easter Sunday was a notable example of urban quiet, with the average sound level at 65,85 dB, especially in the afternoon hours, when citizen activity is higher (in the mornings, most people are at home after the Easter Vigil). Therefore, it is possible that the morning hours could have shown different results regarding lower sound levels. On Great Monday, due to the partial return of the residents, a certain degree of differentiation from the previous recording was noticeable. The afternoon time of the recording already contained more sound information and activity, though not at the levels of a typical day. The average measurement indicated 68,20 dB, revealing that the levels are not far apart, but the 2 dB (almost 3dB) difference observed is known to be perceptible to the human ear.

Regarding the days in June, which were ten days apart, the results were very similar. The first day showed an average of 71.20 dB, while the second day recorded 70.90 dB, demonstrating that the sound levels in everyday life do not vary significantly from day to day. A 'special event' is needed to cause any noticeable change in intensity levels. It is already observed that from the first measurement to the last, there is a difference of 5 dB, which represents approximately double the perceived intensity according to human hearing (5.35 dB). The issue lies in the fact that continuous exposure to elevated noise levels over an extended period will unavoidably have a significant impact on an individual's well-being, potentially affecting both their physical and mental health [23].

Therefore, based on simple measurements and field observations, it can be said that there is a noticeable difference, even though it is not large-scale. It affects a considerable portion of the population, who, although they understand the source, do not give it the necessary attention. Many citizens who choose to stay in Athens during the Easter holidays are aware of when the city feels deserted, and this understanding of the situation is certainly justified by the changes in sound. There is not only less traffic but also lower sound levels.

The experience of listening during the soundwalk was a process that initially required concentration, both for the purpose of gathering auditory information and for safety, as navigating the streets demands attention. One of the challenges encountered was managing both the recorder and the meter in hand, as the exploration depended on movement, which led to some physical strain. However, my focus remained undistracted from the listening experience itself. The soundwalk, especially during the holiday season, was particularly enjoyable due to the absence of traffic and noise, which emerged during the subsequent two measurements. This lack of noise made the soundwalk more pleasant and left my ears relaxed, as they were not exposed to an abundance of sounds.

3. Conclusion

This study examined the soundscape of Athens on specific days. The investigation was largely achieved through soundwalks and more attentive listening to the urban environment. The on-site immersion in the sound environment of these days was significant as it allowed for a better comparison of the city's acoustic conditions on different days. The experience of exploring and engaging in soundwalking can be considered one of the positive aspects of

this research, as it provided a more personal approach to the issue of urban soundscapes and served as an impetus for further study of Athens soundscape. Therefore, at least on a personal level, the goal of engaging with, if not fully understanding, the acoustic environment was achieved.

Regarding the soundscape of the capital, while changes may not be drastically noticeable on certain days, the uniqueness of sound on specific days brings a renewed 'life' to the sound itself. While it could be argued that such reactions to these events may seem excessive (especially for certain days of the year), it is undeniable that when the soundscape shifts, it provides an opportunity for other elements to 'breathe' and be heard. On the other hand, urban centers are designed to accommodate large populations, but the situation has progressed to the opposite extreme. There is no longer space for 'acoustic breathing.' Everything is packed together, struggling to escape the deep, omnipresent noise of the city, leading to the loss of both social and natural aspects of sound. The major issue is, of course, the listening to the environment by the residents and, more broadly, by people. If each person does not intend to listen to what surrounds them, they will not be able to perceive the various problems related to sound.

4. References

- [1] Barclay, L (2018) «The Agency of Sonic Art in Changing Climates». Ed.: Emmerson, S. *The Routledge Research Companion to Electronic Music* (pp 109-121). Routledge: London and New York.
- [2] Brzostek, D (2020). *Nagrania terenowe jako „techniki siebie”? Wokół etycznych konsekwencji dokumentowania pejzażu dźwiękowego*. AVANT, wol. XI, nr 3. ISSN: 2082-6710.
- [3] DeLaurenti, C (2020). *Activist Sound: Field Recording Phonography and Soundscapes of Protest*. (Doctoral Dissertation) Goldsmiths, University of London.
- [4] Droumeva, M. & Jordan, R (2019). *Sound, Media, Ecology: Introduction in Three Acts (chapter 1)*. Palgrave Macmillan
- [5] Droumeva, M & Schine, and J & Andrisani, V. (2010) *Emerging Voices: Extending the Canadian Perspective*. The Journal of Acoustic Ecology, 10(1), 22-32. ISSN 1607-3304.
- [6] Farinati, L & Firth, C (2017). *The Force of Listening*. Errant Bodies Press: DOORMATS, Berlin. Chapter 4.
- [7] Holmes, T (2022). *Sound Art. Concepts and Practices*. Routledge, New York and London, pp 28-35.
- [8] Jeziński, M (2020). *Śluchając // Śluchając w Mieście. Spacer Dźwiękowy ze Śluchawkami*. AVANT, wol. XI, nr 3. ISSN: 2082-6710
- [9] Jeziński, M & Lorek-Jezińska (2020). *Nasłuchiwanie Urbanocenu. Ludzie – Dźwięki- Miasta (Listening to the Urbanocene. People-Sounds-Cities)*. AVANT, wol. XI, nr 3. ISSN: 2082-6710.
- [10] Labelle, B (2010). *Acoustic Territories. Sound Culture and Everyday Life*. Continuum International Publishing

- [11] Losiak, R «O opisach pejzaży dźwiękowych». Ed.: Krzysztof Łukasiewicz, *Nowy idiografizm?*. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Prace kulturoznawcze XI, Wrocław 2010, p. 224 – 233
- [12] Makomaska, S (2019). «O (Niewygodnej) Ciszy i Fenomenie Muzyki Tła». Ed.: Rogala Tomara, *Barwy Ciszy: Cisza w Środowisku Naturalnym i w Kreacji Artystycznej*. Chopin University Press.
- [13] Reich, M.A (2018). *Soundscape Composition: Music as Environmental Activism* (Thesis). University of Puget Sound, Honors Program. Tacoma, Washington.
- [14] Saher, K. *Music and Performance as Sonic Acts of Political Struggle; Counter-Political Soundscapes in Urban Realm*. Sociology Study, June 2016, Vol. 6, No. 6, 378-391
- [15] Seabrook, D (2020). *Music Therapy in the Era of Climate Crisis: Evolving to Meet Current Needs*. ELSEVIER, The Arts in Psychotherapy 68 (2020) 101646
- [16] Szpunar, M (2020). *Ekologia Pejzażu dźwiękowego*. AVANT, wol. XI, nr 3. ISSN: 2082-6710
- [17] Tańczuk, R (2020). *Sonopolis. Kilka Uwag o Dźwiękowych Reprezentacjach Miasta*. AVANT, wol. XI, nr 3. ISSN: 2082-6710
- [18] Traux, B (2002). *Genres and Techniques of Soundscape Composition as Developed at Simon Fraser University*. Organised Sound, 7(1), 5-14, 2002.
- [19] Traux, B & Barrett, G (2011). *Soundscape in a Context of Acoustic and Landscape Ecology*. Landscape Ecology, Volume 26; Number 9. ISSN 0921-2973, Springer.
- [20] Vermeire, S & Vermeire, G. *Urba(n)Ear; Approaching, Walking and Listening the City With Notours, Augmented Aurality, in the Project Passeio Branco (White walk) in Lisbon*. INVISIBLE PLACES, 18-20 July 2014. Viseu, Portugal.
- [21] Western, T (2021) «Sonopolis: Activist Infrastructures and Sonic Citizenships in Athens». Ed. Devine, K & Boudreault-Fournier, A. *Audible Infrastructures: Music, Sound, Media, Critical Conjunctures in Music and Sound*. Oxford University Press, New York.
- [22] WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region (2018). ISBN: 9789289053563
- [23] Yoganathan, N. (2021). *Soundscapes of Resistance: Amplifying Social Justice Activism and Aural Counterpublics through Field Recording-Based Sound Practices*. Organised Sound, vol. 26, no. 2, Aug. 2021, pp. 201–210, 10.1017/s1355771821000248.



***Η εισβολή του ιδιωτικού στον δημόσιο χώρο:
προβλήματα προσπέλασης και ηχοπροστασίας
από την επέκταση των τραπεζοκαθισμάτων***

P. Δεληγιαννίδου, M. Ζαρίφογλου, B. Μητσόπουλος, B. Ηλιάδου, N. Μπάρκας
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
nbarkas@arch.duth.gr (υπεύθυνου)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δημοσίευση αναφέρεται σε διαδοχικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. στο διάστημα της πανδημίας, με συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από 15 επιλεγμένους χώρους της Θεσσαλονίκης.

Παράμετροι της έρευνας ήταν το πλήθος των επιχειρήσεων με υπαίθρια τραπεζοκαθίσματα και η έκταση που καταλαμβάνουν, η επάρκεια του χώρου για βάδισμα και ασφαλή κίνηση πεζών - αμαξιδίων, η καταλληλότητα των υλικών επίστρωσης και του νυχτερινού φωτισμού, καθώς και οι ηχητικές οχλήσεις από τις μουσικές εκπομπές και τη συγκέντρωση θαμώνων στα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος.

Όπως φαίνεται, το πρόβλημα είναι σοβαρό (και σε κάποιες θέσεις οξύτατο) εξαιτίας των θεσμικών ελλείψεων, αλλά και της αδυναμίας ελέγχου των σχετικών παραβάσεων

***The invasion of the private into the public space:
access and soundproofing problems
from the expansion of outdoor seating***

ABSTRACT

This paper refers to successive researches carried out at the Department of Architectural Engineering D.P. Thrace during the pandemic, which data collection and processing from 15 selected places in Thessaloniki.

Parameters of the research were the number of businesses with outdoor seating and the area they occupy, the sufficiency of the space for walking and safe pedestrian – wheelchairs movement, the suitability of the paving materials and night lighting, as well as the noise nuisance from the music emissions and the concentration of patrons of the shops.

As can be seen, the problem is significant (and in some places acute) due to the institutional shortcomings, but also the inability to control the relevant violations,

Εισαγωγή

Η δημοσίευση διαπραγματεύεται την κατάληψη των υπαίθριων δημόσιων χώρων από τραπεζοκαθίσματα, στην Θεσσαλονίκη. Ο δημόσιος χώρος αποτελεί τον βασικό

πυλώνων της κοινωνικής ζωής, όπου οι άνθρωποι συναντιούνται και αλληλοεπιδρούν. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αναδυθεί μια ισχυρή τάση εισβολής του ιδιωτικού συμφέροντος στον δημόσιο χώρο. Η ανεξέλεγκτη τοποθέτηση τραπεζοκαθισμάτων προκαλεί σοβαρά προβλήματα στη χρηστικότητα του χώρου, περιορίζει την ελεύθερα διαθέσιμη έκτασή του και εμποδίζει τη ροή των πεζών. [1], [2]

Η πολεοδομική εξέλιξη μιας πόλης είναι το αποτέλεσμα μιας πολυδιάστατης διαδικασίας, η οποία διαμορφώνεται ιστορικά από τα γεγονότα, τις ανάγκες και τις φιλοδοξίες των κατοίκων της. Η Θεσσαλονίκη κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα βίωσε έντονους μετασχηματισμούς που επηρέασαν το χαρακτήρα της. Κομβικά γεγονότα για την πολεοδομική οργάνωση της στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ήταν η πυρκαγιά στο κέντρο της πόλης, αλλά και το τεράστιο κύμα προσφύγων που συνέρρευσε μετά την Μικρασιατική καταστροφή. Λόγω έλλειψης δημόσιων πόρων, ο επανασχεδιασμός και η ανοικοδόμηση υιοθέτησε την τακτική της αντιπαροχής, με αποτέλεσμα να πυκνώσει ασφυκτικά ο πολεοδομικός ιστός και να φορτιστεί δραματικά, αρχικά ο κεντρικός Δήμος και στη συνέχεια οι περιφερειακές συνοικίες. Η αυξημένη αστική πίεση που ακολούθησε τον τελευταίο σεισμό (1978) επέτεινε τα προβλήματα διαχείρισης και προσβασιμότητας στο δημόσιο χώρο, με αποτέλεσμα την περεταίρω αλλοτρίωση της φυσιογνωμίας του, την πύκνωση της δόμησης και το συνωστισμό. [3]

Η πρόσφατη εξάπλωση των τραπεζοκαθισμάτων στους υπαίθριους χώρους έχει προκαλέσει μια έντονη αντιπαράθεση, όσον αφορά την επιρροή τους στη λειτουργία και την αισθητική του δημόσιου χώρου. Τα τραπεζοκαθίσματα αποτελούν αντινομία της έννοιας του ελεύθερου δημόσιου χώρου. Στοχεύουν στη δημιουργία μιας ευχάριστης ατμόσφαιρας για συγκεκριμένες κατηγορίες πελατών/καταναλωτών, αλλά παράλληλα στερούν το δημόσιο αγαθό από τους υπόλοιπους πολίτες. Ως αποτέλεσμα, οι πεζοδρόμοι, οι πλατείες και τα πεζοδρόμια έχουν μετατραπεί σε εμπορικές ζώνες, με τις υπαίθριες εγκαταστάσεις αυτών των καταστημάτων (τέντες, διαχωριστικά, ζαρντινιέρες, τραπεζοκαθίσματα κλπ) να καλύπτουν μεγάλο μέρος του δημόσιου χώρου. Πρόκειται για μια έμμεση μεταφορά δημόσιων κι ευρωπαϊκών πόρων στο ιδιωτικό κεφάλαιο. [4]

Με αφορμή τη πρόσφατη πανδημία, η ορθή σύσταση να αποφεύγονται οι συγκεντρώσεις σε στεγασμένους χώρους έδωσε το πρόσχημα για τη χαρακτηριστική επέκταση της εγκατάστασης τραπεζοκαθισμάτων στους δημόσιους χώρους (δωρεάν αύξηση κατά 50% των υφιστάμενων εκτάσεων), με αλυσιδωτές συνέπειες :

- δυσχέρειες στην ελεύθερη κίνηση των πεζών
- συρρίκνωση της ασφάλειας στο περπάτημα έως και κατάργηση της δυνατότητας κίνησης των ευάλωτων πολιτών
- αισθητική υποβάθμιση του δημόσιου χώρου, με αμφιβόλου ποιότητας πνεύμα διακόσμησης
- γιγάντωση της κοινωνικής απομόνωσης και μηδενισμός της κοινωνικής αλληλεπίδρασης.

Οι θόρυβοι του περιβάλλοντος προκαλούν σοβαρές ενοχλήσεις, η έκταση και η βαρύτητα των οποίων ποικίλλουν ανάλογα με την απόσταση από την πηγή, τα συχνотικά χαρακτηριστικά, την διάρκεια της όχλησης, την πολεοδομική οργάνωση της περιοχής και την προσδοκώμενη άνεση των κατοίκων της. Στις αστικές περιοχές, εδώ και 50 χρόνια, ο θόρυβος (ανεξαρτήτως σύνθεσης και προέλευσης) ιεραρχείται ως το σημαντικότερο πρόβλημα. Ισχυροί, περιοδικοί θόρυβοι προκαλούν σε ευαίσθητους περιοίκους παθολογικές επιπλοκές όπως ναυτία, ζάλη, πονοκέφαλο κλπ. Από συστηματικές οχλήσεις, εξαιτίας των νυκτερινών θορύβων εμφανίζονται

σοβαρές διαταραχές της ψυχικής υγείας ατόμων 1^{ης} και 3^{ης} ηλικίας, όπως νευρικότητα, ταχυκαρδίες, αϋπνία κλπ. [5]

Δυστυχώς, τα ισχύοντα, μέγιστα όρια θορύβου από κέντρα διασκέδασης δεν αναφέρονται στην ηχοπροστασία των υπαίθριων δραστηριοτήτων. Επίσης, η ελληνική νομοθεσία δεν ορίζει κριτήρια ακουστικής άνεσης για δραστηριότητες αναψυχής σε υπαίθριους χώρους, με εξαίρεση την πρόσφατη αναφορά στις μουσικές εκπομπές των beach bar (ΚΥΑ 38609, ΦΕΚ 1432/Β/10-3-23), με όριο εκπομπής 50 dB[A]. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (Noise Criteria NC), οι επιβεβλημένες συνθήκες ακουστικής άνεσης σε περιοχές αναψυχής τοποθετούνται μεταξύ NC-35 και NC-40 σε ωριαία ισοδύναμη ηχοστάθμη. Τέλος, με αστυνομικές διατάξεις, κατά τις περιόδους χειμερινής και θερινής ώρας ορίζεται η στάθμη 35 dB[A] ως μέγιστο όριο θορύβου σε περιοχές κατοικίας (το όριο ηχοπροστασίας κατοικίας Β' ακουστικής άνεσης του Κτιριοδομικού Κανονισμού). [6]

1. Η μεθοδολογία της έρευνας

Η δημοσίευση περιλαμβάνει τμήματα διαδοχικών, προπτυχιακών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. στο διάστημα 2022-24, από α) την Μαρία Ζαρίφη - τον Βασίλη Μητσόπουλο και β) την Βερονίκη Ηλιάδου. Η έρευνα περιλάμβανε τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων σε επιλεγμένους χώρους της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης. [7], [8]

Ως παράμετροι της έρευνας προσδιορίστηκαν :

- το πλήθος των επιχειρήσεων με υπαίθρια τραπεζοκαθίσματα,
- η έκταση του δημόσιου χώρου που καταλαμβάνουν,
- ο μέσος αριθμός τραpezιών ανά επιχείρηση,
- το ενδεικτικό πλήθος και των πελατών που εξυπηρετούνται υπαίθριως,
- το χρονικό διάστημα αιχμής της προσέλευσης πελατών και της πρόσθετης (πιθανά πρόσκαιρης) επέκτασης τραpezοκαθισμάτων
- η ελεύθερη λωρίδα του δημόσιου χώρου για περπάτημα και ασφαλή κίνηση,
- η καταλληλότητα των υλικών επιστρώσης και η επάρκεια του νυχτερινού φωτισμού
- η ηχορύπανση από τις μουσικές εκπομπές και την οχλοβοή της συγκέντρωσης θαμώνων στα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος.

Επίσης, καταγράφηκαν οι απόψεις των θαμώνων και των περαστικών σχετικά με την ασφαλή κίνηση πεζών / αμαξιδίων (παιδικών, ΑΜΕΑ), καθώς και τις πιθανές αιτίες ανασφάλειας των πεζών. Τέλος, αποδελτιώθηκαν δημοσιεύματα των τοπικών μέσων ενημέρωσης, σχετικά με τις οχλήσεις που προκαλεί αυτή η ιδιοποίηση του δημόσιου χώρου.

Για ευνόητους λόγους οικονομίας, η δημοσίευση επικεντρώνεται στο πρόβλημα των ηχητικών οχλήσεων και της ασφάλειας των πεζών.

2. Ενδεικτικά δεδομένα της έρευνας

2.1. Η λεωφόρος Όχι

Η λεωφόρος Όχι, ανάμεσα στην Άνω Πόλη της Θεσσαλονίκης και στη γειτονιά του Αγ. Παύλου, εξυπηρετεί μεγάλο φόρτο οχημάτων (όλων των κατηγοριών) στις δυο κατευθύνσεις της.

Το νότιο πεζοδρόμιο, με θέα όλης της πόλης, έχει καταληφθεί εξ ολοκλήρου από τραπεζοκαθίσματα, μόνιμες ημι-υπαίθριες εγκαταστάσεις, τέντες και διαχωριστικά, αλλά και αυθαίρετη επέκταση του εγκαταλελειμμένου εργοτάξιου μιας ερειπωμένης εκκλησίας. Αυτά, σε συνδυασμό με την έλλειψη συντήρησης των επιστροφών στο βαθμιδωτό βόρειο πεζοδρόμιο, την κατάληψη ενός τμήματος από τραπέζο-καθίσματα καθιστούν τις συνθήκες κίνησης ανέφικτες.



Εικόνα 2.1 (αριστερά) η κατάληψη του πεζοδρομίου (δεξιά) οι ανισοσταθμίες

Πρόκειται για συνολικά 4 καταστήματα, με μέσο όριο 10 τραπεζοκαθισμάτων ανά επιχείρηση (σε μία εκ των οποίων παίζει μουσική κομπανία), πλήθος περίπου 20 ως 40 πελατών ανά κατάσταση και συστηματική πύκνωση της χρήσης κατά τις πρωινές και βραδινές ώρες. Εξαιτίας αυτής της κατάληψης προκύπτει η απόλυτη αδυναμία διέλευσης αμαξιδίων και ο μηδενικός βαθμός ασφάλειας των πεζών (κατοίκων και τουριστών), οι οποίοι καταφεύγουν στο οδόστρωμα, ενώ η οχλοβοή και οι μουσικές εκπομπές κυμαίνονται από 75 έως 85 dB.

2.2. Το σταυροδρόμι των οδών Μητροπόλεως και Καρόλου Ντηλ

Αυτό το κεντρικό σταυροδρόμι συνθέτει την εικόνα της απόλυτης καταπάτησης ενός δημόσιου χώρου της Θεσσαλονίκης, που καταφέρνει να παραμένει διαχρονικά αόρατη από κάθε λογής υπεύθυνο. Η εξάπλωση του συνωθούμενου πλήθους των θαμώνων και των τραπεζοκαθισμάτων είναι σε τέτοια έκταση, που οι πεζοί και τα αμαξίδια αναγκάζονται να κινούνται στο οδόστρωμα των οδών, ενώ η ηχορύπανση ξεπερνά κάθε ανεκτό όριο, καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου.

Στη συγκεκριμένη, πολυσύχναστη περιοχή κατοικίας / εμπορίου, οι επιχειρήσεις καταστρατηγούν ανεργυρίαστα την κυκλοφορία και τις προδιαγραφές ασφάλειας, καταλαμβάνουν κάθε λωρίδα διέλευσης των πεζών, τοποθετούν τα τραπέζο-

καθίσματα με τρόπο που καθιστά ανέφικτο το βάδισμα. Κάθε απόπειρα διέλευσης συναντά την ενόχληση ή τις παρατηρήσεις σερβιτόρων / θαμώνων, η οπτική επαφή με το δάπεδο είναι ανέφικτη, ο νυχτερινός φωτισμός είναι αδύναμος, δηλαδή απουσιάζει κάθε στοιχειώδης ασφάλεια στην κίνηση.

Πρόκειται για 4 καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος με ποικίλο αριθμό τραπεζο-καθισμάτων (από 15 έως 70) και πλήθος θαμώνων (από 50 έως 200 άτομα), με την οχλοβοή να κυμαίνεται από 85 ως 95dB τις πρωινές ώρες, μέχρι 95 ως 105dB τις βραδινές ώρες.



Εικόνα 2.2 Η κατάληψη του πεζοδρομίου

3. Τα σφαιρικά δεδομένα

Τα δεδομένα των 16 περιοχών του δείγματος καταγράφονται στις γραμμές του παρακάτω πίνακα με αύξοντα αριθμό :

- η Παλιά Παραλία, στο βόρειο πεζοδρόμιο της λεωφόρου Νίκης, από την πλατεία Αριστοτέλους μέχρι την οδό Αγίας Σοφίας (αα 1) και από την οδό Αγίας Σοφίας μέχρι την οδό Μοργκεντάου (αα 2)
- η λεωφόρος Όχι του Δήμου Νεάπολης – Συκεών (αα 3)
- η πλατεία Μοριχόβου στα Λαδάδικα (αα 4)
- η πλατεία Εμπορίου στην περιοχή του Αγίου Μηνά (αα 5)
- η αγορά Καπάνι μεταξύ των οδών Βλάχη και Μενεξέ (αα 6)
- οι 2 πλευρικοί πεζόδρομοι της πλατείας Αριστοτέλους (αα 7)
- ο πεζόδρομος της Κομνηνών στα Λουλουδάδικα (αα 8)
- το σταυροδρόμι των οδών Μητροπόλεως και Καρόλου Ντηλ (αα 9)
- ο πεζόδρομος της Αγίας Θεοδώρας στο κέντρο (αα 10)

- ο πεζόδρομος της Ικτίνου στο κέντρο (αα 11)
- η περίμετρος της πλατείας Ναυαρίνου (αα 12)
- ο πεζόδρομος της οδού Τσιρογιάννη, στο Λ. Πύργο (αα 13)
- ο πεζόδρομος της οδού Κομνηνών στο κέντρο της Καλαμαριάς (αα 14)
- ο πεζόδρομος της πλατείας Σκρα στην Καλαμαριά (αα 15)
- το δυτικό πεζοδρόμιο της οδού Π. Πατρών Γερμανού, μεταξύ των οδών Τσιμισκή και Π. Μελά (αα 16)

Πίνακας 1. Σφαιρικά δεδομένα του δείγματος της έρευνας

αα	A	B	Γ	Ω	αα	A	B	Γ	Ω
1	OXI	OXI	75 - 82	M - B	9	OXI	OXI	89-100	M - B
2	OXI	OXI	93 - 95	Π - B	10	NAI	NAI	91- 93	Π - B
3	OXI	OXI	65 - 75	M - B	11	NAI	NAI	87 - 92	Π - A
4	NAI	NAI~	82 - 90	M - B	12	~	~	88 - 91	M - B
5	OXI	OXI	75 - 82	M - B	13	~	~	88 - 88	A - B
6	NAI	~	70 - 77	M - B	14	~	~	68 - 75	Π - B
7	~	NAI	86 - 87	M - B	15	OXI	OXI	70 - 78	M - B
8	~	~	84 -88	M - A	16	~	~	75 - 87	M - B

Στις στήλες του πίνακα σημειώνεται η αξιολόγηση και οι στάθμες θορύβου :

A) η επάρκεια της λωρίδας κυκλοφορίας των πεζών,

B) η ασφάλεια της κίνησης με αμαξίδιο (παιδικό, AMEA)

Γ) οι στάθμες ηχορύπανσης σε dB[A] κατά τα εξής χρονικά διαστήματα των μετρήσεων : Π (πρωί), Μ (μεσημέρι), Α (απόγευμα) και Β (βράδυ)

Τέλος, όσον αφορά τα σύμβολα της αξιολόγησης του πίνακα, σημειώθηκε :

NAI = ισχύει ~ = ισχύει μετρίως OXI = δεν ισχύει

4. Συμπεράσματα – επίλογος

Η έντονη αστικοποίηση των τελευταίων δεκαετιών έχει οδηγήσει στην άνιση κατανομή του αστικού χώρου, σε βάρος των κοινωνικών χρήσεων, με αποτέλεσμα τον περιορισμό ή και την παρεμπόδιση της κυκλοφορίας / προσπέλασης στο δημόσιο χώρο (πλατείες, πεζοδρόμια, πεζόδρομους). Τα προβλήματα οφείλονται κυρίως στις κακοτεχνίες των επιστρώσεων, στην αύξηση της αστικής ηχορύπανσης, στις αδειοδοτημένες καταλήψεις και περιφράξεις, καθώς και στις αυθαίρετες επεκτάσεις των τραπεζο-καθισμάτων. Οι ιδιωτικές επιχειρήσεις εισβάλουν στο δημόσιο χώρο, τον οικειοποιούνται και των επαναδιαπραγματεύονται ως καταναλωτικό προϊόν, σε βάρος των ελευθέρων, κοινωνικών δραστηριοτήτων της περιοχής.

Βασικός τρόπος παραβίασης είναι η εγκατάσταση διαφόρων κατασκευών όπως στέγαστρα, ομπρέλες, κιόσκια, περιφράξεις, ζαρντινιέρες και η σταδιακή επέκτασή τους σε βάρος της ασφαλούς προσπέλασης των πεζών και των αμαξιδίων (παιδικών ή AMEA). Ταυτόχρονα, η πλημμυρική επίβλεψη και η έλλειψη συντονισμού των αρμόδιων υπηρεσιών (Τροχαία, Δήμοι, Αστυνομία κλπ) έχει ως αποτέλεσμα την

αδυναμία ελέγχου της καταστρατήγησης των αδειοδοτήσεων, την ανεπάρκεια επιβολής (και τελικά είσπραξης) προστίμων, καθώς και την ουσιαστική παραίτηση από την προστασία διερχόμενων και περιοίκων από την ηχορύπανση, εξαιτίας της οχλοβοής και των μουσικών εκπομπών.

Όπως έδειξε η έρευνά μας, η οικειοποίηση και κερδοσκοπική εκμετάλλευση του δημόσιου χώρου στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης έχει ξεπεράσει κάθε επιτρεπόμενο όριο, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολες (και συχνά ανέφικτες), οι ανέξοδες δραστηριότητες αναψυχής όπως το περπάτημα, το παιχνίδι και οι κοινωνικές επαφές, λειτουργίες που καθιστούν έναν τόπο ελκυστικό και αξιομνημόνευτο. Είναι αυτονόητο πως απαιτείται η αυστηροποίηση του εθνικού θεσμικού πλαισίου και η θέσπιση πρόσθετων τοπικών κανόνων που θα καθιστούν αδύνατη (και χρηματικά ασύμφορη) τη διατήρηση της κατάληψης των δημόσιων χώρων.

Προφανώς, η αναζωογόνηση των δημόσιων χώρων σε κεντρικές περιοχές και οι αναπλάσεις στις γειτονιές απαιτούν μια συντονισμένη στρατηγική επεμβάσεων στην κατεύθυνση προστασίας του αστικού περιβάλλοντος και της βιώσιμης ανάπτυξης. Ανασταλτικός παράγων αποτέλεσε η μακρά περίοδος της οικονομικής κρίσης και η συγκυρία της πανδημίας. Ωστόσο, αξίζει να αναφέρουμε τις τελευταίες παρατηρήσεις μας σε τμήμα των περιοχών του δείγματος κατά τη διάρκεια της Διεθνούς Έκθεσης Θεσσαλονίκης (6/9 ως 16/9/24), οπότε φαίνεται πως μια συντονισμένη προσπάθεια των υπηρεσιών αστυνόμευσης (με συστάσεις κι επιβολή προστίμων, ως προσωρινό κλείσιμο καταστημάτων) κατάφερε να επιβάλει (με ελάχιστες εξαιρέσεις) τη διατήρηση των ζωνών κυκλοφορίας στους δημόσιους χώρους, αλλά και τη ρύθμιση της ηχορύπανσης από μουσικές εκπομπές στα όρια των 78 - 80dB[A].

Ευελπιστούμε πως οι έρευνες μας θα συμβάλουν στην ενίσχυση και βελτίωση της δημόσιας εικόνας της πόλης. Ωστόσο δεν έχουμε αυταπάτες, γνωρίζοντας πως τα οικονομικά συμφέροντα που σχεδιάζουν και υλοποιούν την εισβολή του ιδιωτικού στον δημόσιο χώρο έχουν βαθιές προσβάσεις στους θεσμούς και πως, δυστυχώς, «τα τραπέζοκαθίσματα χρηματοδοτούν προεκλογικές εκστρατείες». [9] Προϋπόθεση, λοιπόν, για τη σωτηρία των δημόσιων, υπαίθριων χώρων της Θεσσαλονίκης είναι η διαρκής, καθημερινή και ασυμβίβαστη διεκδίκηση της ποιότητας ζωής από τη πλευρά των κατοίκων της.

5. Αναφορές

- [1] Α. Αραβαντινός *«Πολεοδομικός σχεδιασμός για μια βιώσιμη ανάπτυξη του αστικού χώρου»*, έκδοση Συμμετρία. Αθήνα 2007
- [2] Σ. Κονταράτος *«Οντοπία και πολεοδομία»*. έκδοση ΜΙΕΤ, Αθήνα 2020
- [3] Α. Ναρ *«Θεσσαλονίκη 1912-2012, το μέλλον του παρελθόντος, μια διαφορετική αφήγηση της ιστορίας»* εκδόσεις Καπόν, Αθήνα 2011
- [4] Τ. Παπαϊωάννου *«Το ιδιωτικό και το δημόσιο στην πόλη»*, *Εφημερίδα των Συντακτών*, 2022, www.efsyn.gr/tehnese/art-neia/359409_idiotiko-kai-dimosio-stin-poli (ανακτήθηκε 16 / 8 / 24)
- [5] World Health Organization (WHO) *«International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems»*, 2019 (ανακτήθηκε 5 / 11 / 23)
- [6] Ν. Μπάρκας *«Δομική Φυσική - Ηχομόνωση»*, σημειώσεις του μαθήματος, Ξάνθη, 2014

- [7] Μ. Ζαρίφογλου – Β. Μητσόπουλος «*Η εισβολή του ιδιωτικού στο δημόσιο*», Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική έρευνα - Διάλεξη, Τ.Α.Μ. - Δ.Π.Θ. Ξάνθη 2024
- [8] Β. Ηλιάδου «*Η επέκταση του ιδιωτικού στον δημόσιο χώρο*», Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική έρευνα - Διάλεξη, Τ.Α.Μ. - Δ.Π.Θ. Ξάνθη 2024
- [9] Καταγγελίες που διατυπώθηκαν κατά το παρελθόν από την Στέλλα Αλειφέρη, δημ. σύμβουλο Πειραιά και τον Αγάπιο Σαχίνη δημ. σύμβουλο Θεσσαλονίκης



Ηχοτοπία προστατευόμενων οικοτόπων στα Λευκά όρη Χανίων

Χριστίνα Γεωργιάτου^{1*}, Κατερίνα Τζεδάκη¹, Χρυσούλα Αλεξανδράκη¹, Παναγιώτης Νύκτας²

¹ Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής / Ελληνικό Μεσογειακό
Πανεπιστήμιο (ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ)

² Department of Natural Resources, University of Twente (ITC)

* georgatou.ch@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την έρευνα μελετώνται για πρώτη φορά ηχοτοπία στα Λευκά Όρη των Χανίων. Διαφορετικά τοπία στα οποία ανήκουν βασικοί τύποι οικοτόπων της οδηγίας 92/43/ΕΟΚ ηχογραφούνται εδώ και δύομιση έτη. Στην έρευνα των ηχοτοπιών εφαρμόστηκε μία ποιοτική εκτίμηση βασισμένη στην φυσική παρατήρηση των ήχων με δειγματοληπτικές ακροάσεις ηχογραφήσεων, οπτικό έλεγχο φασματογραφημάτων και μία ποσοτική με την ανάλυση των ηχητικών καταγραφών σε συχνότητες γεωφωνίας – ανθρωποφωνίας και βιοφωνίας και την εξαγωγή των επιλεγμένων ηχητικών δεικτών (ACI-Δείκτης Ακουστικής Πολυπλοκότητας, ADI-Δείκτης Ακουστικής Ποικιλότητας, AEI-Δείκτης Ακουστικής Ομοιότητας, BI-Βιοακουστικός Δείκτης, NDSI-Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς του Ηχοτοπίου, Hf-Δείκτης φασματικής εντροπίας). Παρατίθεται η ανάλυση για το ηχοτοπίο του Λιμνίου του Ομαλού. Η διαχρονική ηχητική παρατήρηση στη Γρελέσκα για το έτος 2022 φανερώνει τις εποχιακές μεταβολές του ηχοτοπίου. Τέλος για ηχητικά δείγματα το καλοκαίρι του 2022 και 2023 στην τοποθεσία Γρελέσκα, διαφαίνεται μία συσχέτιση της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας και των ακουστικών δεικτών NDSI και Hf, δημιουργώντας ένα δυναμικό έρευνας προς τη σύνδεση των εποχιακών, των θερμοκρασιακών και των ηχητικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος.

Soundscapes of protected habitats in Lefka Ori (White Mountains) of Chania

ABSTRACT

In this research, soundscapes in Lefka Ori (White Mountains) of Chania are studied for the first time. Different landscapes belonging to main habitat types of Directive 92/43/EEC have been recorded for two and a half years. During the research, a qualitative assessment was applied based on the physical sound observation, visual inspection of spectrograms and a quantitative assessment with the analysis of the sound recordings in geophonic - anthropophonic and biophonic frequencies and the extraction of the selected sound indices (ACI-Acoustic Complexity Index, ADI-Acoustic Diversity Index, AEI-Acoustic Evenness Index, BI-Bioacoustic Index, NDSI-Normalized Difference Soundscape Index, Hf-Spectral Entropy Index). The analysis of the soundscape of the seasonal pond of Omalos is introduced. The long-term sound observation in Greleska for the year 2022 reveals the seasonal changes of the soundscape. Finally for recordings in the summer of 2022 and 2023 at the soundscape of Greleska, a correlation of the recorded temperature and the acoustic indices NDSI and Hf reveals the potential towards linking seasonal, thermal and sound characteristics of the environment.

Εισαγωγή

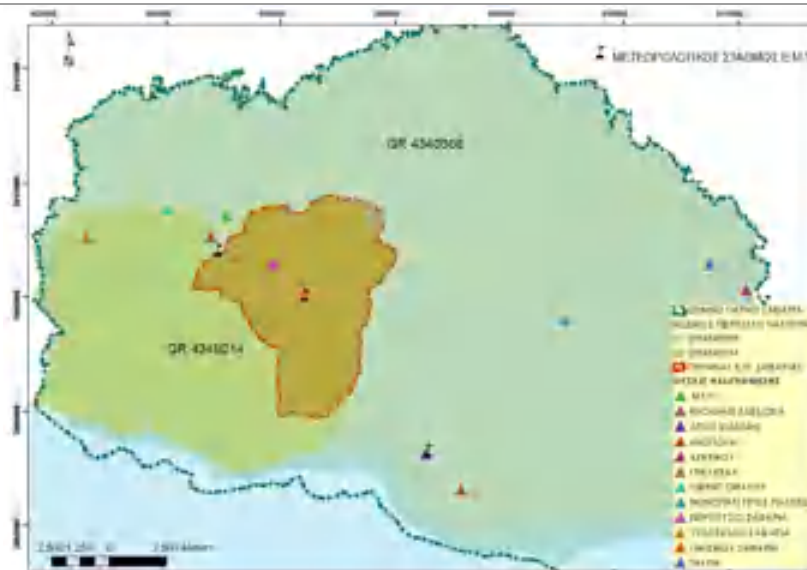
Έρευνες έχουν δείξει ότι η ανάλυση του ηχοτοπίου προσφέρει μια εφικτή προσέγγιση περιβαλλοντικής παρακολούθησης ([1], [2], [3]) και ότι η ηχητική παρατήρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ποικιλομορφίας, και των συνιστωσών ενός οικοσυστήματος, ιδιαίτερα δε στο Εθνικό Πάρκο Σαμαριάς όπου συναντώνται ποικίλα δασικά, μεσογειακά, υγροτοπικά οικοσυστήματα. Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και ανάλυση ήχου, ενώ έως σήμερα υπάρχει μία γεωμετρικά αυξανόμενη έρευνα για την ανάπτυξη ακουστικών δεικτών που αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά του ηχοτοπίου [4], [5], [6], [7]).

Οι περιοχές μελέτης είναι κατανεμημένες στα Λευκά Όρη σύμφωνα με τον Πίνακα 1 και Εικόνα 1.

Πίνακας 1. Περιοχές μελέτης ηχοτοπίου στα Λευκά Όρη με τις ώρες ηχογράφησης που αναλύθηκαν.

Τοποθεσία	Φυτοκάλυψη	Χρήση Γης κατά Corine	Χαρακτηριστικοί Τύποι οικοτόπων	Εποχή και Ωρες ηχογράφησης
ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΡΟΠΕΔΙΟΥ ΟΜΑΛΟΥ				
Εποχικό Λιμνίο Ομαλού	Σφενδάμια αμπελιτσιές, πρίνοι φρύγανα διάσπαρτες αγριοαχλαδιές καλλιέργειες μηλιάς	Σύνθετες καλλιέργειες 242, μη αρδευόμενη αρόσιμη γη 211 νησιωτικός υγρότοπος με κωδ. GR434KRI196 ΤΙΦΚ	3170 * Μεσογειακά εποχιακά τέλματα	21/9-30/9/2022 200 ώρες
Μαχί	Πρίνοι σφενδάμια διάσπαρτες αμπελιτσιές	Θάμνοι και χερσότοποι 322, μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις 324	Ελληνικά δάση πρίνου 934A	4/11-12/11/2022 173 ώρες
Δάσος Αμπελιτσιές	Αμπελιτσιές αγριοαχλαδιές, σφενδάμια, πρίνοι	Θάμνοι και χερσότοποι 322	Το δάσος Αμπελιτσιές δεν είναι καταχωρημένο με ξεχωριστό κωδικό οικοτόπου	30/4/-30/5/2022 606 ώρες
ΔΥΤΙΚΑ ΛΕΥΚΑ ΟΡΗ				
Γρελέσκα	Κυπαρίσσια, πρίνοι	Σκληροφυλλική βλάστηση 323	9290 Δάση Κυπαρισσιού	25/2 -17/12/2022 1791 ώρες
ΦΑΡΑΓΓΙ ΣΑΜΑΡΙΑΣ				
Ξυλόσκαλο	Κυπαρίσσια, σφενδάμια	Δάσος κωνοφόρων 312	9540 ενδημικά πευκοδάση	13/4/ - 24/4/2022 255 ώρες
Παλαιός οικισμός	Πεύκα κυπαρίσσια ελιές Εποχιακό ρέμα	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις Εκτάσεις 324 Δάσος κωνοφόρων 312	9290, 9540, 9620 κοίτη ποταμού χωρίς βλάστηση	5/9-14/9/2022 195 ώρες
Νερούτσικο	Μικτό Δάσος κυπαρισσιού – Πεύκα	324, 312	9290, 9540, 9620	30/5-22/6/2022 226 ώρες
ΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΛΕΥΚΑ ΟΡΗ				
Ασκούφου	Δάσος Κυπαρισσιού Πρίνοι εποχιακό ρέμα	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις 324, Φυσιικοί βοσκότοποι 321	9290 Δάση Κυπαρισσιού	6/3-28/4/2022 335 ώρες
Προς οροπέδιο Ταύρης	Δάσος Κυπαρισσιού Πρίνοι	Θάμνοι και χερσότοποι 322	9290 Δάση Κυπαρισσιού	5/1-12/1/2023 170 ώρες

ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ				
Άγιος Ιωάννης Σφακίων	Μικτό Δάσος Κυπαρισσιού – Πεύκα	324,321,312	9540 ενδημικά πευκοδάση	1/8-30/8/2022 345 ώρες
Ανώπολη	Πευκοδάσος με διάσπαρτους πρίνους	324,321,312	9540 ενδημικά πευκοδάση	25/3-13/4/2023 201 ώρες
ΑΛΠΙΚΗ ΖΩΝΗ				
Μονοπάτι προς Πάχρες	Χαμηλή θαμνώδης βλάστηση	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση 333, Απογυμνωμένοι βράχοι 332	Χέρσα εδάφη με ακανθώδεις θάμνους 4090	1/8-10/8/2022 175 ώρες



Εικόνα 1. Οι θέσεις ηχογράφησης στα Λευκά Όρη.

1. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία περιγραφής των επιλεγμένων ηχοτοπίων βασίστηκε σε αυτή που προτείνεται από τις «Οδηγίες για τη χρήση ακουστικών δεικτών στην περιβαλλοντική έρευνα» των Bradfer-Lawrence et al.,[8] όπου αναφέρεται ότι: (α) Η διακύμανση του τυπικού σφάλματος των ακουστικών δεικτών σταθεροποιείται μετά από συνεχείς εγγραφές 120 ωρών σε μία τοποθεσία, (β) Προτείνεται η χρήση πολλαπλών δεικτών περιλαμβανομένων του δείκτη ακουστικής πολυπλοκότητας ACI, ακουστικής ομοιότητας AEI, ακουστικής εντροπίας H ή κοινωνικοποιημένης διαφοράς του ηχοτοπίου NDSI.

Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν δειγματοληπτικές ακροάσεις και ανάλυση φασματογραφημάτων. Οι ηχογραφήσεις αναλύθηκαν με τη βοήθεια της νέας βιβλιοθήκης ηχητικής επεξεργασίας scikit-maad, έναν ανοιχτό κώδικα επεξεργασίας ηχητικών δεδομένων από περιβαλλοντικές ηχογραφήσεις [9].

1.1 Συλλογή ηχητικών δεδομένων

Για την έρευνα χρησιμοποιούνται τέσσερα καταγραφικά ήχου δύο Song Meter SM4 και δύο Song Meter Mini. Αναπτύχθηκε ένα πρωτόκολλο συλλογής δεδομένων (ύστερα από ένα διάστημα δοκιμών στο πεδίο και σε μεγαλύτερες συχνότητες δειγματοληψίας 96000Hz) το οποίο περιλαμβάνει την καταρχήν συνεχή

ηχογράφηση σε συχνότητα 48000 Hz. Η διάρκεια των ηχητικών αποσπασμάτων που συλλέγονται για κάθε μέρος είναι ενός λεπτού ή δέκα λεπτά για τα στερέο καταγραφικά. Μετά τον πρώτο χρόνο και τις δειγματοληπτικές ηχογραφήσεις στις τοποθεσίες του Πίνακα 1, τα καταγραφικά ήχου παραμένουν σταθερά σε τέσσερα μέρη (Γρελέσκα, Λιμνίο, Αη Γιάννης, Ανώπολη) με προγραμματισμό ηχογράφησης 10 ώρες ημερησίως κατανεμημένες το πρωί, το απόγευμα και τη νύχτα.

1.2 Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των ακουστικών δεδομένων

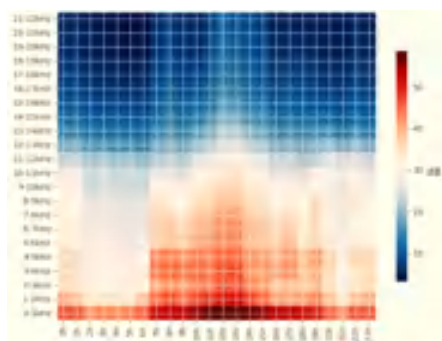
Στο Λιμνίο του Ομαλού, το οποίο περιλαμβάνεται ως οικότοπος προτεραιότητας στο Παράρτημα της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ με κωδικό *3170 ως μεσογειακό εποχικό τέλμα, όπως επίσης και σε άλλες εθνικές διατάξεις για την προστασία του, πραγματοποιούνται καταγραφές του ηχοτοπίου από το Σεπτέμβριο του 2022 έως σήμερα. Το μήνα Σεπτέμβριο του 2022 πραγματοποιήθηκαν καταγραφές διάρκειας 210 ωρών συνεχόμενα όλο το εικοσιτετράωρο. Το ηχοτοπίο χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμό ανθρωποφωνίας, δηλ. κυρίως του ακούσματος των κουδούνων των αιγοπροβάτων, των διερχόμενων αυτοκινήτων, των διερχόμενων αεροπλάνων, ή άλλων πιο σποραδικών ήχων όπως κάποιος πυροβολισμός, της βιοφωνίας (κυρίως των σμηνών κοινών Φανέτων (*Linaria cannabina*), Σπίνου¹ (*Fringilla coelebs*) Σιρλοτσιχλονου² (*Emberiza cirulus*) και φωνών των αιγοπροβάτων, κοκόρων, των σκύλων της περιοχής και κάποιων εντόμων αλλά και ανθρώπινων φωνών, και της γεωφωνίας κυρίως του ανέμου και του ήχου των φύλλων του δέντρου που τοποθετήθηκε το καταγραφικό. Η μέση τιμή της στάθμης ηχητικής πίεσης (dB) σε εύρος συχνοτήτων ανά 1000 Hz και ανά ώρα ημέρας για όλο το διάστημα ηχογράφησης, μας δείχνει μία αυξημένη κατανομή της ηχητικής ενέργειας στα 0-1 kHz όπου επικρατεί η ανθρωποφωνία και γεωφωνία, κατά πλειονότητα ο ήχος των κουδούνων των αιγοπροβάτων του οποίου οι συχνότητες συνεχίζουν σε μικρότερες εντάσεις και πάνω από αυτές της βιοφωνίας (Εικόνα 1.2.1, Εικόνα 1.2.2). Από τις 6:30 έως 13:00 αποτυπώνεται μία επιμέρους συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας (παράλληλα πάντα με το χαμηλότερο εύρος 0-1 kHz της γεωφωνίας και κουδούνων αιγοπροβάτων τα οποία ακούγονται σε πιο ψηλές συχνότητες) στις συχνότητες 2-10 kHz λόγω της βιοφωνίας των πτηνών αλλά και των αιγοπροβάτων. Σχετικά με τους επιλεγμένους ακουστικούς δείκτες, μας φανερώνουν τις ακόλουθες πληροφορίες για τα ηχητικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ηχοτοπίου:

Η φασματική εντροπία Hf μειώνεται στις 14:00 όπου συγκεντρώνεται το εύρος συχνοτήτων της ηχητικής ενέργειας στα 0-1 kHz, δηλ. της γεωφωνίας και ανθρωποφωνίας. Αυτό επιβεβαιώνεται με τον δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς του ηχοτοπίου NDSI, ο οποίος έχει αυτή την ώρα επίσης τη χαμηλότερη τιμή του (~0,5) δείχνοντας ότι η αναλογία βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία είναι αρνητική. Ο δείκτης ακουστικής ποικιλότητας ADI επίσης έχει τη χαμηλότερη τιμή στις 14:00 που σημαίνει ότι δεν υπάρχει υψηλή ποικιλομορφία ήχων σε διαφορετικά φάσματα συχνοτήτων με εντάσεις άνω των 50db και κυριαρχούν οι ήχοι στο τμήμα του φάσματος 0-1 kHz. Η υψηλότερη τιμή του δείκτη Hf, ταυτόχρονα με τον ADI, είναι στις 19:00 φανερώνοντας ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων των ήχων που ακούγονται (ή και ελάττωση της συγκέντρωσης των συχνοτήτων στα 0-1kHz) με την παράλληλη αύξηση της απογευματινής βιοφωνίας. Ο δείκτης βιοφωνίας BI μας φανερώνει μία αύξηση των συχνοτήτων 2-10kHz από τις 6:00 έως τις 8:00, όπως και μία μικρότερη αύξηση στις 19:00, ενώ οι χαμηλότερες τιμές του είναι στις 5:00 και στις 21:00 με την ακουστική ποικιλότητα ADI να είναι επίσης χαμηλή. Ο δείκτης ακουστικής ομοιότητας AEI, ο οποίος έχει υψηλές τιμές για τμήματα των

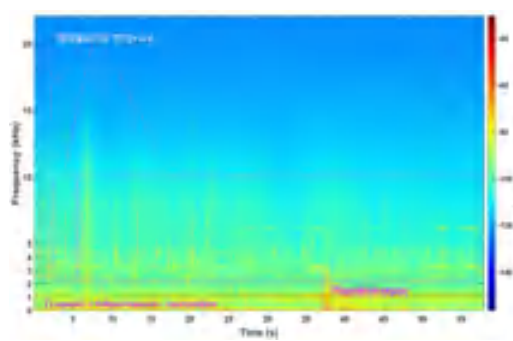
¹ Αρχείο SMA05762_20220922_071902.wav

² Αρχείο SMA05762_20220923_093002.wav οι ταυτοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω της ηχητικής βιβλιοθήκης του Πανεπιστημίου Cornell

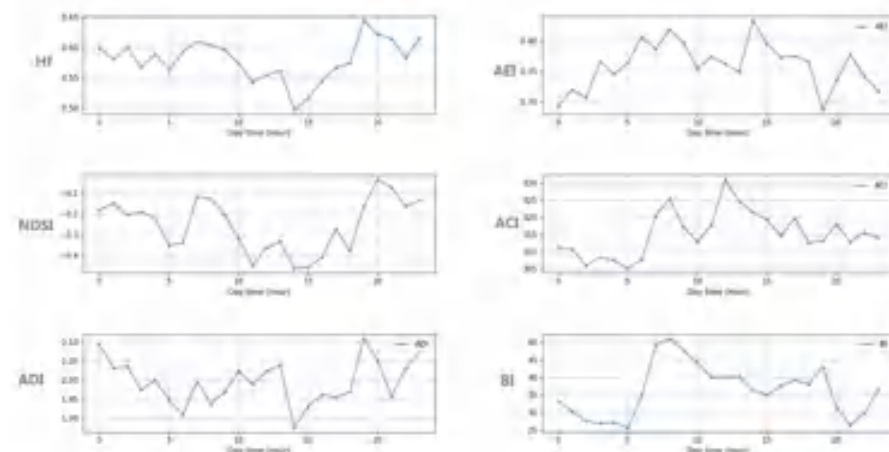
ηχογραφήσεων που χαρακτηρίζονται από περιορισμένων συχνοτήτων ηχητικά σήματα, εμφανίζει την υψηλότερη τιμή του (αντιστρόφως της ηχητικής ποικιλοπληθούς) στις 14:00 με το γράφημά του να είναι αντίστροφο του δείκτη ADI. Τέλος ο δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας ACI εμφανίζει δύο κορυφές στις 8:00 και 12:00 δείχνοντας ηχητικά γεγονότα μεμονωμένων διαφορετικών ήχων τα οποία οφείλονται σε κουδούνια πολύ κοντά στο μικρόφωνο, κάποιο διερχόμενο αυτοκίνητο, κάποιο πτηνό κοντά στο μικρόφωνο κ.α. (Εικόνα 1.2.3).



Εικόνα 1.2.1 Η στάθμη ηχητικής πίεσης (dB) ανά εύρος συχνοτήτων και ώρα ημέρας στο Λιμνίο του Ομαλού.



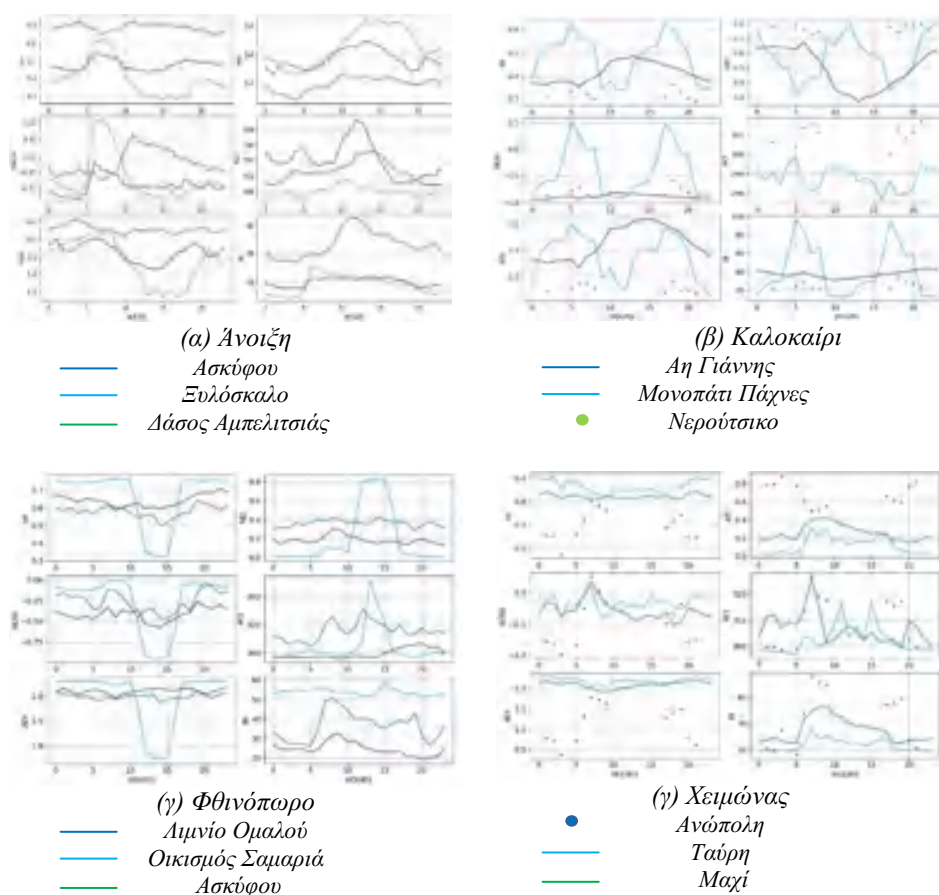
Εικόνα 1.2.2 Ένα χαρακτηριστικό φασματογράφημα με τις κύριες ηχητικές πηγές της περιοχής μελέτης σε χρονικό διάστημα ενός λεπτού³ στις 7 το πρωί, στο Λιμνίο του Ομαλού, όπου διακρίνονται τα κουδούνια των αγοπροβάτων, τα κελαϊδίσματα των πτηνών και η γεωφωνία και ανθρωποφωνία – ένας πυροβολισμός στο χαμηλότερο τμήμα του γραφήματος.



Εικόνα 1.2.3. Μοτίβα της μέσης ωριαίας τιμής των επιλεγμένων ακουστικών δεικτών, για το ηχοτοπίο του Λιμνίου του Ομαλού το Σεπτέμβριο. Οι τιμές υπολογίστηκαν για κάθε καταγραφή ενός λεπτού, για 210.18 ώρες από συνολικά 12611 ηχητικά αρχεία το μήνα Σεπτέμβριο του 2022. Το σχετικό σφάλμα για όλους τους δείκτες είναι μικρότερο του 10%.

Αντίστοιχα για τα υπόλοιπα ηχοτοπία τα μοτίβα των επιλεγμένων ακουστικών δεικτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.2.4 για κάθε εποχή.

³Αρχείο SMA05762_20220922_071902.wav

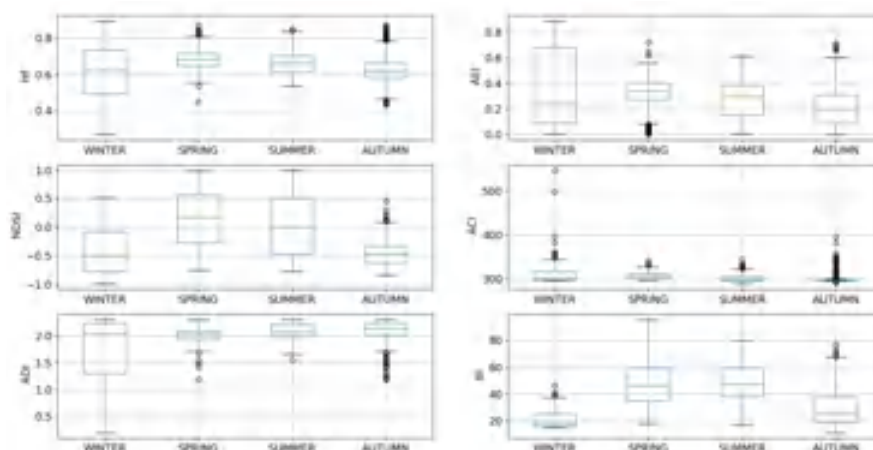


Εικόνα 1.2.4. Μοτίβα της μέσης ωριαίας τιμής των επιλεγμένων ακουστικών δεικτών, για τα μελετώμενα ηχοτοπία σε όλες τις εποχές.

1.3 Η διαχρονική ηχητική παρατήρηση

Για το ηχοτοπίο στη θέση Γρελέσκα πραγματοποιούνται ηχητικές καταγραφές από το Φλεβάρη του 2022 έως σήμερα. Οι ηχογραφήσεις καλύπτουν όλες τις εποχιακές μεταβολές όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3. Ο δείκτης της φασματικής εντροπίας H_f παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος τον χειμώνα και το μικρότερο την άνοιξη, ενώ το καλοκαίρι είναι ελαφρώς αυξημένο από το φθινόπωρο. Και στις τέσσερις εποχές διαφαίνεται μία συμμετρική κατανομή, ωστόσο το φθινόπωρο παρουσιάζει πολλές ακραίες τιμές οι οποίες αποδίδονται στη γεωφωνία των χαμηλότερων συχνοτήτων. Ως προς το δείκτη βιοφωνίας BI παρουσιάζει το μεγαλύτερο εύρος την άνοιξη αλλά και το καλοκαίρι με τη διαφορά ότι το καλοκαίρι το μήκος της μέγιστης απόληξης είναι μικρότερο. Η κατανομή τους φαίνεται να πλησιάζει τη συμμετρική. Το χειμώνα φαίνεται να υπάρχει πολύ μικρότερο εύρος συχνοτήτων βιοφωνίας με ορισμένες ακραίες τιμές και μη συμμετρική κατανομή. Ο δείκτης $NDSI$ που μας φανερώνει την αναλογία βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία παίρνει μεγαλύτερες τιμές άνω του 0 την άνοιξη φανερώνοντας μία μικρή επικράτηση της βιοφωνίας ενώ το καλοκαίρι η διάμεσος είναι στο 0 με σχεδόν συμμετρικές απολήξεις, δηλ. ταυτόχρονη παρουσία βιοφωνίας και ανθρωποφωνίας το οποίο θα μπορούσε να αποδοθεί και στο άκουσμα των κουδούνων των αιγοπροβάτων. Το φθινόπωρο παρουσιάζονται και στο δείκτη $NDSI$ πολλές ακραίες τιμές. Ο δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας ACI , δηλαδή οι

απότομες αλλαγές στις συχνότητες που ακούγονται από κάποιο ηχητικό γεγονός παρουσιάζει μία πολύ στενή κατανομή γύρω από την ενδιάμεσο, με πολλές ακραίες τιμές ιδιαίτερα το φθινόπωρο, και ασυμμετρία. Τέλος ο δείκτης ακουστικής ποικιλότητας για ήχους άνω των 50 dB έχει σε όλες τις εποχές παρόμοιες άνω απολήξεις με μεγάλη διαφοροποίηση στη διασπορά των τιμών κάτω από τη διάμεσο κατά το χειμώνα.



Εικόνα 1.3. Θηκόγραμμα με την περιοχή του 50% των τιμών των ακουστικών δεικτών, την ελάχιστη και μέγιστη απόληξη και τις ακραίες τιμές τους. Το δείγμα έχει παρθεί για διάστημα ηχογραφήσεων από 25/2/2022 έως 11/12/2022.

1.4 Τα ακουστικά δεδομένα σε συνδυασμό με περιβαλλοντικές παραμέτρους

Τα ηχητικά καταγραφικά που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα, διαθέτουν θερμομέτρο και αποθηκεύουν για κάθε λεπτό την θερμοκρασία εξάγοντας τις τιμές σε αρχείο χρονοσειράς παράλληλα με το αρχείο ηχογράφησης. Από τη συσχέτιση των τιμών θερμοκρασίας με τους επιλεγμένους ακουστικούς δείκτες στην τοποθεσία Γρελέσκα, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει συσχέτιση κατά το καλοκαίρι του 2022, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 1.4. Μάλιστα η συσχέτιση αυτή επιβεβαιώθηκε και με δεδομένα κατά το ίδιο χρονικό διάστημα το καλοκαίρι του 2023 ειδικά προς το δείκτη NDSI της αναλογίας βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία όπου παρουσιάζεται και στα δύο έτη σταθερή συσχέτιση ($P=0,7$) αλλά και η φασματική εντροπία Hf παρουσιάζει θετική συσχέτιση. Δημιουργείται ένα δυναμικό έρευνας προς τη σύνδεση της εποχής του χρόνου, της θερμοκρασίας και των ηχητικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος. [10]

Πίνακας 1.4. Συντελεστές συσχέτισης Pearson των μέσων ωριαίων τιμών θερμοκρασίας και ακουστικών δεικτών. Τα ακουστικά δεδομένα αφορούν το διάστημα 27/7 έως 3/8/2022 και 26/7 έως 10/8/2023.

Ακουστικός Δείκτης	Συντελεστής Pearson	
	Καλοκαίρι 2022	Καλοκαίρι 2023
Hf	0,608772	0,491038
ACI	-0,701743	-0,175843
NDSI	0,736327	0,701796
BI	0,251835	0,445254
ADI	0,491936	0,219688

AEI	-0,561609	-0,280737

2. Συμπεράσματα

Από το συνδυασμό φυσικής παρατήρησης και υπολογιστικών αναλύσεων με την ηχητική ανάλυση σε ομάδες συχνотήτων, την ανάλυση φασματογραφημάτων και τη χρήση επιλεγμένων ηχητικών δεικτών, διαπιστώθηκαν τα ηχητικά μοτίβα διαφορετικών ηχοτοπίων στα Λευκά Όρη. Παρουσιάστηκε το ηχοτοπίο του Λιμνίου του Ομαλού για μία εποχή και η ετήσια διαφοροποίηση των ηχητικών δεικτών στη Γρελίσκα ανά εποχή. Τα αποτελέσματά μας συμφωνούν με τη διαφορετική επικάλυψη γεωφωνίας, ανθρωποφωνίας και βιοφωνίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, ανά τοποθεσία και ανά εποχή. Επίσης συσχετίστηκε η μέση ωριαία θερμοκρασία με τους επιλεγμένους ηχητικούς δείκτες για το καλοκαίρι, όπου διαφαίνεται μία θετική συσχέτιση ($P=0,7$) της αναλογίας βιοφωνίας προς ανθρωποφωνία (NDSI) όπως επίσης και της φασματικής εντροπίας Hf.

Στόχος είναι η συλλογή ηχογραφήσεων ως ένα νέο εργαλείο περιβαλλοντικής παρακολούθησης το οποίο θα μπορεί να αναγνωρίσει αποτελεσματικά τις μεταβολές ή μη των οικοσυστημάτων σε διάφορου τύπου διαταραχές όπως είναι η αλλαγή θερμοκρασίας, οι ασθένειες, η υπερβόσκηση και η ανθρώπινη δραστηριότητα. ([11], άρθρο 6 της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ).

3. Αναφορές

- [1] D. Stowell and J. Sueur, "Ecoacoustics: acoustic sensing for biodiversity monitoring at scale," *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, vol. 6, no. 3. Wiley-Blackwell, pp. 217–219, 01-Sep-2020.
- [2] A. Jeliakov, Y. Bas, C. Kerbiriou, J. F. Julien, C. Penone, and I. Le Viol, "Large-scale semi-automated acoustic monitoring allows to detect temporal decline of bush-crickets," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 6, pp. 208–218, Apr. 2016.
- [3] L. S. M. Sugai, T. S. F. Silva, J. W. Ribeiro, and D. Llusia, "Terrestrial Passive Acoustic Monitoring: Review and Perspectives," *Bioscience*, vol. 69, no. 1, pp. 5–11, 2019.
- [4] W. H. Lee and S. A. Abdullah, "Framework to develop a consolidated index model to evaluate the conservation effectiveness of protected areas," *Ecological Indicators*, vol. 102. Elsevier B.V., pp. 131–144, 01-Jul-2019.
- [5] S. H. Gage, B. M. Napoletano, and M. C. Cooper, "Assessment of ecosystem biodiversity by acoustic diversity indices," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, no. 5, pp. 2430–2430, May 2001.
- [6] B. C. Pijanowski *et al.*, "Soundscape ecology: The science of sound in the landscape," *Bioscience*, vol. 61, no. 3, pp. 203–216, Mar. 2011.
- [7] J. Sueur, A. Farina, A. Gasc, N. Pieretti, and S. Pavoine, "Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation," *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 100, no. 4, pp. 772–781, 2014.
- [8] T. Bradfer-Lawrence, N. Gardner, L. Bunnefeld, N. Bunnefeld, S. G. Willis, and D. H. Dent, "Guidelines for the use of acoustic indices in environmental research," *Methods Ecol. Evol.*, vol. 10, no. 10, pp. 1796–1807, Oct. 2019.
- [9] Juan Sebastián Ulloa, Sylvain Haupt, J. F. Latorre, T. Aubin, and Jérôme Sueur, "scikit-maad: An open-source and modular toolbox for quantitative soundscape analysis in Python," *Methods Ecol. Evol.*, 2021.
- [10] J. Sueur, B. Krause, and A. Farina, "Climate Change Is Breaking Earth's Beat," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 34, no. 11, pp. 971–973, 2019.
- [11] C. Sánchez-Giraldo, C. Correa Ayram, and J. M. Daza, "Environmental sound as a mirror of landscape ecological integrity in monitoring programs," *Perspect. Ecol. Conserv.*, vol. 19, no. 3, pp. 319–328, Jul. 2021.



Τα ηχοτοπία της Θαλάσσιας Προστατευόμενης Περιοχής της Γυάρου ως μέσο ερμηνείας περιβάλλοντος και ευαισθητοποίησης

Χαρίκλεια Μινώτου^{1,*}, Θεοφάνης Μαραγκός² Αριστοτέλης Μαρτίνης¹, Αριστοτέλης Φίλιππος Σκιαδαρέσης¹ Σπύρος Κοτομάτας³
¹Ιόνιο Πανεπιστήμιο -Τμήμα Περιβάλλοντος
²Ιόνιο Πανεπιστήμιο - Τμήμα Μουσικών Σπουδών
³WWF Ελλάς, Υπεύθυνος δράσεων Γυάρου
^{*}charmini@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της έρευνας ήταν η ρεαλιστική αποτύπωση και χαρτογράφηση της Θαλάσσιας Προστατευόμενης Περιοχής (ΘΠΠ) της Γυάρου μέσω διαδρομών καθώς και η δημιουργία υλικού επικοινωνίας, προβολής και ξενάγησης με ηχοτοπία και αφηγήματα, στη προσέγγιση «Φύση για όλους» σε τρεις γλώσσες. Το υλικό αναρτήθηκε στην ιστοσελίδα "Gyaros-Story". Τα ηχοτοπία καταγράφηκαν με ειδικό εξοπλισμό για την εξασφάλιση της ηχητικής ποιότητας και πιστότητας και οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές εποχές, χειμώνα και άνοιξη. Για την καταγραφή και αποτύπωση οι επιτόπιες επισκέψεις συνετέλεσαν ώστε να δημιουργηθούν αρχεία οπτικοακουστικού υλικού, ηχοτοπίων καθώς και ηχητική βιβλιοθήκη.

The soundscapes of the Marine Protected Area of Gyaros as a means of environmental interpretation and awareness.

ABSTRACT

The purpose of the research was the realistic depiction and mapping of the Gyaros Marine Protected Area (MPA) through routes, as well as the creation of communication, promotion, and tour material featuring soundscapes and narratives, following the "Nature for All" approach in three languages. The material was posted on the website "Gyaros-Story." The soundscapes were recorded with specialized equipment to ensure sound quality and fidelity, and the recordings were made during two different seasons, winter and spring. On-site visits contributed to the creation of audiovisual material, soundscapes, and a sound library.

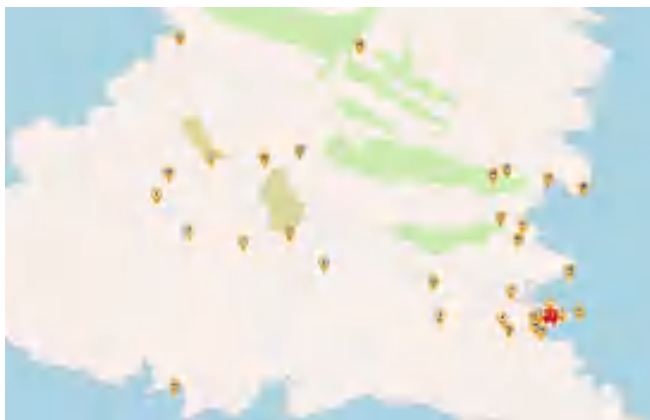
1. Εισαγωγή

Η προστασία και διαχείριση των Προστατευόμενων Περιοχών (ΠΠ) αποτελεί προτεραιότητα στο πλαίσιο των στόχων της Βιώσιμης Ανάπτυξης. Στην Ελλάδα οι

ΠΠ καταλαμβάνουν περίπου το 30% της έκτασης της και μπορεί να είναι χερσαίες ή θαλάσσιες. Η Θαλάσσια Προστατευόμενη Περιοχή (ΘΠΠ) της Γυάρου αποτελεί την περίπτωση μελέτης στην παρούσα έρευνα/έργο και η οπτικοακουστική καταγραφή και αποτύπωση των τοπίων και ηχοτοπίων της περιοχής αποτελούν τα κύρια μέσα για τη δυνατότητα της εικονικής επίσκεψης στο νησί.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο προγράμματος Leader και ειδικότερα του έργου «Ολοκληρωμένο σύστημα περιβαλλοντικής ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης και δράσεις αναβάθμισης για την προστατευόμενη περιοχή της νήσου Γυάρου». Υπεύθυνοι για την υλοποίηση του έργου ήταν το WWF Ελλάς και η ΟΙΚΟΜ. Η ερευνητική ομάδα είχε αναλάβει την υλοποίηση του Υποέργου 2: Εικονική ξενάγηση – Δημιουργία εμπειρίας in situ για άτομα με αναπηρίες. Το υλικό αναρτήθηκε σε ιστοσελίδα που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του έργου, “Gyaros-Story” και αποτέλεσε δύο διακριτές ενότητες της, το «Εικονικά» και το «Βιβλιοθήκη» [1].

Για την καταγραφή και αποτύπωση πραγματοποιήθηκαν τέσσερις επιτόπιες επισκέψεις, οι οποίες συνετέλεσαν ώστε να δημιουργηθούν αρχεία οπτικοακουστικού υλικού, ηχοτοπίων καθώς και η ηχητική βιβλιοθήκη του έργου. Η χαρτογράφηση της περιοχής, με κριτήρια που συνδύαζαν την ιστορική/πολιτιστική ταυτότητα και την περιβαλλοντική αξία (βιοποικιλότητα, τοπίο, οικότοποι, είδη και τα ενδιαίτητά τους), επαναπροσδιόρισαν τα τοπία του νησιού προσδίδοντας επιπλέον και ηχητική ταυτότητα. Για τη χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκαν εφαρμογές GIS και δημιουργήθηκαν δυναμικοί χάρτες με δυνατότητα επιλογής μεμονωμένων σημείων ή του συνόλου των διαδρομών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1 Τα 31 σημεία ενδιαφέροντος στη Γυάρο

Τα ηχοτοπία καταγράφηκαν με ειδικό εξοπλισμό για την εξασφάλιση της ηχητικής ποιότητας και πιστότητας και οι καταγραφές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές εποχές, χειμώνα και άνοιξη. Οι ηχητικές καταγραφές στο πλαίσιο της έρευνας αποτυπώνουν τόσο το εξωτερικό περιβάλλον (φυσικό), όσο και το εσωτερικό εντός των υφιστάμενων κτιρίων (φυλακές, ερείπια, παλαιοί καταυλισμοί, φυλάκια). Στις καταγραφές συμπεριλαμβάνονται και αρχεία που συνδέονται με τη

βιοποικιλότητα της Γυάρου. Το οπτικοακουστικό υλικό, οι φωτογραφίες και τα βίντεο, συνδυάστηκε με τα ηχητικά αρχεία και δημιούργησαν, ως σύνολο, ένα δίκτυο τριάντα ένα σημείων που μπορούν αυτόνομα ή συνδυαστικά κατ' επιλογή του επισκέπτη, να τον μεταφέρουν «εικονικά» και βιωματικά στην περιοχή.

Ακολουθώντας τις αρχές της ερμηνείας περιβάλλοντος για γενικές και ειδικές ομάδες, τα αφηγήματα που δημιουργήθηκαν για κάθε σημείο διευκολύνουν τον επισκέπτη να μεταφερθεί χωροχρονικά στη Γυάρο και ν' αντιληφθεί τόσο τη μοναδική ταυτότητα όσο και την ιστορική μνήμη του τόπου.

2. Περιοχή μελέτης και σκοπός

Σκοπός της έρευνας ήταν η ρεαλιστική αποτύπωση και χαρτογράφηση της ΘΠΠ της Γυάρου μέσω διαδρομών, καθώς και η δημιουργία υλικού επικοινωνίας, προβολής και ξενάγησης με ηχοτοπία και αφηγήματα στη προσέγγιση «Φύση για όλους», σε τρεις γλώσσες (ελληνικά, αγγλικά, γαλλικά).

Η Γυάρος έχει χαρακτηριστεί ως ιστορικός τόπος και τα κτίρια ως ιστορικά διατηρητέα μνημεία (ΦΕΚ Β1680/2001) και έχει αποτελέσει τόπο φυλάκης και εξορίας, αποτελώντας σημείο αναφοράς της νεότερης ιστορίας. Παράλληλα, φιλοξενεί μία από τις σημαντικότερες αποικίες της μεσογειακής φώκιας (*Monachus monachus*) καθώς και το 1/3 του παγκόσμιου πληθυσμού των μύχων (*Puffinus yelkouan*), που φωλιάζει και γεννά στη βραχώδη ακτογραμμή της. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η χερσαία και θαλάσσια βιοποικιλότητα της. Για τους προαναφερόμενους λόγους, το 2015 χαρακτηρίστηκε ως Θαλάσσιο Καταφύγιο Άγριας Ζωής και το 2019 με Υπουργική Απόφαση του Υπουργείου Περιβάλλοντος οριοθετήθηκαν και θεσμοθετήθηκαν ζώνες και μέτρα προστασίας [2]. Η Γυάρος αποτελεί την πρώτη ΘΠΠ στις Κυκλάδες.

2.1 Ερμηνεία Περιβάλλοντος - Αφηγήματα

Η ερμηνεία περιβάλλοντος συνδέεται με την αξιόπιστη, ρεαλιστική και αντικειμενική καταγραφή και αποτύπωση μιας περιοχής. Στην περίπτωση μελέτης, τη Γυάρο, η ερμηνεία περιβάλλοντος είχε διττή ταυτότητα, α. ιστορικού και πολιτισμικού χαρακτήρα και β. περιβαλλοντικού. Η ερμηνεία της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς, όταν απευθύνεται σε γενικές και ειδικές ομάδες, εμπεριέχει αναφορές, τεκμήρια, οπτικοακουστικό υλικό, αφηγήματα και αποτυπώνει χωροχρονικά την περιοχή. Ως τόπος με ιστορική συλλογική μνήμη, η Γυάρος προτάσσει στην εικονική εμπειρία/επίσκεψη τους ήχους του παρελθόντος τα οποία συνδέονται με τα «σιωπηρά» ηχοτοπία της στο παρόν. Όπως αναφέρει ο Hogg [3], σημαντικό μέρος ενός ηχοτοπίου είναι πέρα από τους πραγματικούς ήχους οι οποίοι μπορούν να προσληφθούν αισθητηριακά και οι φανταστικοί, όπως οι ανθρώπινες φωνές αλλά και οι ήχοι χαμένων δραστηριοτήτων. Στην παρούσα έρευνα/έργο η ερμηνεία περιβάλλοντος στηρίχτηκε στη δημιουργία διαδρομών με στάσεις στα σημαντικότερα σημεία ενδιαφέροντος του νησιού με ιστορικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό χαρακτήρα. Τα σημεία/τοπόσημα που επιλέχθηκαν ήταν τριάντα ένα και κάλυπταν όλη την έκταση του νησιού. Σε κάθε σημείο

δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με οπτικοακουστικό υλικό (φωτογραφίες και βίντεο) και με καταγραφές των ηχοτοπίων.

Παράλληλα, δημιουργήθηκαν αφηγήματα που περιέγραφαν την ταυτότητα του κάθε σημείου. Η αφήγηση είναι η αλληλεπιδραστική τέχνη της χρήσης λέξεων και δράσεων με σκοπό την αναπαράσταση των στοιχείων και των εικόνων και χρησιμοποιείται ώστε ο άνθρωπος να έρθει κοντά με το περιβάλλον και να το κατανοήσει. Σύμφωνα με τον Casey [4], ο «κενός» χώρος μιλά και έτσι γεμίζει με περιεχόμενο και μετατρέπεται σε ζωντανό τόπο. Στις αφηγήσεις που δημιουργήθηκαν, συμπεριλαμβάνονταν στοιχεία που αναδείκνυαν τις παραλλαγές του περιβάλλοντος, αφού η ακρόαση συντελείται στο σημείο συνάντησης του αντικειμενικού με το υποκειμενικό. Με αυτό το τρόπο συνδέεται το ηχοτοπίο με τις εμπειρίες [5]. Η αφηγηματική δύναμη του χωρικού κενού σύμφωνα με τους Mariani & Baron [6] εστιάζει στο ότι οι κενοί χώροι αφηγούνται τις ιστορίες του παρελθόντος τους, καθώς και ότι ακόμα και όταν ένα τοπίο/ηχοτοπίο έχει αλλάξει, μπορεί να επαναφέρει εικόνες και βιωμένες εμπειρίες του παρελθόντος. Στην ιστοσελίδα «Gyaros-Story», ο επισκέπτης έχει την δυνατότητα να δει τη Γυάρο, να ακούσει τα ηχοτοπία της, να περιηγηθεί με φωτογραφίες ή ηχοτοπία μέσα από την βιβλιοθήκη και να ξεναγηθεί ηχητικά σε τρεις γλώσσες, επιλέγοντας ο ίδιος τα σημεία ενδιαφέροντός του. Σε ότι αφορά στο παραχθέν υλικό, η δυνατότητα επιλογής σημείων, κατηγορίας/θεματικής αλλά και του μέσου πρόσληψης της πληροφορίας (οπτικό, ηχητικό, αφηγηματικό) προσδίδει ευελιξία και προσβασιμότητα σε γενικές και ειδικές ομάδες.

2.2 Οπτικοακουστικό υλικό

Το οπτικοακουστικό υλικό που συγκεντρώθηκε στο πλαίσιο της έρευνας/έργου κατά τις επισκέψεις πεδίου στη Γυάρο, αποτελείται από φωτογραφικό υλικό, βιντεοσκοπήσεις, λήψεις 360°, καθώς και ηχογραφήσεις των ηχοτοπίων. Για κάθε σημείο από τα τριάντα ένα τοπία των διαδρομών, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων, η οποία πρόβαλλε ως τελικό αποτέλεσμα, μέσα από την ιστοσελίδα “Gyaros-Story”, την οπτική και ηχητική ταυτότητά του. Τα διαφορετικά αρχεία μπορεί να επιλεγθούν ως μεμονωμένα αρχεία ή και συνδυαστικά. Η αποτύπωση των σημείων ακολούθησε δύο παράλληλες προσεγγίσεις, α. την κυκλική αποτύπωση, ώστε ο επισκέπτης της ιστοσελίδας μέσω των φωτογραφιών και των βίντεο να μεταφέρεται ρεαλιστικά στην περιοχή και να ξεναγείται σε αυτή όπως θα το βίωνε και ο ίδιος, β. της αποτύπωσης, τόσο του τοπίου όσο και λεπτομερειών σε κοντινές λήψεις που είχαν ιστορικό ή περιβαλλοντικό ενδιαφέρον.

Επιλεγμένο οπτικοακουστικό υλικό, φωτογραφικό και ηχητικό, αποτελεί μέρος μιας διακριτής ενότητας της ιστοσελίδας «Βιβλιοθήκη», όπου φιλοξενούνται φωτογραφικές απεικονίσεις σε θεματικές, οι οποίες απεικονίζουν το τοπίο, τεκμήρια, άτυπες και τυπικές ιστορικές μνήμες, τα κτίρια, προσωπικά αντικείμενα, τοπία (όπως το νεκροταφείο κρατουμένων), ερείπια παλαιών οικισμών, τη χλωρίδα, την πανίδα αλλά και γενικότερα τη βιοποικιλότητα και τους οικοτόπους της Γυάρου. Το φωτογραφικό υλικό και τα βίντεο αποτυπώνουν τόσο τη χερσαία όσο και τη θαλάσσια περιοχή. Στη βιβλιοθήκη υπάρχει επιπλέον και ειδική κατηγορία «Ηχοτοπία» όπου είναι καταχωρημένα τα ηχοτοπία που ηχογραφήθηκαν στη Γυάρο.

3. Μεθοδολογία

3.1 Επισκέψεις πεδίου

Στο πλαίσιο της έρευνας/έργου πραγματοποιήθηκαν τέσσερις επισκέψεις πεδίου αφού πρώτα είχε εκδοθεί ειδική άδεια από την αρμόδια αρχή, τη Μονάδα Διαχείρισης, της ΠΠ. Η Γυάρος αποτελεί ένα δυσπρόσιτο προορισμό αφού δεν έχει κάποια μόνιμη ακτοπολική σύνδεση με τα γειτονικά νησιά. Παράλληλα, οι καιρικές συνθήκες κατά τους χειμερινούς μήνες είναι ιδιαίτερα δυσμενείς. Σκοπός των επισκέψεων ήταν αφενός να εξοικειωθεί η ομάδα με την ευρύτερη περιοχή, να ξεναγηθεί και αναγνωρίσει/εντοπίσει τα σημεία ενδιαφέροντος και αφετέρου να πραγματοποιήσει τις οπτικοακουστικές καταγραφές (φωτογραφίες, βίντεο, ηχοτοπία, ηχητικά αρχεία).

Το νησί της Γυάρου, στη χερσαία περιοχή του, είναι δύσβατο σε μεγάλο μέρος της έκτασης του, και στην ολοκλήρωση του σκοπού των επισκέψεων συνέβαλλε η παρουσία έμπειρων ξεναγών που γνώριζαν την περιοχή. Με την ολοκλήρωση της πρώτης επίσκεψης στο νησί και τη λήψη δεδομένων με GPS ακολούθησε η χαρτογράφηση με ειδικό λογισμικό GIS. Στις δύο επόμενες επισκέψεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν λήψεις και καταγραφές σε όλα τα επιλεχθέντα σημεία. Η επιλογή δύο διαφορετικών εποχών (άνοιξη και χειμώνα) έγινε στο πλαίσιο ανάδειξης της διαφορετικότητας του τοπίου και των ηχοτοπίων της περιοχής. Η τελευταία επίσκεψη πραγματοποιήθηκε μετά την ολοκλήρωση της παραγωγής όλου του υλικού και της ανάρτησης του στη σελίδα “Gyaros-Story” ώστε να αξιολογηθεί τόσο το υλικό όσο και η ευκολία χρήσης της εφαρμογής που είχε αναπτυχθεί, στο πλαίσιο του Leader, από τον επισκέπτη.

3.2 Ηχογραφήσεις

Οι ηχογραφήσεις στη Γυάρο πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εποχές, άνοιξη και χειμώνα, συγκεκριμένα στις 23-24.05.2022 και στις 24-25.02.23 αντίστοιχα. Στα περισσότερα επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν δύο ξεχωριστά συστήματα ηχοληψίας συμπληρωματικά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε μία στερεοφωνική τεχνική ηχογράφησης με τη σχεδόν συμπτωτική τεχνική O.R.T.F. (Office de Radiodiffusion-Television Francaise) και ένα σύστημα τρισδιάστατης ηχητικής αποτύπωσης με τη τεχνική ambisonics. Επίσης, για τις ανάγκες πιο στοχευμένων και ιδιαίτερων ηχογραφήσεων χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα μικρόφωνα όπως γεόφωνο (π.χ. μέσα στο κτήριο των φυλακών, στην αίθουσα της λογοκρισίας, στην απομόνωση κ.λπ.) και υδρόφωνο (σε πηγάδι και στη θάλασσα). Βασικός στόχος της καταγραφής ήταν να ληφθούν ηχητικά δείγματα υψηλής ποιότητας και πιστότητας από τα σημεία ενδιαφέροντος για τη χρήση τους στην ιστοσελίδα. Συγκεκριμένα, να ενσωματωθούν στην ενότητα «Εικονική Ξενάγηση», είτε ως ηχοτοπία περιορισμένης χρονικής διάρκειας, είτε συγχρονισμένα με τις κινηματογραφήσεις από τα σημεία ενδιαφέροντος, είτε τέλος, στην ενότητα της «Ηχητικής Βιβλιοθήκης» ως αυτούσια ηχοτοπία μεγάλης χρονικής διάρκειας.

Το χρονικό διάστημα της κάθε καταγραφής δεν ήταν σταθερό, κυμαίνονταν από 5 μέχρι 10 λεπτά και εξαρτιόταν από την ηχοποικλότητα του κάθε σημείου ενδιαφέροντος, την ιστορική σημαντικότητά του (π.χ. κορυφογραμμές, φυλάκιο,

παλαιοί καταυλισμοί κ.λπ.) καθώς και τη συνεισφορά του σημείου ενδιαφέροντος στο συνολικό αφήγημα. Οι καταγραφές των σημείων ενδιαφέροντος προσεγγίστηκαν «παθητικά», δηλαδή χωρίς την ηχογόνα παρέμβαση από την ομάδα καταγραφής, ώστε να μη διαταραχθεί το ηχοτόπιο. Σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος, για την πληρέστερη καταγραφή των ηχοτοπίων, η ομάδα παρέμενε ένα σημαντικό χρονικό διάστημα άηχη και ακίνητη πριν την καταγραφή για να επανέλθει το ηχοτόπιο στη πρότερη φυσική του κατάσταση [7].

Για τις ηχητικές καταγραφές των 33 σημείων της Γυάρου, ως κύριο σύστημα ηχοληψίας, επιλέχθηκε το Ambeo VR Mic της Sennheiser, που αποτελείται από τέσσερις διακριτές καρδιοειδείς κάψες KE 14 σε τετραεδρική διάταξη, ενσωματωμένες σε ένα ενιαίο συμπαγές σώμα, και χρησιμοποιεί τη μέθοδο Ambisonics (first-order) [8]. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα ηχογράφησης του ηχοτοπίου περιφερειακά-τρισδιάστατα (surround - 360°) με ένα ευέλικτο μικροφωνικό σύστημα καθώς και επιλογή του φορμά αναπαραγωγής κατά το στάδιο της επεξεργασίας (από μονοφωνικό, stereo, μέχρι 5.1 και binaural) [9]. Επιπλέον, σε μια έρευνα υποκειμενικής αξιολόγησης διαφορετικών μεθόδων ηχογράφησης ηχοτοπίων, η μέθοδος ambisonics επιλέχθηκε ως η πιο πιστή και ρεαλιστική ως προς την αποτύπωση του ηχητικού περιβάλλοντος [10].

Ως δευτερεύον σύστημα ηχοληψίας επιλέχθηκε η σχεδόν συμπτωτική (near coincident) στερεοφωνική τεχνική O.R.T.F. σε διάταξη 110° και απόσταση 17 εκατοστών μεταξύ των καψών των μικροφώνων, με καρδιοειδή πολικά διαγράμματα [11]. Η στερεοφωνική εικόνα που αποδίδει η συγκεκριμένη διάταξη είναι αρκετά ευρεία και ευχάριστη καθώς και παρέχει σωστή στερεοφωνική αποτύπωση. Ακόμα, επιτυγχάνει καλύτερο ολικό συμβιβασμό μεταξύ χώροτοποθέτησης και ακρίβειας ειδώλου. Τα μικρόφωνα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα Line Audio CM4.

Για την ηχογράφηση με τη μέθοδο ambisonics επιλέχθηκε ο τετρακάναλος καταγραφέας της Sound Devices: Mix Pre 6 που θεωρείται αξιόπιστος, με πολύ χαμηλό ενδογενή θόρυβο στους προενισχυτές, καθώς και ειδικά τροποποιημένα καλώδια ήχου με ειδικούς αποσυνδεκτές για λιγότερο θόρυβο κατά τη χρήση τους σε συνθήκες πεδίου. Για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας ήχου, τα ηχητικά αρχεία είχαν συχνότητα δειγματοληψίας 96 kHz και ανάλυση 24 bit. Για την ηχογράφηση με τη τεχνική O.R.T.F. επιλέχθηκε ο δικαναλικός καταγραφέας της Tascam DR-100.

Σε όλες τις καταγραφές κρίθηκε αναγκαία η χρήση ειδικού αντιανεμικού θώρακα για αποφυγή παραμόρφωσης στα διαφράγματα των μικροφώνων. Τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν σε ύψος περίπου 1.7 μέτρων για την αποφυγή ηχητικών ανακλάσεων που προέρχονταν από το έδαφος, αλλά και για την απόδοση μιας πιο ρεαλιστικής εικόνας, καθώς αυτή η τοποθέτηση βρίσκεται περίπου στο ύψος των αυτιών του μέσου ανθρώπου.

Για τις ανάγκες αυτής της έρευνας ήταν σημαντικό το σύστημα καταγραφής να αποδίδει ρεαλιστικά το ηχοτόπιο που κατέγραφε, δηλαδή να «συλλαμβάνει» τις ηχογόνες πηγές στην ίδια ένταση περίπου που γίνονται αντιληπτές από έναν άνθρωπο στο πεδίο (στη συγκεκριμένη περίπτωση την ομάδα καταγραφής και τον ηχολήπτη). Για το λόγο αυτό, πριν τις καταγραφές, προηγήθηκαν τεστ στο πεδίο για την εύρεση της κατάλληλης απολαβής στην ευαισθησία (gain) του καταγραφικού. Έπειτα, όλες οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν με την ίδια τιμή ευαισθησίας.

Η επεξεργασία που υπέστησαν οι ηχογραφήσεις ήταν ήπια, καθώς βασική προτεραιότητα ήταν η απόδοση της ρεαλιστικότητας του ηχοτοπίου. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε ισοστάθμιση για μείωση των χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter: 40 Hz, 24 dB/oct) διότι, όπως προέκυψε από τις ακροάσεις, το φάσμα κάτω από τα 40 Hz δεν περιείχε χρήσιμο και αξιοποιήσιμο ηχητικό υλικό. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα High Shelving φίλτρο (Hi-Shelf) στα 12 kHz με εξασθένιση περίπου 10 dB, για τη μείωση του ενδογενή θορύβου των προενισχυτών.



Εικόνα 3.2 Η διαδικασία ηχογράφησης σε διαφορετικά σημεία ενδιαφέροντος

3.3 Παραγωγή υλικού

Η παραγωγή υλικού πραγματοποιήθηκε σταδιακά μετά την ολοκλήρωση της χαρτογράφησης και περιλάμβανε, α. την επιλογή του υλικού, β. τη δημιουργία βάσης δεδομένων για κάθε σημείο, γ. τη σύνταξη αφηγημάτων στο πλαίσιο της ερμηνείας περιβάλλοντος της περιοχής, δ. την επεξεργασία των ηχητικών καταγραφών, ε. την επεξεργασία των βίντεο, στ. τη δημιουργία οπτικοακουστικού υλικού, ζ. τις ηχογραφήσεις των ηχητικών ξεναγήσεων, η. τη μετάφραση του συνολικού υλικού στα αγγλικά και στα γαλλικά, θ. την ανάρτηση του υλικού στην ιστοσελίδα του έργου και ι. την αξιολόγηση του υλικού και διορθωτικές ενέργειες.

4. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Η ερμηνεία και ανάδειξη περιβάλλοντος, στο πλαίσιο της προστασίας και διαχείρισης της φυσικής και πολιτισμικής κληρονομιάς, μπορεί να συμβάλλει στην εναλλακτική ανάπτυξη. Παράλληλα, η πιστή απεικόνιση μιας περιοχής με οπτικοακουστικό υλικό δίνει τη δυνατότητα εικονικής ξενάγησης και μετατρέπει τις περιοχές σε προσβάσιμους τόπους για όλους. Ως υλικό ευαισθητοποίησης, τα ηχοτοπία μπορούν να ενεργοποιήσουν τη φαντασία, τη μνήμη και να προσδώσουν μία ρεαλιστική εικόνα μιας περιοχής.

Ειδικότερα, για την περίπτωση μελέτης της παρούσας έρευνας, όπως αναφέρεται και στην ενότητα «Εικονικά» της ιστοσελίδας “Gyaros-Story”: «ο συνδυασμός της ιστορικής και πολιτισμικής κληρονομιάς της Γυάρου και της σημαντικής βιοποικιλότητας και περιβαλλοντικής της αξίας προσδίδουν μία διττή

ταυτότητα: ενός σημαντικού τόπου ιστορικής συλλογικής μνήμης και επιπρόσθετα μιας περιοχής που το φυσικό περιβάλλον με τα σημαντικά είδη και οικοτόπους χρήζει προστασίας και διαχείρισης».



Εικόνα 4.1 Η ομάδα πεδίου κατά τη διαδικασία καταγραφής

5. Αναφορές

- [1] WWF Greece Gyaros-Story. https://gyaros-story.gr/eikonika_1/ (2024)
- [2] X. Παπαδάς. “Συριανά Γράμματα”, *Συριανά Γράμματα*, περ.Β,τ. 2-3, pp 384-391 (2018)
- [3] B. Hogg. “Healing the Cut: Music, Landscape”. *Nature, Culture Contemporary Music Review*, Taylor & Francis (2015)
- [4] E. Casey. *The Fate of Place: A Philosophical History*. Berkeley, CA: University of California Press (1997)
- [5] S. Voegelin. *Listening to noise and silence. Towards a philosophy of sound art*. New York and London: Continuum (2010)
- [6] M. Mariani & P. Barron, *Terrain Vague: Interstices at the Edge of the Pale*, London & New York: Routledge,(2014)
- [7] Α. Λουφόπουλος, Μ. Εμμανουήλ, Θ. Μαραγκός, Δ. Κατερέλος. “Ηχοτοπία της Κεφαλονιάς: ψηφιακή καταγραφή και διεπιστημονική μελέτη κατά την εκπαιδευτική διαδικασία”. *Ακουστική 2012*. Ιόνιο Πανεπιστήμιο – ΕΛ.Ι.Ν.Α. Κέρκυρα, pp. 273-280 (2012)
- [8] M. A. Gerzon, “Multi-system Ambisonic Decoder” *Wireless World* **83**, pp 43-47 (1977)
- [9] M. Frank, F. Zotter, & A. Sontacchi. Producing 3D audio in Ambisonics. *Proceedings of the 57th AES International Conference*. Hollywood, CA. (2015)
- [10] C. Guastavino, B. F. G. Katz, J. Polack, D. Levitin, & D. Dubois. “Ecological validity of soundscape reproduction”. *Acta Acustica united with Acustica* **91(2)**, pp 333-341 (2004)
- [11] F. Rumsey & T. McCormick, *Sound and Recording*, Sixth Edition. Focal Press, pp 493-498 (2009)

Ανάλυση Μεικτού Ηχοτοπίου: Καστελλάκια, Ρέθυμνο

Ιουλία Πάναγιώτου
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό
Πανεπιστήμιο, Ευάγγελου Δασκαλάκη, Περιβόλια, Ρέθυμνο, Κρήτη
mta63@edu.hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάλυση ηχοτοπίου αποτελεί μια προσέγγιση στην ακουστική οικολογία, εστιάζοντας στην καταγραφή και ερμηνεία του ακουστικού περιβάλλοντος ενός τόπου. Χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες ποιοτικής και ποσοτικής καταγραφής όπως: ηχοπεριπάτους, ηχητικούς χάρτες, ηχητικά ημερολόγια, ηχογραφήσεις, ερωτηματολόγια, ακουστικές μετρήσεις προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Οι ηχητικοί χάρτες αποτυπώνουν την κατανομή των ήχων στον χρόνο και τον χώρο μιας περιοχής, ενώ τα ηχητικά ημερολόγια καταγράφουν τη δυναμική των ηχοτοπίων με την πάροδο του χρόνου. Η περιοχή μελέτης είναι τα Καστελλάκια στο Ρέθυμνο της Κρήτης, που χαρακτηρίζεται από συνδυασμό ανθρωπογενών, τεχνολογικών, βιολογικών και αβιοτικών ηχητικών πηγών. Η μελέτη αυτή επιδιώκει να κατανοήσει την αλληλεπίδραση του ανθρώπου με το συγκεκριμένο ηχοτόπιο.

Mixed Soundscape Analysis: Kastellakia, Rethymno

ABSTRACT

Soundscape analysis is an approach within acoustic ecology, focusing on the recording and interpretation of a place's acoustic environment. By using both qualitative and quantitative recording methodologies such as soundwalks, sound maps, sound diaries, recordings, questionnaires, and acoustic measurements, it provides important information about ecosystems and human interaction with the environment. Sound maps capture the distribution of sounds over time and space in a specific area, while sound diaries document the dynamics of soundscapes over time. The study area is Kastellakia in Rethymno, Crete, characterized by a combination of anthropogenic, technological, biological, and abiotic sound sources. This study aims to understand the interaction between humans and this soundscape.

Εισαγωγή

Η ακουστική οικολογία αποτελεί έναν τομέα που εξετάζει τη σχέση των ζωντανών οργανισμών, και ειδικότερα των ανθρώπων, με το ηχητικό τους

περιβάλλον. Η ανάλυση ηχοτοπίου, στοχεύει στην καταγραφή και ερμηνεία των ηχητικών πηγών μιας περιοχής, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο οι ήχοι επηρεάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων. Μέσω διαφόρων εργαλείων όπως οι ηχητικοί χάρτες και τα ηχητικά ημερολόγια, γίνεται δυνατή η καταγραφή της χρονικής και χωρικής κατανομής των ήχων, καθώς και η παρακολούθηση της εξέλιξης των ηχοτοπίων. Η παρούσα μελέτη, με επίκεντρο την περιοχή των Καστελλακίων στο Ρέθυμνο, επιχειρεί να συμβάλει στην κατανόηση αυτών των ηχοτοπίων, ενισχύοντας τη γνώση για τη σχέση ανθρώπου - περιβάλλοντος και προωθώντας τη σημασία της Ακουστικής Οικολογίας στην μελέτη των ηχοτοπίων.

1. Θεωρητικά στοιχεία

Η ακουστική οικολογία διερευνά την αλληλεπίδραση μεταξύ των ζωντανών οργανισμών και των ηχητικών περιβαλλόντων τους. Κεντρική έννοια της ακουστικής οικολογίας είναι το ηχοτοπίο, το οποίο αναφέρεται στον συνολικό ήχο που προέρχεται από φυσικές, ανθρωπογενείς και βιολογικές πηγές σε έναν χώρο. Η ανάλυση των ηχοτοπίων παρέχει τη δυνατότητα κατανόησης για το πώς οι ήχοι ενός περιβάλλοντος επηρεάζουν τον άνθρωπο και την ισορροπία της οικολογίας. Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιούνται μέσα, όπως ηχητικοί χάρτες και ηχητικά ημερολόγια, για την καταγραφή και ερμηνεία του ηχητικού υλικού [1]. Οι ηχητικοί χάρτες απεικονίζουν την κατανομή των ήχων στον χώρο, ενώ τα ηχητικά ημερολόγια καταγράφουν τη δυναμική των ηχοτοπίων με την πάροδο του χρόνου.

Ο τομέας της Ακουστικής Οικολογίας γεννήθηκε τη δεκαετία του 1960 και σχετίζεται με την ευρύτερη ευαισθητοποίηση για περιβαλλοντικά ζητήματα. Η ιστορία της ξεκινά από τον Καναδό μουσικό, συγγραφέα και περιβαλλοντολόγο Raymond Murray Schafer [2]. Αφετηρία ήταν ένα πρόγραμμα, στο Πανεπιστήμιο Simon Fraser στο Βανκούβερ του Καναδά, με στόχο την «εξεύρεση λύσεων για τη δημιουργία οικολογικά ισορροπημένων ηχοτοπίων στα οποία η ανθρώπινη κοινότητα και το ηχητικό περιβάλλον της βρίσκονται σε αρμονία». Στη συνέχεια άρχισαν να εμπλέκονται και άλλοι τομείς όπως η Ανθρωπολογία, η Λαογραφία, η Ψυχολογία, η Αρχιτεκτονική και η Τέχνη.

1.1 Έννοιες & Ορολογίες

Για την συγκεκριμένη έρευνα αξίζει να γίνει μια αναφορά σε ορισμένες χρήσιμες και βασικές ορολογίες [3]:

- Ηχοτοπίο: Το σύνολο των ήχων που αντιλαμβάνονται οι άνθρωποι ή άλλα ζώα όταν βρίσκονται σε έναν συγκεκριμένο χώρο.
- Ήχοι Υποβάθρου: Οι σταθεροί ήχοι που παραμένουν σχεδόν αμετάβλητοι και οι οποίοι συχνά γίνονται αντιληπτοί μόνο στην αρχή, μετέπειτα ξεχνιούνται.
- Ήχοι Προσκήνιου: Οι ήχοι που προσελκύουν την προσοχή μας, φέρνοντάς τους στο επίκεντρο της ακουστικής μας αντίληψης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση και των λεπτομερειών τους.
- Ηχητικές Πηγές: Κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες
α. Φυσικοί Ήχοι,

β. Ανθρωπογενείς Ήχοι,
 γ. Μηχανικοί Ήχοι,
 δ. Ήχοι & Κοινωνία,
 ζ. Ήχοι ως Σήματα.

- Ηχητικό Γεγονός: Οι ήχοι που συμβαίνουν σε συγκεκριμένο χρόνο και τόπο. Αυτά μπορεί να είναι στιγμιαία ή διαρκούν περισσότερο και συνήθως έχουν ένα τέλος, είτε αυτό είναι απότομο είτε σταδιακό. Προκαλούνται από ανθρώπους, άλλα ζώα ή δυνάμεις της φύσης. Έτσι, μια Ηχητική Πηγή μπορεί να δημιουργεί ένα ή περισσότερα Ηχητικά Γεγονότα.
- Ηχητικό Σήμα: Ένα Ηχητικό Γεγονός που, σύμφωνα με τον R. M. Schafer (1994/1977), έχει ως κύριο σκοπό να παρέχει συγκεκριμένη πληροφορία.
- Ηχώσημο: Ιδιαίτερα Ηχητικά Γεγονότα που είναι μοναδικά για έναν συγκεκριμένο τόπο, όπως περιγράφει ο R. M. Schafer (1994/1977). Αυτοί οι ήχοι είναι σπάνιοι και προσδιορίζουν την ταυτότητα ενός τόπου (π.χ. ο ήχος από το σπάσιμο κανατιών το Πάσχα στην Κέρκυρα).
- Βασικός Ήχος: Μακροχρόνιοι ήχοι που δημιουργούν το ηχητικό σκηνικό για άλλους ήχους ενός ηχοτοπίου. Δεδομένου ότι είναι συνεχείς και συνήθως μεγάλης διάρκειας, συχνά περνούν απαρατήρητοι και παραμένουν στο υπόβαθρο της ακουστικής μας αντίληψης.
- Hi-fi (Hi-fidelity): Ο ηχογραφημένος ήχος παρουσιάζεται ως μια πιστή αναπαραγωγή του πραγματικού ήχου, προσφέροντας στον ακροατή μια αίσθηση του χώρου. Οι λεπτομέρειες είναι ευδιάκριτες και το ηχητικό περιβάλλον διαμορφώνεται πλήρως.
- Lo-fi (Low-Fidelity): Ο ήχος δεν αναπαράγεται με ακρίβεια, προσφέροντας μόνο μια γενική ιδέα για τον χώρο και τα βασικά του χαρακτηριστικά, χωρίς τη διαύγεια και καθαρότητα του πραγματικού ήχου, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ ήχων που συμβαδίζουν.
- Θόρυβος: Ένας πολύ δυνατός ήχος, ο οποίος, σύμφωνα με τον R. M. Schafer, μπορεί να οριστεί ως:
 - α. Παρεμβολή σε οποιοδήποτε σύστημα μεταφοράς μηνυμάτων,
 - β. Μη μουσικός ήχος,
 - γ. Ανεπιθύμητος ήχος.
- Ηχητικός Χάρτης: Η ηχητική απεικόνιση ενός συγκεκριμένου γεωγραφικού χώρου.
- Ηχητικό Ημερολόγιο: Αποτελεί την συλλογή καταγεγραμμένων ήχων που αντιστοιχούν σε γεγονότα, στιγμές ή συναισθήματα κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου.

2. Έρευνα

2.1 Μεθοδολογία

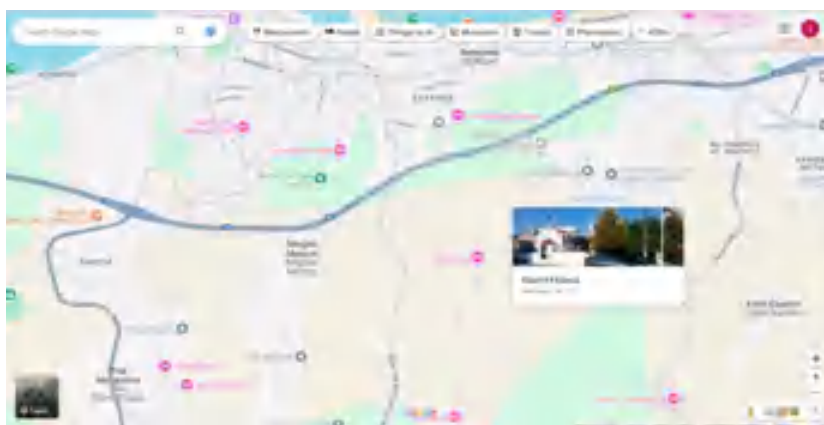
Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας μελέτης επικεντρώνεται στη λεπτομερή και συστηματική καταγραφή και ανάλυση του ηχοτοπίου στην περιοχή Καστελλάκια, αξιοποιώντας προηγμένα τεχνολογικά εργαλεία. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω ενός καταγραφικού ήχου υψηλής πιστότητας, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και ποιότητα στα ηχητικά δεδομένα.

Οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή των Καστελλακίων στο Ρέθυμνο της Κρήτης, με συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση που περιλάμβανε τη δειγματοληπτική επιλογή σημείων ηχογράφησης, την παρακολούθηση των ηχοτοπίων κατά τη διάρκεια διαφορετικών χρονικών περιόδων και την καταγραφή του ανθρώπινου παράγοντα. Η ανάλυση των ηχοτοπίων έγινε μέσω φασματικών αναλύσεων, ενώ η χωρική και γεωγραφική απεικόνιση των δεδομένων βοήθησε στην κατανόηση της κατανομής των ήχων στον χώρο.

Ο τρόπος με τον οποίο ξεκίνησε η καταγραφή των δεδομένων ήταν για διαφορετική χρήση. Από προσωπική αφορμή για την δημιουργία ηχητικών συνθέσεων, γεννήθηκε το ενδιαφέρον παρατήρησης της περιοχής των Καστελλακίων. Με το πέρασμα των χρόνων και την συνεχή καταγραφή ηχητικών ημερολογίων, ηχητικών χαρτών και ταυτόχρονα ηχογραφήσεων, ξεδιπλώθηκε η ιδέα της παρατήρησης της μεταβολής του ηχοτοπίου αυτού. Επομένως, οργανώθηκαν όλες οι πληροφορίες και τα δεδομένα που υπήρχαν και από αυτό το υλικό προκύπτει η συγκεκριμένη μελέτη του ηχοτοπίου. Οι πρώτοι ηχοπεριπάτοι έγιναν το χειμώνα του 2019 και ολοκληρώθηκαν το καλοκαίρι του 2024. Το υλικό έχει καταχωρηθεί σε ένα αρχείο Microsoft Excel, οργανωμένο ανά ημερομηνίες. Περιλαμβάνει όλες τις ηχογραφήσεις για κάθε εποχή του χρόνου, κατά τη διάρκεια των έξι ετών παρατήρησης. Συνδυαστικά με τις ηχογραφήσεις υπάρχουν τα αρχεία των ηχητικών χαρτών και των ηχητικών ημερολογίων [4].

2.2 Μελέτη

Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως μεικτό ηχοτοπίο, γεγονός που την καθιστά μια ενδιαφέρουσα περίπτωση μελέτης για ανάλυση. Η ανάλυση των δεδομένων αποκαλύπτει ότι ηχητικές πηγές, όπως ο άνεμος, ο BOAK και τα πουλιά, κυριαρχούν σχεδόν σε όλες τις ηχογραφήσεις, ενώ ηχητικές πηγές, όπως η ανθρώπινη δραστηριότητα, είναι αρκετά πιο σπάνια. Η χωρική και γεωγραφική ανάλυση των ηχητικών δεδομένων αποκαλύπτει επίσης πώς η τοπογραφία και οι φυσικές ιδιαιτερότητες της περιοχής επηρεάζουν την κατανομή των ήχων. Ο ηχητικός χάρτης επιτρέπει την οπτικοποίηση αυτών των διαφορών, προσφέροντας μια σαφή εικόνα της ακουστικής φυσιογνωμίας των Καστελλακίων.



Σχήμα 2.1 Ο χάρτης της περιοχής



Σχήμα 2.2 Δείγμα Ηχητικού Χάρτη

Η δυναμική των ηχοτοπίων μελετήθηκε μέσα από την καταγραφή και ανάλυση των ηχητικών ημερολογίων, τα οποία επιτρέπουν την παρακολούθηση των ηχητικών αλλαγών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ηχοτοπία παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή του έτους. Για παράδειγμα, κατά τις πρωινές ώρες, οι ήχοι της φύσης είναι πιο έντονοι, ενώ κατά τις ώρες αιχμής κυριαρχούν οι ανθρωπογενείς ήχοι. Επιπλέον, προβάλλεται ότι οι καιρικές συνθήκες, όπως ο άνεμος και η βροχή, επηρεάζουν την ακουστική εικόνα του τοπίου, αυξάνοντας ή μειώνοντας την ένταση συγκεκριμένων ήχων. Η εποχιακή ανάλυση δείχνει ότι οι ήχοι της φύσης, όπως το κελάηδημα συγκεκριμένων πουλιών και η ύπαρξη των τζιτζικιών, είναι πιο έντονοι την άνοιξη, ενώ οι αστικοί ήχοι παραμένουν σταθεροί καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου.

2.3 Σχέση ανθρώπου – περιβάλλοντος

Η ανθρώπινη αλληλεπίδραση με τα ηχοτοπία των Καστελλακίων αποτελεί σημαντικό στοιχείο της παρούσας έρευνας, καθώς οι ήχοι του περιβάλλοντος επηρεάζουν άμεσα την ανθρώπινη εμπειρία και την ποιότητα ζωής. Τα φυσικά ηχοτοπία τείνουν να συνδέονται με θετικά συναισθήματα, όπως ηρεμία και αναζωογόνηση, ενώ οι αστικοί ήχοι συχνά προκαλούν άγχος και δυσφορία [5]. Η μελέτη αναδεικνύει επίσης την πολιτιστική και κοινωνική σημασία των ηχοτοπίων, καθώς αυτά συμβάλλουν στη διαμόρφωση της ταυτότητας μιας περιοχής και στη συλλογική μνήμη των κατοίκων. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και ηχοτοπίου είναι κρίσιμη για τη διαχείριση και προστασία του ηχητικού περιβάλλοντος.

2.4 Καταγραφή δεδομένων – Υλικό – Εξοπλισμός

Το σύνολο των ηχογραφήσεων που χρησιμοποιήθηκαν είναι 738. Αυτό σημαίνει ότι αντιστοιχούν περίπου 120 ηχογραφήσεις σε κάθε έτος και περίπου 30 σε κάθε μία από τις τέσσερις εποχές του χρόνου. Οι ηχητικοί χάρτες, όπως και τα ηχητικά ημερολόγια αριθμούνται στα 456.

Όλες οι ηχογραφήσεις έγιναν αποκλειστικά από ένα ηχογραφικό. Το καταγραφικό ήχου που χρησιμοποιήθηκε είναι το Tascam DR - 07 MKII και το αντανέμιο του.



Σχήμα 2.3 Σημεία ηχογραφήσεων και σημείωση ορισμένων ηχητικών πηγών

Ηχητικές Πηγές	Συχνότητα Ηχογραφήσεων
Θύλακ	Σχεδόν παντού
Τζαζίνα	Παντού τους καλοκαιρινούς μήνες
Αέρας	Σχεδόν παντού
Καλάμια	Αραιά
Κλαδιά	Αραιά
Δεκάσχοιτρα	Σχεδόν παντού
Μουσική	Πολύ σπάνια
Τσιβίσματα	Παντού (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων)
Βυτιοφόρα	Αρκετά συχνά
Βήματα	Αρκετά συχνά
Τάβισμα σκύλου	Πολύ συχνά
Ήχος κροτού	Συχνά
Φωνές - Ομιλίες	Συχνά
Ήνες - πάπιες	Πολύ συχνά
Κοράκι	Πολύ συχνά
Παγούρια	Πάρα πολύ συχνά
Μέταλλα	Αραιά
Βροχή	Αρκετά σπάνια
Καρακάδες	Πάρα πολύ συχνά
Τριζόνια	Πολύ συχνά

Σχήμα 2.4 Βασικές πηγές ήχου

3. Συμπεράσματα

3.1 Αποτελέσματα

Η παρούσα μελέτη κατέληξε σε μια σειρά από σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη δομή και τη δυναμική των ηχοτοπίων στα Καστελλάκια. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ανάλυσης ηχοτοπίων ως εργαλείου για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ περιβάλλοντος και ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο ηχητικός χάρτης και τα ηχητικά ημερολόγια αποδεικνύονται χρήσιμα για την απεικόνιση των ηχητικών αλλαγών στον χρόνο και τον χώρο, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για τη διαχείριση των ηχητικών πόρων μιας περιοχής [6]. Βάσει των ευρημάτων, προτείνονται συγκεκριμένες δράσεις για τη μείωση του θορύβου σε αστικές περιοχές και την ενίσχυση των φυσικών ηχοτοπίων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων. Επιπλέον, προτείνονται περαιτέρω έρευνες για τη μελέτη της σχέσης μεταξύ ηχοτοπίων και πολιτισμικής ταυτότητας, καθώς και για την εφαρμογή της ανάλυσης ηχοτοπίων σε άλλες αστικές και φυσικές περιοχές [7].

Ηχητικές Πηγές	Συχνότητα Ηχογραφήσεων
ΒΟΑΚ	Σχεδόν παντού
Τζιτζίκια	Παντού τους καλοκαιρινούς μήνες
Αέρας	Σχεδόν παντού
Καλάμια	Αραιά
Κλαδιά	Αραιά
Δεκαοχτούρα	Σχεδόν παντού
Μουσική	Πολύ σπάνια
Τιτιβίσματα	Παντού (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων)
Βυτιοφόρα	Αρκετά συχνά
Βήματα	Αρκετά συχνά
Γάβγισμα σκύλου	Πολύ συχνά
Ήχος ερπετού	Συχνά
Φωνές - Ομιλίες	Συχνά
Χήνες - πάπιες	Πολύ συχνά
Κοράκι	Πολύ συχνά
Παγώνια	Πάρα πολύ συχνά
Μέταλλα	Αραιά
Βροχή	Αρκετά σπάνια
Καρακάδες	Πάρα πολύ συχνά
Τριζόνια	Πολύ συχνά

Βασικός Ήχος

Σχήμα 3.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

3.2 Μελλοντικές προεκτάσεις

Ένα επόμενο βήμα της μελέτης του ηχοτοπίου αυτού μπορεί να την εξέταση του πώς επηρεάζει την ψυχική και σωματική υγεία των ανθρώπων στην περιοχή αυτή. Επιπρόσθετα, η έρευνα μπορεί να περιλαμβάνει την επέκταση της ανάλυσης ηχοτοπίων σε άλλες περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ενώ τέλος, θα μπορούσε να προταθεί η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ ηχοποικιλότητας και βιοποικιλότητας σε οικοσυστήματα, ή η σύνδεση των ηχοτοπίων με τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη και τον αστικό σχεδιασμό.

4. Αναφορές

- [1] Schafer, R. M. «The Tuning of the World», New York: Knopf (1977)
- [2] Schafer, R.M. «‘The Music of the Environment’», in Cox, Ch. and Warner, D., (eds.), Audio Culture: Readings in modern music, pp. 29-39, New York: Continuum (2006)
- [3] Ετμεκτσόγλου Ι. «Βασική Ορολογία Ακουστικής Οικολογίας για παιδιά & ενήλικες: Το Ηχοτοπίο & οι Σημασίες των Ήχων του», Ελληνική Εταιρία Ακουστικής Οικολογίας, Κέρκυρα, Ελλάδα (2014)
- [4] Augoyard F. and Torgue H. «Sonic Experience, A Guide to Everyday sounds» (1995)
- [5] Μαλλιαρού Αγγελική – Σοφία «Ακουστική Οικολογία: Κάνοντας μουσική στη / με τη φύση», Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Ανθρωπιστικών Επιστημών, Τμήμα Επιστημών Προσχολικής Αγωγής και Εκπαιδευτικού Σχεδιασμού, Π.Μ.Σ. «Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ρόδος, Ελλάδα (2019)
- [6] Gaver, W.W. «‘What in the World Do We Hear? An Ecological Approach to Auditory Event Perception’», Ecological Psychology, 5(1), pp. 1-29 (1993a)
- [7] Westerkamp, H. «‘Linking Soundscape Composition and Acoustic Ecology’», Organised Sound, 7(1), 51-56 (2002)



CAVEMOVE: Συλλογή ακουστικών δεδομένων για τη μελέτη τεχνολογιών φωνής μέσα σε κινούμενα οχήματα

Νικόλαος Στεφανάκης^{1,2,*}, Μαρίνος Καλαϊτζάκης², Δέσποινα Παυλίδη² και Αντρέας Συμιακάκης²

¹Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ρέθυμνο

² Ινστιτούτο Πληροφορικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο

[*nstefana@hmu.gr](mailto:nstefana@hmu.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το CAVEMOVE είναι ένα έργο το οποίο αποσκοπεί στην καταγραφή πραγματικών ακουστικών δεδομένων για τη μελέτη τεχνολογιών φωνής μέσα σε οχήματα. Η διαδικασία ηχογράφησης περιλαμβάνει (i) ηχογραφήσεις ακουστικών κρουστικών αποκρίσεων, οι οποίες αξιοποιούνται για την παραγωγή των συστατικών φωνής και (ii) ηχογραφήσεις ακουστικού θορύβου σε διαφορετικές συνθήκες, τόσο εν στάσει όσο και εν κινήσει. Τα δεδομένα καταγράφονται με δύο διαφορετικές διατάξεις μικροφώνων μέσα στην καμπίνα και ειδικότερα (i) με χρήση συστοιχίας μικροφώνων ή (ii) με κατανεμημένα μικρόφωνα. Περιγράφουμε εν συντομία τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι καταγραφές και εξηγούμε τις διαδικασίες πίσω από ένα API σε γλώσσα προγραμματισμού python που σχεδιάστηκε με στόχο να διευκολύνει το χρήστη στην αξιοποίηση των ηχητικών δεδομένων για το σχεδιασμό πειραμάτων. Μια πρώτη έκδοση του API και μέρος του περιγραφόμενου συνόλου δεδομένων διατίθενται για δωρεάν λήψη.

CAVEMOVE: An acoustic database for the study of voice-enabled technologies inside moving vehicles

ABSTRACT

CAVEMOVE is a research project dedicated to the collection of audio data for the study of voice-enabled technologies inside moving vehicles. The recording process involves (i) recordings of acoustic impulse responses, which provide the means for modelling the speech components and (ii) recordings of acoustic noise at a wide range of both static and in-motion conditions. Data is recorded with two different microphone configurations and particularly (i) a compact microphone array or (ii) a distributed microphone setup. We briefly describe the conditions under which the recordings were acquired and we give insights about a python API that we designed with the goal to support the research and development of voice enabled technologies inside moving vehicles. The first version of this python API and part of the described dataset are available for free download.

Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία, το ενδιαφέρον για εφαρμογές ήχου σε περιβάλλοντα κινούμενων οχημάτων έχει αυξηθεί σημαντικά. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την αναγνώριση ομιλίας [1,2] την υποκειμενική αντίληψη του ήχου που παράγεται από τα αυτοκίνητα [3,4], τον ενεργό έλεγχο θορύβου [5] κ.α. Μέχρι το 2028, το Navigant Research προβλέπει ότι η διείσδυση των τεχνολογιών φωνής μέσα στα καινούρια αυτοκίνητα αναμένεται να αγγίξει το 90%. Ενδεικτικά, τέτοιες εφαρμογές είναι η ανίχνευση ομιλίας (voice activity detection), ο διαχωρισμός των ομιλητών, η καταπίεση του θορύβου στο σήμα ομιλίας, ο εντοπισμός της θέσης του ομιλητή και βέβαια, η αναγνώριση ομιλίας και η αναγνώριση ομιλητή. Ως εκ τούτου, χρειάζονται εργαλεία που να μπορούν να υποστηρίξουν την έρευνα που απαιτείται ώστε οι παραπάνω εφαρμογές να μπορούν να λειτουργήσουν επιτυχώς στα θορυβώδη περιβάλλοντα των αυτοκινήτων.

Σε αυτή την εργασία, περιγράφουμε τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για την κατασκευή μιας ακουστικής βάσης δεδομένων και μιας αντίστοιχης διεπαφής προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface - API) σε γλώσσα python με στόχο τη διευκόλυνση της έρευνας σε τεχνολογίες φωνής μέσα σε κινούμενα οχήματα. Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες, το σύνολο δεδομένων μας δεν περιλαμβάνει μόνο διαφορετικά αυτοκίνητα και διατάξεις μικροφώνου, αλλά περιλαμβάνει επίσης κρουστικές αποκρίσεις μετρούμενες από διαφορετικές θέσεις επιβατών εντός της καμπίνας. Αυτό δίνει μέγιστη ευελιξία στην αξιοποίηση των δεδομένων, επιτρέποντας στους χρήστες να συνθέτουν σήματα μικροφώνου σε οποιαδήποτε επιθυμητή γλώσσα, παρέχοντας τις δικές τους καθαρές (ιδανικά ανηχοϊκές) εγγραφές ομιλίας. Μέρους του συνόλου δεδομένων που περιγράφεται, μαζί με το API διατίθεται δωρεάν για λήψη από το διαδίκτυο.

1. Καταγραφή των ηχητικών δεδομένων

1.1 Μικροφωνικές διατάξεις

Όλες οι ηχογραφήσεις έγιναν με τη χρήση της USB κάρτας ήχου M-audio M-Track Eight audio, σε ρυθμό δειγματοληψίας 48kHz και μήκος δείγματος 24-bits. Οκτώ πανκατευθυντικά μικρόφωνα (Shure SM93) τοποθετημένα σε διαφορετικές θέσεις χρησιμοποιούνται για την καταγραφή του ακουστικού θορύβου και των κρουστικών αποκρίσεων (Impulse Responses – IRs). Αυτά είναι ελαφριά μικρόφωνα πέτου με επίπεδη απόκριση συχνότητας από τα 80 έως τα 20000 Hz. Δύο διαφορετικές διατάξεις μικροφώνων χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα, όπως περιγράφονται παρακάτω.:

- **Συστοιχία μικροφώνων:** τα οκτώ μικρόφωνα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα πάνω ένα κύκλο ακτίνας 5 cm. Η κυκλική συστοιχία τοποθετείται στην κορυφή του μπροστινού πίνακα, μεταξύ του οδηγού και του συνοδηγού (βλέπε Σχήμα 1(γ)). Τα μικρόφωνα τοποθετήθηκαν στη συστοιχία χωρίς αντανέμιο.

- **Κατανεμημένα μικρόφωνα:** Τα μικρόφωνα είναι κατανεμημένα ως εξής: έξι από τα μικρόφωνα βρίσκονται στο μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου, ενώ τα άλλα δύο είναι τοποθετημένα στην οροφή στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου (βλέπε π.χ. Σχήμα 1(α) και (β)). Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα μικρόφωνο



Σχήμα 1 Κατανομή των μικροφώνων μέσα στο Alfa Romeo. Η κατανομή είναι ενδεικτική και για την τοποθέτηση στα υπόλοιπα αυτοκίνητα που είχαν κατανεμημένα μικρόφωνα.

κοντά σε κάθε επιβάτη. Όλα τα μικρόφωνα σταθεροποιήθηκαν με κατάλληλη κολλητική ταινία και καλύφθηκαν με αντιανέμιο.

1.2 Ηχογράφηση των κρουστικών αποκρίσεων

Οι ακουστικές κρουστικές αποκρίσεις μας επιτρέπουν να καταγράψουμε τις ακουστικές υπογραφές από κάθε ομιλητή προς τα μικρόφωνα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε αυτοκίνητο και διάταξη μικροφώνου, καλύπτοντας τουλάχιστον τη θέση του οδηγού, του συνοδηγού, του πίσω αριστερού, του πίσω μεσαίου και του πίσω δεξιού επιβάτη. Όλες οι κρουστικές αποκρίσεις καταγράφονται με τη χρήση του Room Eq Wizard, κάνοντας χρήση ημίτονου σάρωσης ως σήμα διέγερσης. Το μεγάφωνο που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις μετρήσεις είναι το Talkbox της NTi, το οποίο έχει σχεδιαστεί ειδικά για να προσομοιάζει στην απόκριση συχνότητας και την κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής. Το μεγάφωνο είναι βαθμονομημένο και διαθέτει ενσωματωμένα σήματα διέγερσης τα οποία μας επιτρέπουν να διεγείρουμε το εσωτερικό του αυτοκινήτου με ήχους που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη φωνητική προσπάθεια και συγκεκριμένα κανονική φωνητική προσπάθεια (60 dBA σε 1 m απόσταση) και υψηλή φωνητική προσπάθεια (70 dBA σε 1 m απόσταση) [6]. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ σημαντική, καθώς θα μας επιτρέψει να υπολογίσουμε τις στάθμες σήματος που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες φωνητικές προσπάθειες, επιτρέποντάς μας έτσι πετύχουμε μια ρεαλιστική ισορροπία μεταξύ των συστατικών φωνής και των συστατικών θορύβου.

Θεωρήσαμε ότι ο ήχος από το ενσωματωμένο ηχοσύστημα του αυτοκινήτου αποτελεί μια ακουστική πηγή παρεμβολής που αξίζει να ληφθεί υπόψιν. Για αυτό το λόγο, κρουστικές αποκρίσεις μετρήθηκαν και από το ενσωματωμένο σύστημα ήχου στο αυτοκίνητο, όταν αυτό ήταν διαθέσιμο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ταυτόχρονη καταγραφή της απόκρισης από όλα τα ηχεία του αυτοκινήτου. Πραγματοποιήθηκε με την απευθείας τροφοδοσία του σήματος διέγερσης στη

βοηθητική είσοδο του ηχοσυστήματος ή με την αναπαραγωγή του από το CD player.

Πίνακας 1. Αυτοκίνητα και μικροφωνικές διατάξεις που έχουν καλυφθεί έως σήμερα

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Κατανεμημένα	Συστοιχία	Ηχοσύστημα
Honda	CR-V (2009)	NAI	NAI	NAI
Alfa Romeo	146 TS (2000)	NAI	OXI	OXI
Smart	Forfour (2019)	OXI	NAI	NAI
Volkswagen	Golf (2011)	NAI	NAI	NAI

1.3 Αυτοκίνητα και ακουστικές συνθήκες

Μέχρι στιγμής, η διαδικασία καταγραφής έχει επαναληφθεί πέντε φορές, καλύπτοντας τέσσερα διαφορετικά αυτοκίνητα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Ως ελεγχόμενοι παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση και το επίπεδο του ακουστικού θορύβου σε κάθε μικρόφωνο θεωρούνται οι ακόλουθοι: η ταχύτητα του αυτοκινήτου, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, η θέση των παραθύρων και η ισχύς εξαερισμού/κλιματισμού. Πρόσθετοι παράγοντες που δεν είναι τόσο εύκολο να ελεγχθούν αλλά επηρεάζουν επίσης τον ακουστικό θόρυβο είναι οι καιρικές συνθήκες, η κυκλοφορία, η επιφάνεια του οδοστρώματος (π.χ. τραχιά, λεία κ.λπ.) και οι εξωτερικές ακουστικές πηγές (π.χ. οχήματα, άνθρωποι, ζώα). Όσον αφορά τους ελεγχόμενους παράγοντες, επιχειρήθηκε κατά την ηχογράφηση να έχουν σταθερές τιμές για συνεχή χρονικά τμήματα, ώστε να επιτευχθούν στάσιμες συνθήκες θορύβου. Οι ελεγχόμενες συνθήκες καλύπτουν ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων οδήγησης και θέσης παραθύρων. Ειδικότερα όσον αφορά τη θέση των παραθύρων, εξετάζουμε τέσσερις καταστάσεις που χαρακτηρίζονται ως 0, 1, 2 και 3. Η κατάσταση 0 αντιστοιχεί σε τελείως κλειστά παράθυρα. Η κατάσταση 1 αντιστοιχεί σε παράθυρα του οδηγού και του συνοδηγού ελαφρώς ανοιχτά (περίπου 10 cm). Η κατάσταση 2 αντιστοιχεί σε εντελώς ανοιχτά παράθυρα μπροστά και, τέλος, η κατάσταση 3 αντιστοιχεί σε εντελώς ανοιχτά παράθυρα τόσο μπροστά όσο και πίσω. Όσον αφορά τις ταχύτητες οδήγησης, σε κάθε αυτοκίνητο καλύπτουμε τουλάχιστον το εύρος από 50 km/h έως 110 km/h με βήματα των 10 km/h. Σε κάθε περίπτωση καλύπτονται όλοι οι συνδυασμοί των ανοιγμάτων των παραθύρων και των ταχυτήτων οδήγησης, εκτός από τις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπροσθέτως αυτών των εν κινήσει ηχογραφήσεων, ελήφθησαν στατικές ηχογραφήσεις για την καταγραφή του θορύβου που παράγεται από το ενσωματωμένο σύστημα εξαερισμού ή κλιματισμού. Σε κάθε αυτοκίνητο εξετάστηκαν δύο ή τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος εξαερισμού και η διαδικασία καταγραφής επαναλήφθηκε ώστε να καλυφθούν όλοι οι συνδυασμοί μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων εξαερισμού και των διαφορετικών θέσεων παραθύρων.

1.4 Πρόσθετες σημειώσεις ως προς τη διαδικασία

Γενικά, η όλη διαδικασία της ηχογράφησης διαρκούσε περισσότερο από μία ημέρα κάθε φορά. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα μικρόφωνα ήταν

σταθερά στερεωμένα στις αρχικές τους θέσεις και δόθηκε προσοχή ώστε να αποφευχθούν τυχόν ακούσιες μετατοπίσεις. Τα ποτενσιόμετρα της κάρτας ήχου, τα οποία επηρεάζουν το κέρδος προ-ενίσχυσης που σχετίζεται με κάθε κανάλι μικροφώνου, ήταν επίσης σε σταθερή θέση. Επιπλέον, πριν και μετά από κάθε ηχογράφιση, το καθένα κανάλι μικροφώνου υποβαλλόταν σε μια εμπειρική διαδικασία βαθμονόμησης που μας επέτρεπε να εξάγουμε μια κατά προσέγγιση εκτίμηση της ευαισθησίας ελεύθερου πεδίου. Η βαθμονόμηση έλαβε χώρα μέσα στον ημι-ανηχοϊκό θάλαμο του Ινστιτούτου Πληροφορικής του ΙΤΕ. Κάθε μικρόφωνο, ενώ ήταν συνδεδεμένο πάνω στην κάρτα ήχου, τοποθετήθηκε σε συγκεκριμένο σημείο εντός του θαλάμου και ηχοβολήθηκε με ροζ θόρυβο συγκεκριμένης στάθμης. Στη συνέχεια, ένα πανκατευθυντικό μετρητικό μικρόφωνο που ήταν συνδεδεμένο σε ένα ηχόμετρο NTi, τοποθετήθηκε στην ίδια ακριβώς θέση και ηχοβολήθηκε με τον ίδιο ακριβώς ροζ θόρυβο. Από το ηχόμετρο, καταγράφηκε η ισοδύναμη στάθμη θορύβου με φίλτρο A. Στη συνέχεια, το σήμα ροζ θορύβου που ηχογραφήθηκε με κάθε ένα μικρόφωνο πέτυε πέρασε από κατάλληλο φίλτρο που σχεδιάστηκε ώστε να προσεγγίζει την χαρακτηριστική απόκριση συχνότητας του φίλτρου με στάθμιση A. Μέσω αυτής της διαδικασίας, μπορέσαμε να συσχετίσουμε την στάθμη σήματος του κάθε καναλιού με τη στάθμη ηχητικής πίεσης σε dBA, εξάγοντας έτσι μια κατά προσέγγιση εκτίμηση της ευαισθησίας ελεύθερου πεδίου κάθε μικροφώνου.

2 Συνδυασμός των ηχογραφήσεων

Ο απώτερος στόχος του API που σχεδιάστηκε στο πλαίσιο του CAVEMOVE είναι να επιτρέψει στους μηχανικούς και τους ερευνητές να αξιοποιούν εύκολα τα ηχητικά δεδομένα για να συνθέτουν τα μικροφωνικά σήματα που αντιστοιχούν σε καθορισμένα σενάρια. Για συγκεκριμένο αυτοκίνητο και μικροφωνική διάταξη η διαδικασία της σύνθεσης μπορεί να περιγραφεί

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}(p, Ls, w, \mathbf{x}) + \mathbf{A}(La, w, \mathbf{z}) + \mathbf{N}(s, w) + \mathbf{V}(l, w). \quad (2.1)$$

Εν συντομία, κάθε κεφαλαίο σύμβολο είναι ένας πίνακας σήματος $N \times M$, όπου M είναι ο επιθυμητός αριθμός καναλιών μικροφώνου και N είναι η διάρκεια του συντιθέμενου ηχητικού αποσπάσματος σε δείγματα. Το $\mathbf{S}$ αντιπροσωπεύει το φιλτραρισμένο σήμα ομιλίας, το $\mathbf{A}$ αντιπροσωπεύει τα ηχητικά σήματα παρεμβολής που προέρχονται από το ενσωματωμένο ηχοσύστημα (όταν είναι διαθέσιμο), $\mathbf{N}$ είναι τα συστατικά θορύβου που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη κατάσταση οδήγησης και $\mathbf{V}$ είναι τα συστατικά θορύβου που σχετίζονται με τον εξαερισμό/κλιματισμό. Υποθέτοντας ότι όλα αυτά τα ηχητικά συστατικά είναι στατιστικά ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, το τελικό σήμα μικροφώνου μπορεί να συντεθεί όπως στην Εξ. (2.1), μέσω απλής υπέρθεσης. Όπως φαίνεται, κάθε συστατικό παράγεται ως συνάρτηση καθορισμένων παραμέτρων. Μια σύντομη εξήγηση αυτών των παραμέτρων είναι η ακόλουθη.

w : είναι ένας ακέραιος αριθμός που παίρνει τιμές 0, 1, 2 ή 3, με κάθε ακέραια τιμή που αντιπροσωπεύει μια διαφορετική συνθήκη ως προς το άνοιγμα των παραθύρων

x : είναι ένα μονοδιάστατο διάνυσμα με το σήμα της ομιλίας (ιδανικά ανηχοϊκό) που έχει επιλεγεί για το συγκεκριμένο σενάριο. Ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την παροχή αυτού του σήματος σε μορφή PCM. Η ηχογράφηση μπορεί να έχει οποιοδήποτε μήκος και ρυθμό δειγματοληψίας (μετατρέπεται αυτόματα στο ρυθμό δειγματοληψίας που δουλεύει το πρόγραμμα).

p : μπορεί να επιλεγεί από ένα δεδομένο σύνολο τιμών συμβολοσειρών, όπου η κάθε συμβολοσειρά αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θέση επιβάτη εντός της καμπίνας του αυτοκινήτου. Για κάθε συνδυασμό p και w , το API θα ανακαλέσει αυτόματα τις κρουστικές αποκρίσεις που απαιτούνται για την παραγωγή των συστατικών ομιλίας μέσω της συνέλιξής τους με το σήμα x .

L_s : είναι μια τιμή σε dBA, που αντιστοιχεί στην επιθυμητή φωνητική προσπάθεια. Προτεινόμενο εύρος για ρεαλιστικής έντασης φωνή είναι μεταξύ 60 και 70, με 60 να αντιστοιχεί σε κανονική φωνητική προσπάθεια και 70 σε υψηλή φωνητική προσπάθεια [6].

L_a : είναι μια τιμή σε dBA, που αντιστοιχεί στη μέση ακουστική στάθμη του ηχητικού προγράμματος που αναπαράγεται από το ενσωματωμένο ηχοσύστημα. Τιμές εντός του εύρους 50 με 90 θεωρούνται ρεαλιστικές.

z : είναι ένα μονοδιάστατο διάνυσμα που αντιπροσωπεύει το ηχητικό πρόγραμμα που αναπαράγεται από το ηχοσύστημα. Ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την παροχή του αρχείου ήχου σε μορφή PCM. Το αρχείο ήχου μπορεί να έχει οποιοδήποτε μήκος και ρυθμό δειγματοληψίας. Αρχεία ήχου με περισσότερα από ένα κανάλια είναι αποδεκτά αλλά αποδίδονται ως μονοφωνικά σήματα.

s : είναι μια ακέραια τιμή από ένα σύνολο δεδομένων τιμών, όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε διαφορετική ταχύτητα σε km/h. Τα συστατικά θορύβου που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένη ταχύτητα και άνοιγμα παραθύρου φορτώνονται αυτόματα από το πρόγραμμα.

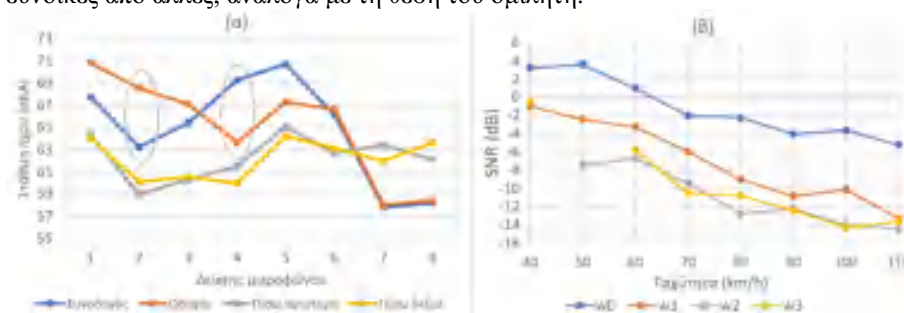
l : είναι ακέραιος με τιμές στην περιοχή 1, 2 ή 3, όπου η κάθε τιμή αντιστοιχεί σε διαφορετική ισχύ λειτουργίας του συστήματος εξαερισμού/κλιματισμού.

Η προσέγγιση έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε το προκύπτον μήκος N του σήματος εξόδου Y , καθώς και όλων των πινάκων στην Εξ.(2.1) να ταιριάζει με το μήκος του σήματος ομιλίας x που παρέχει ο χρήστης. Για να το πετύχουμε αυτό έχει ενσωματωθεί μηχανισμός που ανακυκλώνει τα σήματα θορύβου που είναι εγγενείς στην κατασκευή των A , N και V όσες φορές χρειαστεί. Η προσέγγιση σύνθεσης παρέχει έναν εύκολο τρόπο για την παραγωγή ηχητικών μίξεων που διατηρούν μια ρεαλιστική ισορροπία μεταξύ της φωνής και των συστατικών θορύβου, χωρίς να απαιτούνται επιπλέον ενέργειες από τον χρήστη. Επίσης, εκτός από τις παραπάνω λειτουργίες, το API περιλαμβάνει βοηθητικές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα την ικανότητα εξαγωγής των κρουστικών αποκρίσεων που εμπλέκονται στις συγκεκριμένες συνθήκες μελέτης αλλά και τη δημιουργία διανυσμάτων στροφής (steering vector) που να είναι συμβατά με την εν λόγω κυκλική συστοιχία. Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να βοηθήσουν τον τελικό χρήστη στον σχεδιασμό των σχηματιστών λοβών (beamformers) και μετα-φίλτρων (post filters) που απαιτούνται για την ανάπτυξη τυπικών αλγορίθμων βελτίωσης ομιλίας. Τα δεδομένα ήχου που μοιραζόμαστε ανοιχτά με αυτό το έγγραφο είναι σε μορφή PCM, σε ρυθμό δειγματοληψίας 16 kHz και μήκος δείγματος 24 bit. Ενδιαφερόμενοι χρήστες μπορούν να κατεβάσουν το API της python από το GitHub του CAVEMOVE [7], όπου θα βρουν επίσης και το σύνδεσμο για τη λήψη των ηχητικών δεδομένων.

3 Ανάλυση ηχογραφήσεων

Η ανάλυση που ακολουθεί περιέχει αποτελέσματα που πηγάζουν κατευθείαν από τις ηχογραφήσεις που έγιναν σε συγκεκριμένα αυτοκίνητα, ωστόσο τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ενδεικτικά και για τα υπόλοιπα αυτοκίνητα που ηχογραφήθηκαν στο CAVEMOVE.

Σε πρώτη ανάλυση, επιλέχθηκε η διάταξη με τα κατανεμημένα μικρόφωνα εντός του Alfa Romeo για να μελετηθεί αν κάποιες θέσεις μικροφώνων είναι πιο ευνοϊκές από άλλες, ανάλογα με τη θέση του ομιλητή.



Σχήμα 2. (α) Στάθμη ήχου (dBA) ανά μικρόφωνο για διαφορετικές θέσεις ομιλητή με κλειστά παράθυρα (w0) μέσα στο Alfa Romeo και (β) SNR συναρτήσει της ταχύτητας για κανονική φωνητική προσπάθεια από τη θέση του οδηγού μέσα στο Honda-CRV.

Λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία ελεύθερου πεδίου κάθε μικροφώνου (βλ. Ενότητα 1.3) απεικονίζουμε στο Σχήμα 2(α) τη στάθμη ήχου σε κάθε θέση μικροφώνου (σε dBA) ανάλογα με τη θέση του ομιλητή μέσα στο Alfa Romeo, για κανονική φωνητική προσπάθεια, όπως αυτή προέκυψε αξιοποιώντας το Talkbox. Η ανάλυση αυτή απεικονίζεται για τέσσερις θέσεις ομιλητών, του οδηγού, του συνοδηγού και των πίσω αριστερά και πίσω δεξιά επιβατών. Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η στάθμη της φωνής του οδηγού μεγιστοποιείται στο μικρόφωνο 1 και του συνοδηγού στο μικρόφωνο 5, γεγονός που έχει να κάνει με το ότι η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη γίνεται ελάχιστη. Ωστόσο, το μικρόφωνο 2 φαίνεται να εξασφαλίζει καλύτερο ακουστικό διαχωρισμό (περίπου 6 dB) συγκριτικά με το μικρόφωνο 1, εάν υποθέσουμε ότι το επιθυμητό σήμα είναι η φωνή του οδηγού. Αντίστοιχα, το μικρόφωνο 4 εξασφαλίζει καλύτερο διαχωρισμό αν υποθέσουμε ότι το επιθυμητό σήμα είναι η φωνή του συνοδηγού. Τέλος, τα μικρόφωνα 7 και 8 στο πίσω μέρος εξασφαλίζουν έναν διαχωρισμό της τάξης των 5 dB σε σχέση με τις φωνές του οδηγού ή του συνοδηγού.

Στο Σχήμα 2(β), τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν το Honda CRV, όπου απεικονίζεται η διακύμανση του SNR συναρτήσει της ταχύτητας του οχήματος για διαφορετικές καταστάσεις παραθύρων. Το SNR προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ της στάθμης της φωνής και του θορύβου στο μικρόφωνο 3 (βλ. Σχήμα 1), μετά την εφαρμογή του φίλτρου A σε κάθε συστατικό. Η στάθμη της φωνής υπολογίστηκε πάλι για κανονική φωνητική προσπάθεια, αγνοώντας το γεγονός ότι οι ομιλητές ενστικτωδώς καταβάλουν μικρότερη ή μεγαλύτερη φωνητική προσπάθεια ανάλογα με τη στάθμη θορύβου [8]. Στο διάγραμμα επιβεβαιώνεται η διαίσθησή μας, ότι η

στάθμη του θορύβου αυξάνεται με την ταχύτητα αλλά και με το άνοιγμα του παραθύρου. Φαίνεται επίσης ότι η ελάττωση που επέρχεται στο SNR κατά τη μετάβαση από τελείως κλειστά (w_0) σε λίγο ανοιχτά παράθυρα (w_1) μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 8 dB στις μεγάλες ταχύτητες. Τέλος οι πολύ χαμηλές τιμές του SNR του Σχήματος 2(β) αναδεικνύουν τις σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή εφαρμογή των διαδεδομένων τεχνολογιών φωνής μέσα στα εν λόγω περιβάλλοντα

4 Συμπεράσματα

Η μελέτη των τεχνολογιών φωνής μέσα σε κινούμενα οχήματα είναι μια σημαντική προϋπόθεση για τη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη στα αυτοκίνητα του μέλλοντος. Το CAVEMOVE είναι ένα ερευνητικό έργο αφιερωμένο στη συλλογή δεδομένων ήχου για τη διευκόλυνση αυτής της μελέτης. Μαζί με τα ηχητικά δεδομένα, παρέχεται ένα API σε γλώσσα python ώστε ο χρήστης να μπορεί να συνθέτει εύκολα τα ηχητικά σήματα που αντιστοιχούν σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών συνθηκών οδήγησης. Μελλοντικά, τα ηχητικά δεδομένα θα εμπλουτιστούν με ηχογραφήσεις και από άλλα αυτοκίνητα, και το API θα σχεδιαστεί και στη γλώσσα Matlab.

5 Αναφορές

- [1] H. Hoshino, R. Terashima, T. Shimizu, and T. Wakita, “Noise robust speech recognition in a car environment based on the acoustic features of car interior noise,” The R&D Review of Toyota CRDL, vol. 39, no. 1 (2004).
- [2] T. Matheja, M. Buck, and T. Fingscheidt, “A dynamic multichannel speech enhancement system for distributed microphones in a car environment,” EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, pp. 191 (2013).
- [3] J. Yin, S. Damiano, M. Verhelst, T. van Waterschoot, and A. Guntoro, “Real-time acoustic perception for automotive applications,” in Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, pp. 1–6 (2023).
- [4] N. Kaplanis, S. Bech, J. Tervo, S. Patynen, T. Lokki, T. van Waterschoot, and S. Jensen, “Perceptual aspects of reproduced sound in car cabin acoustics,” J. Acoust. Soc. Am. 141(3), pp. 1459–1469, (2017).
- [5] Samarasinghe, P.N., Zhang, W. and Abhayapala, T.D., “Recent advances in active noise control inside automobile cabins: Toward quieter cars,” IEEE Signal Processing Magazine, 33(6), pp.61-73.
- [6] Talkbox manual, <https://www.ntiaudio.com/Portals/0/data/en/TalkBox-Manual.pdf>
- [7] CAVEMOVE API, <https://github.com/SPL-FORTH-ICS/CAVEMOVE>
- [8] V. Summers, D. Pisoni, R. Bernacki, R. Pedlow, and M. Stokes, “Effects of noise on speech production: Acoustic and perceptual analyses,” J. Acoust. Soc. Am. 84(3), pp. 917–928 (1988).



Ζητήματα και προβληματισμοί στη χωρική μείξη έργων δημοφιλούς μουσικής

Ιωάννης Μπαξεβάνης,
ΜΑ Τέχνες και Τεχνολογίες του Ήχου,
Ξάνθου 33 – Γαλάτσι, Αθήνα,
s20baxe@ionio.gr

Μηνάς Εμμανουήλ,
Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Μουσικών
Σπουδών, Ιόνιο Παν/μιο, Κέρκυρα,
eminas@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τεχνολογίες χωρικού ήχου (Spatial Audio) πληθαίνουν διαρκώς, προσφέροντας στους δημιουργούς, στους παραγωγούς αλλά και στο μουσικόφιλο κοινό νέες δυνατότητες στην ηχητική δημιουργία και βιωματικές εμπειρίες κατά την ακρόαση. Μέσω της τρισδιάστατης ηχητικής προβολής, οι ακροατές μπορούν να εμβυθιστούν στη μουσική και να απολαύσουν μια ολοκληρωτική (φυσική ή μη) και πολυδιάστατη εμπειρία ακρόασης. Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η αξιοποίηση τεχνολογιών χωρικής μείξης σε δημοφιλή μουσικά ιδιώματα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μείξεις, τριών διαφορετικών μουσικών έργων: στερεοφωνική μείξη (stereo), αμφιωτική μείξη (binaural stereo) και μείξη σε περιβάλλον Dolby Atmos. Στόχος ήταν η καταγραφή και η εξέταση ζητημάτων που προέκυψαν κατά την διαδικασία της μείξης των μουσικών έργων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις χωρικές μείξεις (με επίκεντρο τη μείξη σε Dolby Atmos), τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και τα πιθανά ερωτήματα που εγείρονται για τη μελλοντική εξέλιξη των σχετικών τεχνολογιών. Επιπλέον στόχος είναι η διερεύνηση ζητημάτων αισθητικής που προκύπτουν από την εφαρμογή τεχνολογιών χωρικής μείξης στα δημοφιλή μουσικά ιδιώματα. Σημαντικό πεδίο εξαγωγής συμπερασμάτων αποτέλεσε η ανάλυση των δεδομένων από ακροάσεις που πραγματοποιήθηκαν από εξειδικευμένο κοινό. Τα δεδομένα από αυτές τις ακροάσεις παρουσίασαν μεγάλο ενδιαφέρον διότι μετέφεραν πληροφορίες για το πώς γίνονται αντιληπτές οι παραπάνω τεχνολογίες από το κοινό.

Issues and concerns in the spatial mixing of popular music

ABSTRACT

Spatial Audio technologies are proliferating, offering creators, producers and music lovers alike new possibilities in sound creation and listening experiences. Through 3D audio projection, listeners can immerse themselves in music and enjoy a more immersive (physical or other) and multidimensional listening experience. These technologies are constantly evolving. The use of spatial mixing technologies

in popular music idioms was studied for this paper. Three different mixes of three different musical works were performed: stereo mixing, binaural stereo mixing and mixing in Dolby Atmos environment. The aim was to record and examine issues that arose during the process of mixing the musical works and to draw conclusions about spatial mixing (with a focus on mixing in Dolby Atmos), its advantages and disadvantages, and potential questions raised for the future development of related technologies. An additional aim has been to investigate issues of aesthetics arising from the application of spatial mixing technologies to popular music idioms. An important area of inference was the analysis of data from auditions conducted by a specialized audience. The data from these auditions was very interesting because it conveyed information about how these technologies are perceived by the audience.

Εισαγωγή

Βασικός στόχος ενός μουσικού παραγωγού είναι να συγκεράσει το τεχνικό σκέλος μιας μείξης με τη μουσική σύνθεση, σε συνεργασία με τον συνθέτη και τους μουσικούς. Μια σημαντική ανάγκη που προκύπτει στην πορεία των χρόνων από τους μουσικούς παραγωγούς, τους ηχολήπτες και όλους τους εμπλεκόμενους με την μουσική παραγωγή είναι η επιθυμία το μουσικό υλικό να αναπαράγεται όσο το δυνατόν εφάμιλλα προς το πρωτότυπο, είτε αναπαράγεται σε μια συναυλία είτε με χρήση ακουστικών - κινητού ή ακόμα και σε ιδιωτικό χώρο ακρόασης, που αποτελεί ζητούμενο για όλα τα είδη μουσικής. Τα σύγχρονα συστήματα αναπαραγωγής της μουσικής προσφέρουν νέες δυνατότητες για την υλοποίηση του σκοπού αυτού.

1. Ιστορική Αναδρομή της αναπαραγωγής

Οι τεχνολογίες ηχογράφησης και αναπαραγωγής ήχου εξελίχθηκαν σημαντικά κατά τον 20^ο αιώνα, αρχικά μέσω μονοφωνικών συστημάτων. Σε αυτά, ο ήχος καταγράφεται με ένα μικρόφωνο και αναπαράγεται μέσω ενός ηχείου, δημιουργώντας μια μονοφωνική ηχητική εγγραφή. Καθώς ο μονοφωνικός ήχος εξελισσόταν, το 1933, ο Alan Dower Blumlein [1] ανακάλυψε την στερεοφωνία, συνδέοντας την καταγραφή ήχου με την ακρόαση. Η βασική ιδέα του Blumlein ήταν ότι το σήμα από δύο μικρόφωνα μπορεί να κατευθυνθεί σε δύο ηχεία, επιτρέποντας έτσι την στερεοφωνική ηχητική προβολή. Σύντομα φάνηκε η ανάγκη για συστήματα περιφερειακής ηχητικής προβολής, που θα κύκλωναν ηχητικά το κοινό, προσφέροντας πιο ολοκληρωμένη εμπειρία ακρόασης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1930, οι Steinberg και Snow [2] παρουσίασαν μια διάταξη ηχογράφησης με τρία μικρόφωνα και τρία ηχεία αναπαραγωγής, βελτιώνοντας την αναπαραγωγή βάθους πεδίου στον κινηματογράφο. Το κεντρικό ηχείο προσέφερε καλύτερη ευκρίνεια στην ομιλία. Το 1939, η Disney χρησιμοποίησε το Fantasound στην ταινία *Fantasia*, εισάγοντας πολυκαναλική αναπαραγωγή ήχου με το ηχείο "Voice of God", ένα ακόμα κανάλι διακριτού ήχου που αντιστοιχεί σε ένα ηχείο τοποθετημένο ψηλά στην μέση της αίθουσας ακρόασης. Το 1950, το Cinemascope της 20th Century Fox παρουσίασε μια νέα διάταξη με τρία κεντρικά ηχεία και ένα μονοφωνικό κανάλι για περιφερειακό ήχο. Στην συνέχεια έγινε χρήση υπογούφερ (subwoofer), που πρόσθεσε ένα επιπλέον κανάλι αναπαραγωγής χαμηλών συχνοτήτων (LFE). Στη δεκαετία του 1980, το Baby Boomer της Dolby, με διάταξη LCRS, έγινε δημοφιλές

αναπαράγοντας μονοφωνικό περιφερειακό ήχο. Οι περιφερειακές διατάξεις, γνωστές ως Surround, εστίασαν στον οριζόντιο άξονα και δεν περιλάμβαναν ηχητική πληροφορία καθ' ύψος. Η τεχνολογία Quadraphonic [3], που εισήγαγε ο M. Gerzon το 1974, θεωρείται το θεμέλιο του περιφερειακού ήχου και αποτέλεσε τη βάση για τις μετέπειτα έρευνες και μελέτες στον τομέα του χωρικού ήχου. Η έρευνα του Gerzon σχετικά με την αναπαραγωγή ήχου σε περισσότερα από δύο ηχεία και την ηχογράφηση με περισσότερα από δύο μικρόφωνα, οδήγησε στη χρήση του όρου "periphonic" [4]. Τόνισε την ανάγκη για περισσότερα διακριτά κανάλια ηχητικού σήματος, προκειμένου να αποτυπωθούν όλες οι διαστάσεις του χώρου. Το 1974 εμφανίστηκε η ορχήστρα ηχείων Acousmonium [5] η οποία επέφερε μια σημαντική εξέλιξη στην πολυκαναλική αναπαραγωγή.

2. Χωρικός ήχος

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες, οι τεχνολογίες χωρικής μείξης και αναπαραγωγής προσπαθούν να επιτύχουν τη δημιουργία και την προβολή ενός ολοκληρωτικού, σφαιρικού ή ημισφαιρικού ηχητικού περιβάλλοντος. Υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Channel-based
- Object-based
- Scene-based
- Hybrid systems (συνδυασμοί των προηγούμενων)

Όλα αυτά τα συστήματα επιχειρούν να αποτυπώσουν τις θέσεις και τις κινήσεις ήχων στο χώρο, προσφέροντας μια εμπυθιστική εμπειρία στους ακροατές. Στις περισσότερες χωρικές διατάξεις χρησιμοποιούνται τρίγωνα ηχητικής κάλυψης τα οποία συμβάλουν καθοριστικά στον εντοπισμό της προέλευσης του ήχου. Ο Pulkki [6] εξηγεί πώς ο ήχος μπορεί να διαμοιραστεί σωστά σε οποιαδήποτε διάταξη ηχείων, επιτυγχάνοντας ακριβή χώρο τοποθέτηση σε τρεις διαστάσεις με τη χρήση χωρικού αποκωδικοποιητή (renderer). Η αναπαραγωγή χωρικού ήχου απαιτεί επεξεργασία του σήματος ανά ήχο ή ομάδα ήχων και όχι σε ολόκληρη την στερεοφωνική μείξη. Αν και υπάρχουν τεχνολογίες που δημιουργούν ψευδαισθήσεις τρισδιάστατης χωρικής μείξης, δεν θα αναλυθούν εδώ.

Το Dolby Atmos με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι χωρικές μείξεις της παρούσας έρευνας, βασίζεται στη διάταξη ηχείων 7.1.4 και είναι ένα υβριδικό σύστημα αναπαραγωγής (Object-based & Channel-based,) που στην πραγματικότητα δεν εξαρτάται από τον ακριβή αριθμό των ηχείων, καθώς ένας αποκωδικοποιητής (renderer) αναλαμβάνει το έργο να τοποθετήσει τα ηχητικά αντικείμενα στο ηχητικό πεδίο. Σε οποιαδήποτε διάταξη ηχείων συμβατή με το σύστημα ο αποκωδικοποιητής θεωρείται ικανός να αναπαράγει χωρικές μείξεις με το ίδιο αποτέλεσμα. Ένα παράδειγμα υβριδικού συστήματος που υποστηρίζει όλους τους τύπους αναπαραγωγής (hybrid) είναι το Auro 3D.

Η διάκριση μεταξύ των συστημάτων Channel-based και Object-based είναι κρίσιμη για την κατανόηση της αναπαραγωγής χωρικού ήχου. Στα Object-based συστήματα, οι ηχητικές πηγές θεωρούνται "ηχητικά αντικείμενα" με συντεταγμένες τριών διαστάσεων (x, y, z), επιτρέποντας την αναπαραγωγή σε οποιαδήποτε διάταξη ηχείων μέσω ειδικού λογισμικού (renderer) που αποκωδικοποιεί τις θέσεις και τις

κινήσεις τους (speaker agnostic). Ο renderer διαχειρίζεται τη διανομή του ήχου ανάλογα με τη διάταξη του συστήματος, καθιστώντας τη λειτουργία των Object-based συστημάτων πιο ευέλικτη και ικανή να αποδώσει έναν πιο ολοκληρωμένο ηχητικό χώρο.

Αντίθετα, τα Channel-based συστήματα, όπως το 7.1, συνδέουν συγκεκριμένα κανάλια ήχου με καθορισμένα ηχεία, περιορίζοντας τη δυνατότητα αναπαραγωγής του ηχητικού/μουσικού υλικού σε ανταλλακτικές διατάξεις προβολής, καθώς αυτό θα αλλοίωνε τις θέσεις των ήχων στο χώρο (όπως είχαν διαμορφωθεί αρχικά) και θα επηρέαζε σημαντικά την αντίληψη του έργου από τους ακροατές.

Η τεχνολογία Ambisonics είναι μια μέθοδος καταγραφής και αναπαραγωγής ηχητικών πηγών σε τρεις διαστάσεις, η οποία εστιάζει στις κατευθυντικές ιδιότητες του ηχητικού πεδίου. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '70 και σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας και παιχνίδια πρώτου προσώπου. Χαρακτηρίζεται από τον όρο «Τάξη» (Order), που δηλώνει τον αριθμό των διακριτών καναλιών που προκύπτουν κατά την λήψη ή την αναπαραγωγή σε αυτή την τεχνολογία. Εφαρμογές υψηλής τάξης (Higher Order Ambisonics, HOA) επιτρέπουν τη μοντελοποίηση ηχητικών πεδίων με μεγαλύτερη ακρίβεια και αναπαραγωγή σε σφαιρικό πεδίο 360°. Η διαδικασία καταγραφής είναι ανεξάρτητη από την αναπαραγωγή, επιτρέποντας την ανασύνθεση του ήχου σε οποιαδήποτε διάταξη ηχείων.

Η ακρόαση με ακουστικά υπερτερεί ως η πιο άμεση μέθοδος, καθιστώντας την πολύ δημοφιλή για τον μέσο ακροατή. Η αμφιωτική ακρόαση, που ανακαλύφθηκε το 1935, βασίζεται στην αμφιωτική ηχογράφηση και περιλαμβάνει τεχνικές όπως η χρήση κεφαλών αμφιωτικής ακοής, ή εναλλακτικά δίσκων Jecklin [7], οι οποίες επιτρέπουν την αναπαραγωγή χωρικών καταγραφών.

3. Μεθοδολογία Έρευνας

Ο παραγωγός οφείλει να έχει ένα βασικό στρατηγικό σχέδιο χωρικής μείξης πριν ξεκινήσει τη μείξη σε χωρικό περιβάλλον. Η ύπαρξη σχεδίου, χωροτοποθέτησης, σύμφωνα με τις εικόνες που θέλει να αποτυπώσει και ανάλογα με το είδος της μουσικής, θα βοηθήσει τον παραγωγό στη λήψη γρήγορων αποφάσεων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθέσεις ακουστικού περιεχομένου του κανονίστα Τάσου Πούλιου και μίας σύνθεσης ηλεκτρονικής μουσικής του σχήματος Lip Forensics. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η ηχογράφηση και η μείξη των συνθέσεων του κ. Πούλιου έγιναν από εμένα σε αντίθεση με των Lip Forensics που έγιναν από τον Κ. Μαρούλη και ακολουθήθηκε το δικό του στερεοφωνικό mix ως οδηγός στην αισθητική προσέγγιση. Σε όλη τη διαδικασία οι ήδη ολοκληρωμένες στερεοφωνικές μείξεις αποτέλεσαν σημείο αναφοράς. Με την πρώτη ακρόαση σε χωρικό περιβάλλον ελευθερώθηκαν συχνοτικές περιοχές και δυναμικό εύρος σε όλα τα μουσικά όργανα και ήχους με αποτέλεσμα πολύ εντυπωσιακό. Ο λόγος που ξεκίνησε έτσι η εργασία ήταν για να υπάρχει μια ηχητική και αισθητική σταθερά, που ήταν η στερεοφωνική μείξη. Στη μείξη, έγινε προσπάθεια να έχει ο ακροατής την αίσθηση κύκλωσης των οργάνων και να είναι μέρος τους ηχητικού πεδίου.

Στην συνέχεια εξειδικευμένο κοινό απάντησε σε ερωτήσεις που αφορούσαν την αισθητική αλλά και την τεχνική και προσωπική οπτική, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Κατά τη διάρκεια της χωρικής μείξης διαπιστώθηκε ότι η αναπαραγωγή σε διάταξη ηχείων Dolby Atmos διέφερε κατά πολύ από την αμφιωτική χωρική μείξη ως προς το συνολικό ηχητικό πεδίο. Ως εκ τούτου, η αμφιωτική χωρική μείξη πραγματοποιήθηκε με διαφορετικές ρυθμίσεις του αποκωδικοποιητή ώστε να υπάρξει το ίδιο αισθητικό αποτέλεσμα για τον ακροατή. Η επιλογή της διάταξης του Dolby Atmos έγινε λόγω της φορητότητας του τελικού ADM αρχείου σε διαφορετικούς χώρους. Για αυτό και έχει μεγάλη διάδοση σε όλες τις μουσικές πλατφόρμες τα τελευταία χρόνια.

4. Συμπεράσματα

Το πλεονέκτημα της εφαρμογής/ χρήσης του Dolby Atmos που έγινε σαφές εξ αρχής ήταν η διαχείριση του δυναμικού εύρους της ηχητικής στάθμης των μείξεων. Μελετώντας τις απαιτήσεις στις διαδικτυακές πλατφόρμες αναπαραγωγής για χωρικό ήχο παρατηρήθηκε πως δεν χρειάζεται μεγάλη συμπίεση του δυναμικού εύρους. Επομένως η αναπαραγωγή χωρικού ήχου ορθώς αντιτίθεται στον πόλεμο της ακουστότητας (loudness war) και την αλόγιστη χρήση συμπίεστών σε όλα τα είδη μουσικής. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα του Dolby Atmos, και πιθανόν και όλων των σχετικών τεχνολογιών, είναι το πλήθος των ηχείων. Βοηθά τον παραγωγό να δημιουργήσει ηχητικές εικόνες χωρίς να περιορίζεται από τα δύο ηχεία της στερεοφωνίας. Η συχνотική ελευθέρωση των μουσικών οργάνων και των ήχων στα είδη ηλεκτρονικής μουσικής δίνουν την ελευθερία στον παραγωγό να προσεγγίσει αισθητικά το είδος την μουσικής χωρίς τους περιορισμούς του δυναμικού εύρους που έχει η στερεοφωνία στο επίπεδο του streaming. Σαφέστατα υπάρχουν πιο σύνθετοι και ευέλικτοι τρόποι αναπαραγωγής, αλλά το Dolby Atmos έχει μεγάλη αναγνωρισιμότητα τα τελευταία χρόνια και εξελίσσεται συνέχεια σε όλα τα επίπεδα. Οι χροιές των οργάνων και οι ήχοι, καθώς και τα ηχητικά πεδία που δημιουργήθηκαν με μείξη αναφοράς την στερεοφωνική είναι εφάμιλλα με εκείνα των δυο χωρικών μείξεων. Είναι αξιοσημείωτο ότι η αναπαραγωγή των ιδίων μείξεων σε διαφορετικούς χώρους και με διαφορετικούς τύπους ηχείων απέδωσε εφάμιλλα αποτελέσματα λόγω της χρήσης αποκωδικοποιητή Dolby Atmos και βέβαια της εφαρμογής της ίδιας διάταξης ηχείων. Το πλήθος των ηχείων στη διάταξη βοηθάει στην συνέπεια του ήχου και της συνολικής αίσθησης χωρίς απαραίτητα να δεσμεύεται τόσο από τον χαρακτήρα του κάθε ηχείου όσο και από το χώρο της αναπαραγωγής.

Πρέπει να τονιστεί ότι το τελικό αρχείο αμφιωτικής μείξης έγινε ξεχωριστά, καθώς δεν λειτουργούσε σωστά ηχητικά το αρχείο ADM και όλα τα export και convert που εκτελεί. Κάτι που σε επαγγελματικό επίπεδο πρέπει να συνυπολογίζει ο παραγωγός και να δημιουργεί ένα μέσο όρο ηχείου - ακουστικού. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η μουσική βιομηχανία χρησιμοποιεί δύο αποκωδικοποιητές στην αναπαραγωγή Dolby – Apple κάτι που δυσκολεύει ακόμα περισσότερο την πρόβλεψη του ηχητικού αποτελέσματος. Το σωστό θα ήταν υπάρχει ένας αποκωδικοποιητής ώστε να γνωρίζει ο παραγωγός το τελικό ακουστικό αποτέλεσμα χωρίς να επεμβαίνει η κάθε εταιρεία streaming.

Η αμφιωτική χωρική μείξη χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στην χρήση των χώρων. Όλοι οι χώροι (reverbs) που στην χωρική μείξη λειτουργούσαν ως channel based (beds) δεν χρησιμοποιήθηκαν επειδή κρίθηκε ότι δημιουργούσαν περισσότερα

προβλήματα παρά εξυπηρετούσαν στην αντίληψη των σχεδιασμένων χώρων. Σε αντίθεση με την διάταξη ηχείων όπου ενδείκνυται για δημιουργία ηχητικών τοπίων, με αρκετή λεπτομέρεια και χωρίς εικονικές ασάφειες όπως κάποιες φορές παρουσιάζονται στην στερεοφωνία.

Ένας ακόμα συμβιβασμός και υπολογισμός που πρέπει να κάνει ο παραγωγός στην αμφιωτική μείξη είναι να προσέξει τις χαμηλές συχνότητες καθώς δεν υπάρχει η εμπλοκή του καναλιού χαμηλών συχνοτήτων (LFE). Η λύση που λειτουργήσει στην εργασία αυτή ήταν η συμπίεση των χαμηλών συχνοτήτων στην αμφιωτική μείξη, σε αντίθεση με την διάταξη των ηχείων που ήταν πιο μουσικές και πιο ελεύθερες, ώστε να μπορέσει ο μέσος ακροατής που θα χρησιμοποιήσει ακουστικά να έχει αίσθηση της μείξης του παραγωγού. Εν κατακλείδι, η μείξη με ακουστικά και ηχεία σκόπιμο είναι να μην είναι οι ίδιες. Ο παραγωγός καλείται να βρει τις λύσεις ανάλογα με το ύφος και τις ηχητικές προτεραιότητες που αυτός θα θέσει.

Έγινε προσπάθεια και στις τρεις μείξεις ήχου να σχεδιαστούν κάποιες κινήσεις ώστε να γίνει ένας ήχος αισθητός εντός του πεδίου ακρόασης και κοντά στους ακροατές, αλλά αυτό δεν ήταν εφικτό. Το ημισφαιρικό ηχητικό πεδίο που αναπαράγεται από το Dolby Atmos, είναι πολύ ικανοποιητικό και πειστικό στο να αποδίδει θέσεις και κινήσεις ήχων στην περιφέρεια του ημισφαιρίου και εικονικά εκτός αυτού, αλλά στο εντός του ημισφαιρίου πεδίο διαπιστώθηκε αδυναμία του συστήματος να αναπαράγει πειστικά ηχητικά είδωλα. Στην πρώτη προσέγγιση της μείξης του συστήματος παρατηρήθηκε ότι είχε γίνει διασπορά των οργάνων σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους και αυτό κυρίως λόγω του ενθουσιασμού για τις δυνατότητες του συστήματος. Η αλλαγή έντασης στα ηχητικά αντικείμενα βοήθησε ως ένα βαθμό στην προσέγγιση να τοποθετηθούν κοντά στον ακροατή, αλλά διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε ανάλυση και διαύγεια εντός του πεδίου της σφαίρας. Ίσως αυτό να ήταν μια πρόταση εξέλιξης σε κάποια χωρική διάταξη.

Η απόκριση των ηχητικών αντικειμένων στην εντός του πεδίου ηχητική σφαίρα ήταν σαφώς καλύτερη στις αμφιωτικές μείξεις ήχου. Επίσης παρατηρήθηκε ότι υπήρχε η τάση να τοποθετούνται όλα τα ηχητικά αντικείμενα σε όλες τις μείξεις προς τα επάνω με χρήση της λειτουργίας «height» του panner του ηχητικού αντικειμένου. Πολύ πιθανόν να οφείλεται στην προσπάθεια να απεικονιστεί μια μεγάλη συναυλία όπου ο ήχος ακούγεται από ψηλά, επιβλητικός και λεπτομερής. Δεν είναι λογικό να γίνεται ακρόαση μουσικής και να έχουμε την αίσθηση ότι ο μουσικός είναι κάτω από τον ακροατή. Η ανύψωση των ηχητικών αντικειμένων παρατηρήθηκε ακόμα και στο ηχητικό αντικείμενο του μπάσου το οποίο δεν αποτέλεσε ζήτημα ιδιαίτερου προβληματισμού, καθώς η διάταξη και η συνολική αίσθηση στη συχνοτική απόκριση του Dolby Atmos βοηθάει τον παραγωγό σε τέτοιες προσεγγίσεις.

Ίχνη όπως αυτό του hi-hat που έχουν υψηλές συχνότητες και ηχογραφήθηκαν με τεχνικές κοντινής τοποθέτησης, κρίθηκε σωστό να μην χρησιμοποιηθούν γιατί επηρέαζαν αρνητικά τη συνολική εικόνα των τυμπάνων και των άλλων μουσικών οργάνων. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στη διαρροή των σημάτων μεταξύ των μικροφώνων κατά την ηχογράφηση. Κάποιες φορές το γεγονός αυτό μπορεί να λειτουργεί θετικά αλλά στην τρισδιάστατη μείξη χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην αλλοιωθεί η θέση των ηχητικών ειδώλων στο ηχητικό πεδίο που ο παραγωγός επιθυμεί να δημιουργήσει. Επίσης παρατηρήθηκε ότι τα ηχητικά αντικείμενα λειτουργούν καλύτερα όταν το ίχνος είναι μονοφωνικό. Τα στερεοφωνικά ίχνη επηρεάζονται από την επεξεργασία του αποκωδικοποιητή, όταν

αυτά κινούνται στον τεχνητό χώρο, διότι επηρεάζεται η σχέση φάσης μεταξύ των δυο τους ιχνών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την στιγμιαία αλλοίωση της χροιάς τους.

Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου έδειξαν ότι οι ακροατές θεωρούν σωστή την εξέλιξη της μουσικής βιομηχανίας προς τον χωρικό ήχο. Επίσης θεωρούν πολύ εντυπωσιακή την διάταξη Dolby Atmos και πολύ πιθανόν αρκετοί να μην απόλαυσαν την αμφιωτική ακρόαση λόγω του ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν personal HRTF καμπύλες, κάτι που θα βοηθούσε στην εξατομίκευση της ακρόασης για κάθε άτομο ξεχωριστά [7].

Τέλος, οι συμμετέχοντες δήλωσαν στο ερωτηματολόγιο ότι οι μείξεις και με τους τρεις τρόπους αναπαραγωγής είχαν κοινό αποτέλεσμα και αίσθηση. και ότι το είδος μουσικής στο οποίο ταιριάζει καλύτερα ο χωρικός ήχος είναι η ηλεκτρονική μουσική. Εν κατακλείδι, αποτελεί ζήτημα προσωπικής και αισθητικής επιλογής του παραγωγού να επιλέξει ανάλογα με το είδος της μουσικής για το οποίο εργάζεται τις κινήσεις, υπερβολικές ή μη, των ηχητικών αντικειμένων μέσα στη διάταξη.

5. Αναφορές

- [1] Bluemlein A. (1933). United Kingdom Patent, 394324.
- [2] Steinberg, J. C., & Snow, W. B. (1934). Physical factors. Bell System Technical Journal, 13(2), 245-258.
- [3] Gerzon, M. A. (1973). Periphony: With-height sound reproduction. Journal of the audio engineering society, 21(1), 2-10.
- [4] Gerzon, M. A. (1975, March). The design of precisely coincident microphone arrays for stereo and surround sound. In Audio Engineering Society Convention 50. Audio Engineering Society.
- [5] Bayle, F. (1993). Musique acousmatique: propositions..... positions.
- [6] Pulkki, V. (1997). Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning. Journal of the audio engineering society, 45(6), 456-466.
- [7] Hoene, C., Patino Mejia, I. C., & Cacerovschi, A. (2017, May). MySofa—Design Your Personal HRTF. In *Audio Engineering Society Convention 142*. Audio Engineering Society.



Στοχευμένη Ενεργή Ακύρωση Θορύβου με Μετρικές Ενόχλησης

Παναγιώτης Ζάχος^{1,*}, Γιώργος Μοιράγιας¹, Παναγιώτης Χατζηαντωνίου¹, Ιωάννης Μουρτζόπουλος¹

¹Audio & Acoustic Technology Group, Wire Communications Laboratory Electrical & Computer Engineering Dep. University of Patras, 26500, Patras, Greece

*p_zachos@ac.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία προτείνεται ένα νέο σύστημα ANC για ακουστικά που βασίζεται στη εξασθένιση πηγών που θεωρούνται ιδιαίτερα ενοχλητικές από τους ακροατές. Αρχικά διαμορφώνεται μια νέα μετρική disturbance μέσω μιας υποκειμενικής αξιολόγησης η οποία, καθοδηγεί το προτεινόμενο σύστημα ANC αναλύοντας την ακουστική σκηνή μέσω ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης και οδηγεί έναν διαμορφωτή δέσμης στην πηγή που θεωρείται η πιο ενοχλητική. Ο διαμορφωτής δέσμης, οδηγείται από μια συστοιχία μικροφώνων που σχηματίζεται από τα δύο ήδη υπάρχοντα μικρόφωνα αναφοράς που βρίσκονται στο εξωτερικό περίβλημα των ακουστικών και καθοδηγεί τον ANC controller ώστε να επιτευχθεί βελτιωμένη απόσβεση της κύριας ενοχλητικής πηγής, ενώ παράλληλα εξασθενείται το πεδίο θορύβου υποβάθρου σε αποδεκτά επίπεδα.

Targeted Beamforming Active Noise Control Based on Disturbance Metrics

ABSTRACT

In this paper, a novel ANC scheme for headphones is proposed based on the attenuation of sources that are considered particularly annoying by listeners. First, a disturbance metric, formulated through a subjective evaluation, guides the proposed ANC system by analyzing the acoustic scene through a machine learning model and drives a beamformer to the source that is considered the most disturbing. The beamformer, driven by a microphone array formed by the two existing reference microphones located in the outer casing of the headset, guides the ANC controller to achieve improved attenuation of the main disturbing source while attenuating the background noise field to acceptable levels.

Εισαγωγή

Παρόλο που η τεχνολογία ANC υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες, εφαρμόστηκε σχετικά πρόσφατα σε ακουστικά, τα οποία είναι οι πιο δημοφιλείς προσωπικές συσκευές ακρόασης. Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές ANC χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο Filtered-x Least Mean Squares (FxLMS) λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων του. Ένα κοινό μεταξύ αυτών των εφαρμογών είναι ότι αγνοούν τη χωρική ευαισθησία των συστημάτων ANC.

Μια νέα προσέγγιση στοχευμένης ακύρωσης θορύβου (TBANC) που εξασθενεί συγκεκριμένες ενοχλητικές πηγές σε μια ακουστική σκηνή, ενώ παράλληλα ελαττώνει το θόρυβο υποβάθρου σε αποδεκτά επίπεδα, προτείνεται στο [1], χρησιμοποιώντας έναν Διαμορφωτή Ζώνης στο πεδίο του χρόνου (TDBF).

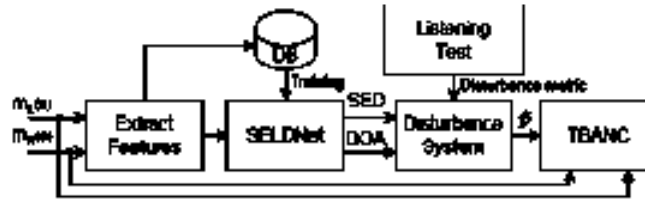
Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια επέκταση της προσέγγισης TBANC, η οποία συμβολίζεται ως TBANC-D, όπου εξετάζονται σενάρια πολλαπλών πηγών παρουσία διάχυτου θορύβου. Η προτεινόμενη TBANC-D είναι σε θέση να λειτουργήσει σε σκηνές όπου δεν υπάρχει καμία, μία ή πολλαπλές πηγές. Στην περίπτωση πολλαπλών πηγών, μια μοναδική πηγή που θεωρείται εξαιρετικά ενοχλητική, καθοδηγούμενη από μια νέα μετρική Disturbance που καθορίζει τη ενόχληση που προκαλείται από διαφορετικούς θορύβους σε ένα σύνθετο ηχητικό πεδίο, εξασθενείται εντονότερα.

1. Μέθοδος

Το ANC που προτείνεται σε αυτή την εργασία βασίζεται στην υπόθεση ότι όταν ένας ακροατής βρίσκεται σε ένα σύνθετο ηχητικό πεδίο, μπορεί να υπάρχει μια συγκεκριμένη πηγή που είναι ιδιαίτερα ενοχλητική και συνεπώς συνδέεται με υψηλότερη μετρική Disturbance, η οποία στο εξής αναφέρεται ως κύρια πηγή θορύβου. Στην πράξη η παρουσία μιας τέτοιας πηγής μπορεί να ανιχνευθεί με έναν απλό ανιχνευτή διαφορικής ενέργειας, δηλαδή όταν η στάθμη του θορύβου από ένα μικρόφωνο υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, όπως περιγράφεται στην [1].

Ο ελεγκτής ANC επικεντρώνεται στην εξασθένηση της κύριας πηγής θορύβου. Για να επιτευχθεί η εξασθένηση του ηχητικού πεδίου με ιδιαίτερη έμφαση στην πρωτεύουσα πηγή θορύβου, επιλέγεται ως βάση ο ελεγκτής πολλαπλών αναφορών (MRFANC) [2] και επεκτείνεται με τη χρήση ενός beamformer, που στην παρούσα εργασία υλοποιείται με τη μορφή ενός απλού TDBF.

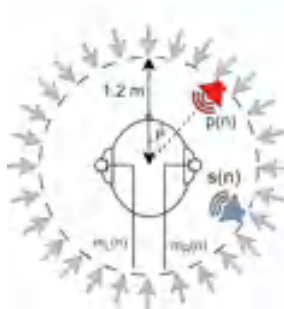
Μια επισκόπηση του προτεινόμενου συστήματος TBANC-D παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1, με τα σήματα που καταγράφονται από το αριστερό και το δεξί μικρόφωνο να χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών, τα οποία στη συνέχεια τροφοδοτούνται στο μοντέλο Ανίχνευσης Ηχητικών Γεγονότων και Εντοπισμού Πηγών (SELD). Το μοντέλο SELD εξάγει κατανομές, οι οποίες δείχνουν ποιες κατηγορίες πηγών είναι ενεργές στην τρέχουσα σκηνή, καθώς και τις εκτιμήσεις κατεύθυνσης άφιξης (DOAE), οι οποίες δείχνουν την κατεύθυνση άφιξης κάθε πηγής. Στη συνέχεια, το σύστημα Disturbance, δεδομένων των εκτιμήσεων SED και DOA, τελικά εξάγει την DOA της κύριας ενοχλητικής πηγής $\hat{p}$.



Σχήμα 1.1 Επισκόπηση συστήματος TBANC-D.

1.1 Διατύπωση προβλήματος

Συνήθως ένας χρήστης ακουστικών βρίσκεται μέσα σε ένα σύνθετο ηχητικό πεδίο που αποτελείται από διάχυτο, χωρικά λευκό θόρυβο, μαζί με μια κύρια πηγή θορύβου που εκπέμπει ένα ιδιαίτερα ενοχλητικό για τον ακροατή σήμα $p(n)$ και μια λιγότερο ενοχλητική δευτερεύουσα πηγή θορύβου $s(n)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Σε ένα τέτοιο σενάριο, το δεξί αυτί που βρίσκεται πλησιέστερα στην πρωτεύουσα πηγή θορύβου θεωρείται ότι είναι το *Καλό-Αυτί* με την έννοια ότι η ενέργεια των $p(n)$ και $s(n)$ είναι σημαντικά μεγαλύτερη στο σήμα που καταγράφεται από το αντίστοιχο μικρόφωνο αναφοράς.



Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση προβλήματος. Η πρωτεύουσα πηγή $p(n)$ με κόκκινο ηχείο ενώ η δευτερεύουσα πηγή $s(n)$ με μπλε. Οι ευρυζωνικές πηγές λευκού θορύβου φαίνονται με γκρι βέλη.

Τα σήματα που καταγράφονται από τα μικρόφωνα αναφοράς $m_L(n)$ και $m_R(n)$, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το φαινόμενο σκίασης του κεφαλιού. Δεδομένου ότι η ακουστική σκίαση εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της πηγής [3] μπορεί να υπολογιστεί ως η σχετική συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ των 2 καναλιών της συνάρτησης μεταφοράς που σχετίζεται με το κεφάλι (HRTF) ως εξής

$$HS(\omega, \theta) = \frac{HRTF_{BE}(\omega, \theta)}{HRTF_{GE}(\omega, \theta)} \quad (1.1)$$

Ο θόρυβος που καταγράφεται από το μικρόφωνο αναφοράς στην πλευρά του καλού αυτιού λόγω μιας πηγής θορύβου που εκπέμπει σήμα $\xi(n)$ θεωρείται ότι φτάνει ως έχει με απλή καθυστέρηση, ενώ ο θόρυβος που καταγράφεται από το μικρόφωνο στην πλευρά του κακού αυτιού επηρεάζεται από το αντίστοιχο φίλτρο σκιάς κεφαλής που υπολογίζεται από την Εξ. (1.1). Τα σήματα δίνονται από

$$\begin{aligned} m_{GE}(n) &= \xi(n - N) \\ m_{BE}(n) &= m_{GE}(n) * HS(\omega, \theta) \end{aligned} \quad (1.2)$$

όπου m_{GE} και m_{BE} συμβολίζουν τα σήματα που καταγράφονται από το καλό αυτί και το κακό αυτί αντίστοιχα, $\xi(n - N)$ συμβολίζει μια πηγή θορύβου τοποθετημένη σε γωνία θ στο οριζόντιο επίπεδο που φθάνει με καθυστέρηση N λόγω της απόστασής της από το καλό αυτί. Ανάλογα με τη γωνία θ της πηγής θορύβου, το ρόλο του Καλού Αυτιού αναλαμβάνει το δεξί αυτί για $-180^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ ή το αριστερό αυτί για $180^\circ < \theta < 0^\circ$ όπου στις 0° , βρίσκεται ακριβώς μπροστά από τον ακροατή και με το θ να αυξάνεται αριστερόστροφα.

1.2 Σύστημα Disturbance

Σκοπός του συστήματος Disturbance είναι να προσδιορίσει ποιο από τα ενεργά ηχητικά γεγονότα αντιστοιχεί στην κύρια πηγή θορύβου σε κάθε σενάριο, με βάση τις αντίστοιχες μετρικές Disturbance που αξιολογούνται από τους αξιολογητές μέσω μιας δοκιμής ακρόασης, και στη συνέχεια να παρέχει στο TBANC τη γωνία της κύριας πηγής θορύβου $\hat{\theta}$. Στην υποκειμενική αξιολόγηση συμμετείχαν 24 άτομα, οι οποίοι αυτοαναφέρθηκαν ως ακροατές με φυσιολογική ακοή. Για το πείραμα επιλέχθηκαν τρία αποσπάσματα θορύβου από κάθε μονοφωνική ηχογράφιση που περιγράφεται στην Ενότητα 1.3 με διάρκεια 10 δευτερολέπτων, τα οποία κανονικοποιήθηκαν ως προς το Loudness στα -22 LUFS. Κάθε ένα από τα 9 δείγματα θορύβου αναπαράχθηκε μέσω ακουστικών και οι αξιολογητές κλήθηκαν να καταγράψουν το επίπεδο ενόχλησης, το οποίο αντιστοιχεί στη μετρική Disturbance κάθε δείγματος θορύβου μέσω μιας διαδικασίας πολλαπλών ερεθισμάτων, απαντώντας στην ερώτηση «Πόσο ενοχλητικό είναι κάθε δείγμα θορύβου;». Για την αξιολόγηση της ενόχλησης χρησιμοποιήθηκε μια 9-βάθμια διαφορική κλίμακα [4], με το ανώτερο όριο να αντιπροσωπεύει υψηλή ενόχληση, ενώ το κατώτερο όριο να αντιπροσωπεύει χαμηλή ενόχληση.

1.3 Χαρακτηριστικά εισόδου

Το Spatial Cue-Augmented Log-Spectrogram for Polyphonic SELD (SALSA) [5] χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία λόγω της υψηλής απόδοσης που πέτυχαν τα μοντέλα SELD στον διαγωνισμό DCASE 2022 χρησιμοποιώντας το SALSA για καταγραφές μικροφώνων, όπως συμβαίνει και στην παρούσα εργασία, όπου πρέπει να ανιχνευθούν και να εντοπιστούν οι πηγές μέσω της χρήσης σημάτων που καταγράφονται από τα αριστερά και δεξιά μικρόφωνα αναφοράς m_{GE} και m_{BE} . Το SALSA αποτελείται από λογαριθμικά φασματογραφήματα από τα M μικρόφωνα αναφοράς και τις κανονικοποιημένες κατά συχνότητα διαφορές φάσης μεταξύ των καναλιών $M - 1$.

1.3 Βάση Δεδομένων

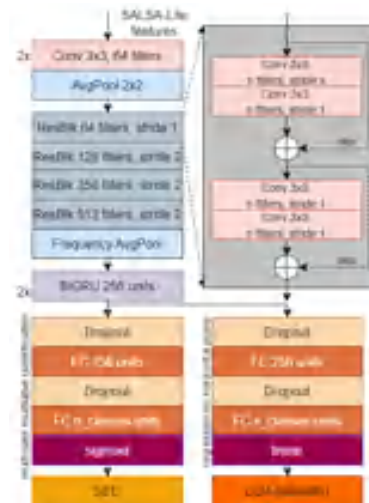
Οι χωροθετημένες ηχογραφήσεις αποτελούνταν από δύο ταυτόχρονα ενεργές πηγές από τη βάση δεδομένων DEMAND [6], η καθεμία τοποθετημένη σε διαφορετική γωνία στο δεξιό οριζόντιο ημιεπίπεδο. Για 3 διαφορετικά είδη σκηνών (καφέ, κυκλοφοριακή κίνηση, σταθμός μετρό) προκύπτουν δεδομένα διάρκειας 36

ωρών για την εκπαίδευση και 12 ωρών για την φάση test. Οι καταγραφές αυτές είναι δειγματοληπτημένες στα 24kHz. Εφαρμόστηκαν 2 τεχνικές επαύξησης δεδομένων κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης: Random-Cutout (RC) και Frequency Shifting (FS). Στο RC αφαιρούνται τυχαία τμήματα των φασματογραφημάτων ενώ στο FS τα χαρακτηριστικά εισόδου μετατοπίστηκαν τυχαία προς τα πάνω ή προς τα κάτω κατά έως και 10 μπάντες.

1.2 Νευρωνικό Δίκτυο

Το δίκτυο CRNN που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία βασίζεται στο δίκτυο SELD που χρησιμοποιείται στο [5], τροποποιημένο ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας, φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

Το δίκτυο SELD αποτελείται από ένα encoder μπλοκ, ο κλάδος SED είναι υλοποιείται ως ταξινομητής πολλαπλών κατηγοριών με πολλαπλές ετικέτες, ενώ ο κλάδος DOAE υλοποιείται ως πρόβλημα παλινδρόμησης.



Σχήμα 1.3 Block Διάγραμμα του δικτύου SELD.

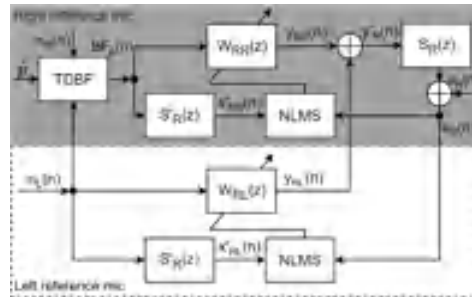
1.3 Targeted ANC με διαμορφωτή ζώνης

Το μπλοκ διάγραμμα για τον ελεγκτή στο δεξί ακουστικό του TBANC που ενσωματώνει το προτεινόμενο σύστημα διαμόρφωσης δέσμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Το σήμα που τροφοδοτείται στο ηχείο ελέγχου μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των σημάτων ελέγχου που παράγονται από το φιλτράρισμα τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού σήματος αναφοράς m_R και m_L αντίστοιχα. Το σήμα που οδηγεί το δεξί μεγάφωνο δίνεται από τη σχέση

$$y'_R(n) = y_{RR}(n) + y_{LR}(n) = w_{RR}(n) * BF_o(n) + w_{RL}(n) * m_L(n) \quad (1.3)$$

όπου $*$ υποδηλώνει συνέλιξη, $BF_o(n)$ είναι η έξοδος του διαμορφωτή δέσμης, που οδηγεί το προσαρμοστικό φίλτρο w_{RR} , w_{RR} και w_{RL} είναι τα βάρη των

προσαρμοστικών φίλτρων ελέγχου, με w_{RR} να αντιστοιχεί στο φίλτρο του οποίου η είσοδος προέρχεται από το δεξί μικρόφωνο αναφοράς και w_{RL} να αντιστοιχεί στο φίλτρο του οποίου η είσοδος προέρχεται από το αριστερό μικρόφωνο αναφοράς και χρησιμοποιείται για την οδήγηση του αισθητήρα σφάλματος του δεξιού αυτιού.



Σχήμα 1.4 Επισκόπηση του προτεινόμενου ελεγκτή.

Η διαδικασία ενημέρωσης των βαρών του LMS μπορεί να εκφραστεί ως

$$w_{R\{R|L\}}(n+1) = w_{R\{R|L\}}(n) + \mu \frac{e_R(n)x'_{R\{R|L\}}(n)}{\|x'_{R\{R|L\}}(n)\|^2} \quad (1.4)$$

όπου μ είναι το βήμα, $e_R(n)$ είναι το σφάλμα που καταγράφεται στο δεξί μικρόφωνο σφάλματος, $x'_{R\{R|L\}}(n)$ είναι ο θόρυβος που καταγράφεται από το δεξί (ή αριστερό) μικρόφωνο αναφοράς, φιλτραρισμένος από το $S'(z)$. Το σφάλμα δίνεται από

$$e_R(n) = a_R(n) + y'_R(n) * S_R(n) \quad (1.5)$$

όπου $a_R(n)$ είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος που φτάνει στο αριστερό μικρόφωνο σφάλματος και εξασθενείται από το κέλυφος των ακουστικών, $y'_R(n)$ είναι το σήμα ελέγχου που οδηγεί τον δεξιό οδηγό ακουστικών και $S_R(n)$ είναι η κρουστική απόκριση που αντιστοιχεί στο δεξί ακουστικό.

2. Αποτελέσματα

2.1 Μετρική Disturbance

Μέσω του μη-παραμετρικού Friedman τεστ, διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στις κατανομές των αξιολογήσεων ενόχλησης των τριών διαφορετικών τύπων θορύβου ($\chi^2(2, n = 72) = 22.525, p < .145$). Πραγματοποιήθηκαν Dunn tests κατά ζεύγη με διόρθωση Bonferroni και βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ του θορύβου της κυκλοφορίας και του θορύβου των καφετεριών ($p < .001$) καθώς και του θορύβου της κυκλοφορίας και του θορύβου του σταθμού του μετρό ($p < .001$). Δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ του θορύβου στο καφέ και του σταθμού μετρό ($p < .145$). Επομένως, υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι ο κυκλοφοριακός θόρυβος έχει υψηλότερη μετρική διαταραχής σε σύγκριση με τον θόρυβο του σταθμού του μετρό και του καφέ, ενώ δεν μπορεί να γίνει καμία δήλωση για την αξιολογούμενη μετρική διαταραχής του θορύβου του καφέ σε σύγκριση με τον θόρυβο του σταθμού του μετρό.

2.2 Ανίχνευση Συμβάντος και Εντοπισμός Γωνίας Άφιξης

Τα αποτελέσματα για την ανίχνευση ακουστικών γεγονότων (SED) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, και δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει υψηλό Precision και Recall για όλες τις κλάσεις.

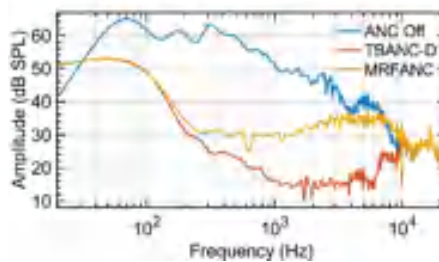
Πίνακας 1 Αποτελέσματα ταξινόμησης SED.

	Precision	Recall	F1-Score
Καφέ	0.73	0.93	0.82
Κίνηση	0.91	0.78	0.84
Σταθμός Μετρό	0.82	0.96	0.89
M.O.	0.82	0.89	0.85

Τα αποτελέσματα σχετικά με το επιτευχθέν Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) που σχετίζεται με την εκτίμηση της γωνίας άφιξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις SNR που αξιολογήθηκαν. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει χαμηλό MAE για όλες τις κλάσεις, με συνολικό μέσο MAE 0.34° . Το μέσο MAE που επιτεύχθηκε για τις κλάσεις καφέ, κίνηση και σταθμός μετρό ήταν 0.72° , 0.20° , 0.08° αντίστοιχα.

2.4 Ταχύτητα Σύγκλισης και Σταθερή Κατάσταση

Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου επηρεάζεται αρνητικά λόγω των 2 διαφορετικών σημάτων που χρησιμοποιούνται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 με το προτεινόμενο TBANC να συγκλίνει μετά από $\sim 2.5s$ σε σύγκριση με τον αρχικό αλγόριθμο που συγκλίνει μετά από $\sim 1.3s$. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης προσέγγισης TBANC-D στη σταθερή κατάσταση φαίνονται στο Σχήμα 2.1 όπου παρατηρείται σημαντική βελτίωση από, έως και 20 dB, στην περιοχή 3-5 kHz.

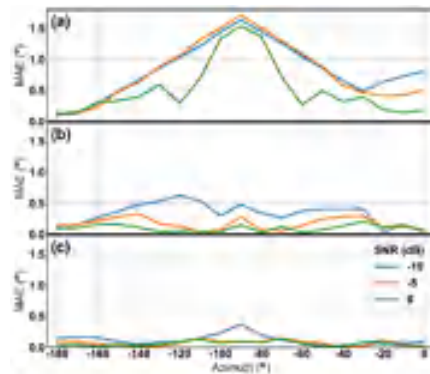


Σχήμα 2.1 Φάσματα συχνότητας (Μπλε): Παθητική ακύρωση ακουστικού, (Κόκκινο): Προτεινόμενη μέθοδος, (Κίτρινο): Baseline.

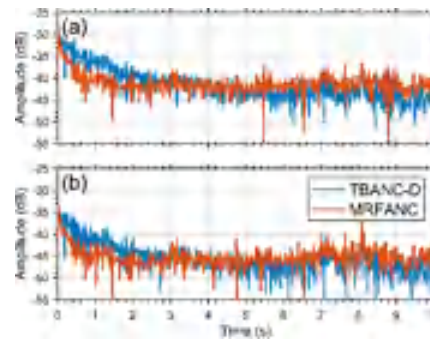
1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η TBANC-D, μια νέα προσέγγιση ANC η οποία χρησιμοποιεί τη μετρική Disturbance προκειμένου να κατευθύνει έναν διαμορφωτή δέσμης στην κύρια πηγή ενόχλησης χρησιμοποιώντας ένα νευρωνικό δίκτυο SELD. Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε μέσω της προσομοίωσης ενός διάχυτου ηχητικού πεδίου παρουσία έως και 2 πηγών θορύβου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα Precision, Recall και F1-Score για να μετρηθεί η απόδοση του

συστήματος SED και το MAE του συστήματος DOAE, με τα δύο να επιτυγχάνουν υψηλές επιδόσεις στις αντίστοιχες εργασίες τους με το μέσο F1-Score να είναι 0.85 και το μέσο MAE να είναι 0.33° .



Σχήμα 1.2 MAE για την παλινδρόμηση DOA των διαφορετικών κλάσεων. (a): Καφέ, (b): Κίνηση, (c): Σταθμός Μετρώ.



Σχήμα 1.3 Σήμα σφάλματος που μετρίεται στο εσωτερικό του δεξιού ακουστικού. (Μπλε): Προτεινόμενη μέθοδος, (Κόκκινο): Baseline.

Η συνιστώσα TBANC αξιολογήθηκε σε σχέση με την εξασθένηση του θορύβου σταθερής κατάστασης, καθώς και από την άποψη της ταχύτητας σύγκλισης σε σύγκριση με την καθιερωμένη προσέγγιση MRFANC, με την προτεινόμενη προσέγγιση TBANC να επιτυγχάνει βελτίωση έως και 20dB στην περιοχή 3-5 kHz, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική δεδομένου ότι οι ακροατές έχουν σημαντικά αυξημένη ευαισθησία σε αυτή την περιοχή.

2. Αναφορές

- [1] P. Zachos and J. Mourjopoulos, "Beamforming Headphone ANC for Targeted Noise Attenuation," *Audio Eng. Soc. Conv.* 154, May 2023.
- [2] J. Cheer, V. Patel, and S. Fontana, "The application of a multi-reference control strategy to noise cancelling headphones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 145, no. 5, pp. 3095–3103, May 2019, doi: 10.1121/1.5109394.
- [3] C. Oberzut and L. Olson, "Directionality and the head-shadow effect," *Hear. J.*, vol. 56, no. 4, pp. 56–58, 2003.
- [4] N. Zacharov, *Sensory evaluation of sound*. CRC Press, 2018.
- [5] T. N. T. Nguyen, D. L. Jones, K. N. Watcharasupat, H. Phan, and W.-S. Gan, "SALSA-Lite: A Fast and Effective Feature for Polyphonic Sound Event Localization and Detection with Microphone Arrays," in *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2022, pp. 716–720. doi: 10.1109/ICASSP43922.2022.9746132.
- [6] J. Thiemann, N. Ito, and E. Vincent, "DEMAND: a collection of multi-channel recordings of acoustic noise in diverse environments." Zenodo, Jun. 2013. doi: 10.5281/zenodo.1227121.



Σύγκριση και Ομαδοποίηση Αμφιωτικών Χωρικών Φίλτρων (HRTF) με Χρήση Μεθόδων Μεταεπεξεργασίας και Μείωσης Διαστάσεων

Κωνσταντίνος Μπακογιάννης*, Αρετή Ανδρεοπούλου
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*k.bakogiannis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη σύγκριση και ομαδοποίηση δεδομένων HRTF με χρήση τεχνικών μεταεπεξεργασίας και μείωσης διαστάσεων. Για τη διασφάλιση συνέπειας και συγκρισιμότητας, εφαρμόσαμε βήματα μεταεπεξεργασίας όπως επαναδειγματοληψία, ζωνοπερατό φίλτράρισμα και κανονικοποίηση στάθμης. Υπολογίστηκαν δύο βασικές μετρικές, η αντιληπτική ομοιότητα και η ακρίβεια εντοπισμού, είτε σε κοινές θέσεις μέτρησης μεταξύ ζευγών datasets είτε συνολικά για κάθε dataset. Χρησιμοποιήθηκε η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (PCA) για τη μείωση των διαστάσεων των δεδομένων, επιτρέποντας την ομαδοποίηση των datasets βάσει βασικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, υλοποιήθηκε φασματική ομαδοποίηση για την ανίχνευση ομάδων HRTFs και τον προσδιορισμό αντιπροσωπευτικών σημείων (centroids). Η μεθοδολογία δοκιμάστηκε σε 72 HRTF datasets από έξι βάσεις δεδομένων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των διαστάσεων διατηρώντας πάνω από το 90% της διακύμανσης των δεδομένων.

Comparison and Clustering of HRTF Datasets through Post-Processing and Dimensionality Reduction Methods

ABSTRACT

This paper presents the database matching technique for optimizing personalized Head-Related Transfer Function (HRTF) selection from publicly available datasets. The goal is to identify the most suitable HRTF dataset for each user, enhancing the immersive audio experience in virtual and augmented reality applications. Two key metrics, perceptual similarity and localization accuracy, were calculated for all datasets, either at common spatial positions between dataset pairs or across each dataset independently. Principal Component Analysis (PCA) was used to reduce data dimensions, enabling clustering of datasets based on key characteristics. Additionally, a spectral clustering approach was employed to group HRTFs and identify representative ones (centroids). The methodology was tested on 72 HRTF datasets from six databases. Results demonstrated that significant dimensionality reduction is possible while preserving over 90% of the data variance.

Εισαγωγή

Η εμπυθιστική εμπειρία και η ακριβής απόδοση της χωρικής πληροφορίας του ηχητικού περιβάλλοντος αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για μια επιτυχημένη, ολοκληρωμένη, ρεαλιστική και ευχάριστη εμπειρία αμφιωτικής ακρόασης, ειδικά σε εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (extended reality). Στόχος είναι μια προσωποποιημένη εμπειρία, η οποία να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τον πραγματικό τρόπο με τον οποίο το κάθε άτομο αντιλαμβάνεται τη χωρική ηχητική πληροφορία στο φυσικό περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ψηφιακών αμφιωτικών χωρικών φίλτρων, τα οποία ενσωματώνουν την κρουστική απόκριση των κυριότερων δομών του ανθρώπινου σώματος, όπως τα αυτιά, το κεφάλι και ο κορμός, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη χωρική ακουστική αντίληψη. Τα φίλτρα αυτά, που είναι μοναδικά για κάθε άτομο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο των συχνοτήτων, ως Head Related Impulse Responses (HRIR) και Head Related Transfer Functions (HRTF) αντίστοιχα.

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα HRTF που προέρχονται από την ίδια βάση δεδομένων εμφανίζουν συχνά κοινά χαρακτηριστικά, τα οποία οφείλονται στην επίδραση της διαδικασίας μέτρησης [1], [2]. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στις τεχνικές μετα-επεξεργασίας των δεδομένων με στόχο τον περιορισμό της επίδρασης των μεθόδων ηχογράφησης, ώστε να διευκολυνθεί η ακριβέστερη σύγκριση των HRTF μεταξύ διαφορετικών βάσεων δεδομένων. Ζητούμενο πολλών εργασιών είναι η ομαδοποίηση και η σύγκριση των διαφορετικών HRTF datasets με βάση κάποια κοινά χαρακτηριστικά και ιδιότητές τους. Το παραπάνω απαιτεί την ποσοτικοποίηση της επίδρασής τους σε αντιληπτές παραμέτρους, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης κατάλληλων μετρικών (π.χ., [3], [4], [5]). Δεδομένης της πληθώρας διαθέσιμων HRTF, τα οποία περιγράφονται από διαφορετικές μετρικές και παρουσιάζουν διαφορές ανά συχνοτική περιοχή ή/και χωρικό σημείο, οι τεχνικές σύγκρισης και ομαδοποίησης καλούνται να χειριστούν δεδομένα πολλών διαστάσεων. Για την καλύτερη επεξεργασία αυτών των δεδομένων, εφαρμόζονται τεχνικές μείωσης διαστάσεων, οι οποίες περιγράφονται στην εργασία.

1. Μεθοδολογία

Στην παρακάτω ενότητα θα παρουσιαστούν οι γενικές αρχές των τεχνικών σύγκρισης και ομαδοποίησης των HRTFs καθώς και οι λεπτομέρειες της υλοποίησής τους.

1.1 Συλλογή και μετα-επεξεργασία δεδομένων

Για τη συλλογή των HRTFs, αξιοποιήθηκε το αποθετήριο της SOFA, το οποίο περιλαμβάνει ανοιχτές βιβλιοθήκες HRTF σε ενιαίο τύπο αρχείου, με συγκεκριμένη παραμετροποίηση. [6] Αυτή η κοινή μορφή διευκολύνει την επεξεργασία και την αξιοποίηση των δεδομένων. Επιλέχθηκαν βιβλιοθήκες στις οποίες τα HRTFs είχαν προκύψει από ηχογραφήσεις πραγματικών υποκειμένων, διασφαλίζοντας έτσι ρεαλιστικές κρουστικές αποκρίσεις. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν εκδοχές των HRTFs που είχαν υποστεί ισοστάθμιση ελεύθερου πεδίου (free-field equalization),

ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των μικροφώνων και των άλλων μετρητικών διατάξεων.

Για να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των HRTFs, υιοθετήσαμε μια σειρά από βήματα μετα-επεξεργασίας. Μέσω αυτής της διαδικασίας διασφαλίστηκε ότι τα HRTFs θα διαθέτουν τα αναγκαία κοινά χαρακτηριστικά, τα οποία με ενιαίο τρόπο θα επιτρέψουν την εφαρμογή τους στα επόμενα στάδια του υπολογισμού των μετρικών. Παράλληλα, οι τεχνικές αυτές συνέβαλαν στον περιορισμό της επίδρασης της μετρικής διάταξης και των διαφορετικών μεθόδων ηχογράφησης, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια και την αξιοπιστία των συγκρίσεων.

Τα βήματα της μετα-επεξεργασίας που υιοθετήσαμε σύμφωνα και με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία ([1], [2]) είναι τα εξής:

- **Μετατροπή των HRTFs σε DTFs:** Τα DTFs (Directional Transfer Functions) επικεντρώνονται στα κατευθυντικά στοιχεία του ήχου, αφαιρώντας μη κατευθυντικές επιδράσεις που εξαρτώνται από τη συχνότητα.
- **Μετασχηματισμός σε κοινή συχνότητα δειγματοληψίας (Uniform Frequency Resampling):** Επιλέξαμε τη χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας (44.100 Hz) μεταξύ των διαθέσιμων HRTF.
- **Περιορισμός συχνοτικού εύρους με ζωνο-περατό (band-pass) φίλτρο:** Επιλέξαμε ένα βαθυπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής τα 8 kHz, η οποία διατηρεί τα βασικά χωρικά στοιχεία, συμπεριλαμβανομένης της φασματικής πληροφορίας που σχετίζεται με το περύνιο του αυτιού, ενώ εξαλείφει τον υψηλής συχνότητας θόρυβο που εισάγεται από τον εξοπλισμό ηχογράφησης. Επιπλέον, εφαρμόστηκε ένα υψιπερατό φίλτρο με αποκοπή στα 200 Hz, για να αφαιρέσει τα χαμηλής συχνότητας artifacts (π.χ. θόρυβος δωματίου, βουητό εξοπλισμού). Οι συχνότητες κάτω των 200 Hz μεταφέρουν λιγότερη λεπτομερή πληροφορία για τη διαφορά χρόνου άφιξης μεταξύ των αυτιών (Interaural Time Difference - ITD) και συμβάλλουν ελάχιστα στη λεπτομερή χωρική εντόπιση. Αυτό το ζωνοπερατό φίλτρο (200 Hz έως 8 kHz) συλλαμβάνει το κρίσιμο φάσμα για την ακριβή ανάλυση του χωρικού ήχου, διατηρώντας τόσο τα στοιχεία ITD και διαφοράς στάθμης μεταξύ των αυτιών (Interaural Level Difference - ILD), όσο και τη φασματική απόκριση από το περύνιο του αυτιού για οριζόντιο και κατακόρυφο εντοπισμό.
- **Αφαίρεση DC Offset:** Εξισορρόπηση του σήματος γύρω από το μηδέν για αποφυγή παραμορφώσεων στις χαμηλές συχνότητες.
- **Περικοπή Κρουστικής Απόκρισης (Impulse Response Truncation):** Εφαρμόστηκε ορθογώνιο παράθυρο για την περικοπή της κρουστικής απόκρισης (IR) σε ένα ομοιόμορφο μήκος. Το μήκος των δειγμάτων βασίστηκε στη μικρότερη αναφερόμενη διάρκεια κρουστικής απόκρισης (5.3 ms, που αντιστοιχεί σε 233.73 δείγματα). Για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας, το ομοιόμορφο μήκος ορίστηκε σε 256 δείγματα (η επόμενη δύναμη του δύο). Το σημείο έναρξης ορίστηκε 40 δείγματα πριν από την πρώτη ανίχνευση της έναρξης, η οποία ορίστηκε ως το σημείο όπου το σήμα ξεπέρασε κατά 10 dB την κορυφαία τιμή. Αυτό εξάλειψε τις πρώιμες ανακλάσεις και εξασφάλισε ότι μόνο η άμεση διαδρομή του ήχου καταγράφηκε.
- **Κανονικοποίηση Επίπεδου (Level Gains Normalization):** Λόγω διαφορών στο πλάτος των σημάτων τα οποία ηχογραφήθηκαν και στην απόσταση των ηχείων

μεταξύ των διατάξεων, Εφαρμόστηκε κανονικοποίηση RMS σε όλα τα HRIR, ώστε να διασφαλιστεί ομοιόμορφη ένταση ήχου μεταξύ των datasets.

- **Μηδενισμός πρώτου και τελευταίου δείγματος (Zeroing Boundary Samples):** Αυτό εξασφαλίζει καθαρά όρια στο σήμα και προσφέρει ομαλές μεταβάσεις κατά τη διάρκεια της συνέλιξης, αποτρέποντας "κλικ" ή ασυνέχειες στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα.

1.2 Επιλογή μετρικών

Μετά τη δημιουργία ενός συνόλου μετα-επεξεργασμένων HRTF datasets, με στόχο τη διασφάλιση της συνέπειας και της συγκρισιμότητας, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των βασικών μετρικών. Αυτές οι μετρικές είτε εφαρμόζονται στις κοινές θέσεις μέτρησης μεταξύ δύο datasets, είτε σε ολόκληρο το dataset. Χρησιμοποιήσαμε δύο κύριες μετρικές από το Auditory Modelling Toolbox: μία μετρική αντιληπτικής ομοιότητας (perceptual similarity) και μία μετρική ακρίβειας εντοπισμού ήχου (localization accuracy).

- **Μετρική Αντιληπτικής Ομοιότητας:** Βασισμένη στη Binaural Perceptual Similarity των McKenzie κ.α. [7] (διαθέσιμη στο AMT McKenzie2021), η μετρική αυτή υπολογίζεται για κάθε κοινή θέση μεταξύ δύο datasets. Παρέχει ένα μέτρο του πόσο παρόμοια αντιλαμβάνεται ο χρήστης τις φασματικές διαφορές των δύο HRTF, λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο αυτιά και παρέχοντας αποτελέσματα για συγκεκριμένες θέσεις ακρόασης.
- **Μετρική Ακρίβειας Εντοπισμού Ήχου:** Αυτή η μετρική, βασισμένη στο Bayesian Spherical Sound Localization των Barumerli κ.α. [8](διαθέσιμη στο AMT Barumerli2023), εφαρμόζεται στο σύνολο του dataset. Αξιολογεί το πόσο ένα HRTF dataset οδηγεί στον ακριβή εντοπισμό ηχητικών πηγών στον σφαιρικό ακουστικό χώρο, χρησιμοποιώντας προχωρημένα Bayesian μοντέλα για την πρόβλεψη λαθών εντοπισμού.

Αυτές οι μετρικές παρέχουν πολύτιμες ακουστικές πληροφορίες και μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη μετρική μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο σε εφαρμογές όπου η διατήρηση της φυσικότητας των ηχοχρωμάτων είναι καθοριστική, αποφεύγοντας αλλοιώσεις που ενδέχεται να προκαλέσουν δυσαρέσκεια ή έλλειψη φυσικότητας κατά την ακρόαση (π.χ., εφαρμογές μουσικής ακρόασης). Η δεύτερη μετρική είναι κατάλληλη για εφαρμογές στις οποίες ο ακριβής εντοπισμός της προέλευσης του ήχου είναι κρίσιμος (π.χ., χειρισμός μηχανημάτων, περιηγήσεις σε χώρους, video games κ.λπ.).

Παρακάτω θα εξειδικεύσουμε τις διαφορές στην υλοποίηση που εντοπίζονται μεταξύ των μετρικών που εφαρμόζονται στα κοινά σημεία δύο datasets και των μετρικών που εφαρμόζονται σε ολόκληρο το dataset.

1.3 Σύγκριση datasets με μετρικές που εφαρμόζονται στα μεταξύ τους κοινά σημεία

Οι μετρικές αυτές συγκρίνουν την επίδραση δύο διαφορετικών HRTF datasets και εξάγουν διαφορετικές τιμές για τα κοινά σημεία των dataset αυτών. Το πρώτο βήμα επομένως σε κάθε δυαδική σύγκριση είναι ο εντοπισμός των κοινών σημείων. Για να

ληφθεί υπόψη η αδυναμία του ανθρώπου να διακρίνει ότι δύο πηγές εκπέμπουν από διαφορετικά σημεία του χώρου αν η απόστασή τους είναι μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή (φαινόμενο γνωστό ως localization blur), εφαρμόζουμε μια ανεκτική μέθοδο για τον καθορισμό κοινών θέσεων μεταξύ των HRTF datasets. Με βάση αυτό θεωρούνται ως κοινά σημεία όσων η απόσταση είναι χαμηλότερη κάποιων τιμών οι οποίες καθορίζονται ανάλογα με την αζιμούθια θέση τους και το επίπεδο ανύψωσης. Για τον καθορισμό των ορίων αυτών χρησιμοποιούνται οι τιμές στη σχετική βιβλιογραφία για το μέγεθος Minimum Audible Angle. [9], [10] Όταν οι θέσεις από το dataset A αντιστοιχούν σε πολλαπλές θέσεις από το dataset B (εντός των ορίων), υπολογίζουμε τον μέσο όρο των μετρικών για να αποφύγουμε την υπερ-αντιπροσώπωση. Αν υπάρχει ακριβής αντιστοιχία, προτιμούμε αυτή έναντι των λιγότερο ακριβών αντιστοιχιών.

Όλες οι μετρικές κανονικοποιούνται με βάση τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές που βρέθηκαν μεταξύ όλων των συγκρίσεων κάθε ζεύγους datasets, για να εξασφαλιστεί συνέπεια. Οι κανονικοποιημένες τιμές κυμαίνονται από 0 έως 1, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μετρικών. Τέλος, εφαρμόζουμε ένα βάρος στις αντίστοιχες μετρικές, διασφαλίζοντας ότι οι θέσεις που καλύπτουν μεγαλύτερη περιοχή επηρεάζουν περισσότερο τα τελικά αποτελέσματα. Κάθε κοινή θέση αποκτά βάρος αναλογικά με την περιοχή (στερεά γωνία) που αντιπροσωπεύει. Για να προσδιορίσουμε το βάρος αυτό χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο 1-NN για να χωρίσουμε τη σφαίρα σε συστάδες και να προσδιορίσουμε τον αριθμό των σημείων της σφαίρας τα οποία είναι εγγύτερα σε κάθε κοινή θέση.

1.4 Σύγκριση datasets με μετρικές που εφαρμόζονται σε ολόκληρο το dataset

Σε αυτή την προσέγγιση, οι μετρικές εφαρμόζονται όχι μέσω της σύγκρισης δύο HRTF datasets, αλλά υπολογίζονται απευθείας για κάθε dataset ανεξάρτητα. Κάθε dataset περιγράφεται από ένα σύνολο μετρικών που αντιπροσωπεύουν τις συνολικές του ιδιότητες, χωρίς να γίνεται αναφορά σε κοινές θέσεις ή σε συγκρίσεις με άλλα datasets.

Αντί να επικεντρωνόμαστε σε κοινές θέσεις μεταξύ δύο datasets, κάθε dataset αναλύεται συνολικά, και για κάθε dataset εξάγεται μία μοναδική τιμή για κάθε μετρική, η οποία συνοψίζει τα ακουστικά χαρακτηριστικά του, δίνοντας μία συνολική εκτίμηση της ακουστικής απόδοσης του HRTF.

Ο πίνακας που προκύπτει έχει διαστάσεις $d \times m$, όπου d είναι ο αριθμός των datasets και m είναι ο αριθμός των μετρικών που χρησιμοποιούνται. Αυτός ο πίνακας επιτρέπει την άμεση σύγκριση μεταξύ των datasets, χωρίς την ανάγκη ανεύρεσης κοινών θέσεων, καθώς οι μετρικές αναφέρονται σε ολόκληρο το dataset.

1.5 Ομαδοποίηση datasets με μετρικές που εφαρμόζονται στα μεταξύ τους κοινά σημεία

Τα μοναδικά ζεύγη HRTFs που σχηματίζουν τις δυαδικές συγκρίσεις είναι $d*(d-1)/2$, όπου d είναι ο αριθμός των datasets. Αν p είναι το σύνολο των κοινών θέσεων που εντοπίζονται μεταξύ όλων των δυαδικών συγκρίσεων και m ο αριθμός των μετρικών, τότε ο πίνακας που περιλαμβάνει όλες τις συγκρίσεις έχει διαστάσεις $d*(d-1)/2 \times p \times m$. Δεδομένου ότι δεν έχουν όλες οι συγκρίσεις τα ίδια κοινά σημεία, τα κενά στον πίνακα συμπληρώνονται με τεχνικές αναπλήρωσης, όπως η χρήση

μηδενικών ή μέσων όρων, για να διατηρηθεί η συνοχή των δεδομένων και να μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική μείωσης δεδομένων PCA (Principal Component Analysis), η οποία έχει εφαρμοστεί ξανά σε έρευνες σχετικές με HRTF (π.χ., [11], [12], [13], [14]).

Η PCA εφαρμόζεται στα δεδομένα που προκύπτουν από τις δυαδικές συγκρίσεις μεταξύ των HRTF datasets, με σκοπό να μειώσει τις διαστάσεις του πίνακα δεδομένων, διατηρώντας τις κύριες συνιστώσες (principal components) που συγκρατούν το μεγαλύτερο μέρος της πληροφορίας και της διακύμανσης των δεδομένων. Στην πράξη, ο αριθμός των κύριων συνιστωσών k που διατηρούνται εξαρτάται από το πόσο επιθυμούμε να μειώσουμε τις διαστάσεις και πόση διακύμανση θέλουμε να διατηρήσουμε (π.χ., 90% της συνολικής διακύμανσης). Μετά την PCA, κάθε ζεύγος σύγκρισης αντιπροσωπεύεται από k κύριες συνιστώσες που συνοψίζουν την πληροφορία από τις διάφορες μετρικές.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επεκταθεί ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα ίδια τα datasets. Αρχικά, τα αποτελέσματα της PCA για τις δυαδικές συγκρίσεις ομαδοποιούνται με χρήση τεχνικών clustering (όπως το k-means) για να δημιουργηθεί ένας πίνακας ομοιοτήτων (similarity matrix) μεταξύ των datasets. Κάθε ζεύγος datasets αποκτά ένα βαθμό ομοιότητας, ανάλογα με το πόσο συχνά ταξινομείται στην ίδια ομάδα μέσω του clustering.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται φασματική ομαδοποίηση (spectral clustering) πάνω στον πίνακα ομοιοτήτων. Δημιουργείται ένας γράφος (graph) όπου οι κόμβοι αντιστοιχούν στα datasets και οι ακμές αποτυπώνουν τον βαθμό ομοιότητας μεταξύ τους. Η φασματική ανάλυση του γράφου (μέσω του Laplacian matrix) επιτρέπει τον εντοπισμό φυσικών ομάδων μεταξύ των datasets, που παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά. Έτσι, καταλήγουμε σε clusters των datasets, και κάθε ομάδα (cluster) αντιπροσωπεύεται από έναν κεντρικό εκπρόσωπο (centroid), ο οποίος είναι το dataset που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο της ομάδας και θεωρείται το πιο αντιπροσωπευτικό για την ομάδα του.

Με αυτόν τον τρόπο, μέσω της συνδυασμένης εφαρμογής PCA και φασματικής ομαδοποίησης, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα αντιπροσωπευτικά HRTF datasets, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση ή δοκιμή.

1.6 Ομαδοποίηση datasets με μετρικές που εφαρμόζονται σε ολόκληρα το dataset

Αντίθετα με την περίπτωση των μετρικών που εφαρμόζονται στα μεταξύ των datasets κοινά σημεία, στην περίπτωση των μετρικών που εφαρμόζονται σε ολόκληρο το dataset δε χρειάζεται κάποια προεργασία για την ομαδοποίηση των datasets. Η τεχνική PCA (Principal Component Analysis) μπορεί άμεσα να εφαρμοστεί για τη μείωση των διαστάσεων των δεδομένων, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των συγκρίσεων σε κοινές θέσεις. Η PCA θα εξάγει ένα σύνολο κύριων συνιστωσών (principal components) που αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη διακύμανση στα δεδομένα, επιτρέποντας την ομαδοποίηση (clustering) των datasets σε ομάδες βάσει των ακουστικών χαρακτηριστικών τους. Έτσι, ο αρχικός πίνακας που με διαστάσεις $d \times m$, όπου d είναι ο αριθμός των datasets και m είναι ο αριθμός των μετρικών που χρησιμοποιούνται, εκπίπτει σε πίνακα διαστάσεων $d \times n$, όπου n ο αριθμός των principal components και $n < m$.

Οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης, όπως το k-means ή το hierarchical clustering, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναζητηθούν φυσικές ομάδες των HRTF datasets, με βάση τις κύριες συνιστώσες που προέκυψαν από την PCA. Οι ομάδες αυτές αντιπροσωπεύουν HRTF με κοινά χαρακτηριστικά και μπορούν να συνοψιστούν μέσω των centroids τους, τα οποία αποτελούν τα πιο αντιπροσωπευτικά HRTF για κάθε ομάδα.

2. Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης

Ως μελέτη περίπτωσης, εφαρμόσαμε την παραπάνω μεθοδολογία σε 72 διαφορετικά HRTF datasets, 12 από κάθε μία από 6 διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Για τη μετρική της αντιληπτικής ομοιότητας, επιλέξαμε δύο τιμές ($m = 2$): τον μέσο όρο αντιληπτικής ομοιότητας μεταξύ των δύο αυτιών και την τιμή για το αυτί που βρίσκεται πιο κοντά στην πηγή (ipsilateral). Η μετρική αυτή υπολογίζεται στα κοινά σημεία των ζευγών σύγκρισης ($72 \cdot (72-1)/2 = 2556$ δυαδικές συγκρίσεις). Ο συνολικός αριθμός κοινών θέσεων που εντοπίστηκαν (p) ήταν 428, οδηγώντας σε έναν πίνακα διαστάσεων $2556 \times 428 \times 2$.

Η τεχνική PCA (Principal Component Analysis) εφαρμόστηκε για μείωση των διαστάσεων, αναλύοντας τη διακύμανση σε 856 κύριες συνιστώσες. Από αυτές, οι πρώτες 10 εξηγούν το 75% της συνολικής διακύμανσης, ενώ το 90% εξηγείται από τις 24 πρώτες συνιστώσες. Αυτό σημαίνει ότι καταφέραμε να μειώσουμε τις διαστάσεις από 2556×856 σε 2556×24 , διατηρώντας το 90% της διακύμανσης των δεδομένων.

Αντίστοιχα, για τη μετρική της ακρίβειας εντοπισμού ήχου, η οποία υπολογίζεται για κάθε ένα HRTF dataset, προκύπτουν 5 τιμές, δημιουργώντας έναν πίνακα διαστάσεων 72×5 . Η τεχνική PCA (Principal Component Analysis) ανέλυσε τη διακύμανση σε 5 κύριες συνιστώσες. Από αυτές, η πρώτη εξηγεί το 58% της συνολικής διακύμανσης, ενώ οι πρώτες τρεις εξηγούν το 97%. Αυτό σημαίνει ότι μειώσαμε τις διαστάσεις από 72×5 σε 72×3 , διατηρώντας το 97% της διακύμανσης των δεδομένων και χάνοντας μόνο το 3%.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάσαμε τις γενικές αρχές των τεχνικών σύγκρισης και ομαδοποίησης των HRTFs καθώς, επικεντρώνοντας στη μετα-επεξεργασία των datasets και στις μεθόδους μείωσης διαστάσεων. Χρησιμοποιώντας μετρικές που ποσοτικοποιούν την αντιληπτική ομοιότητα και την ακρίβεια εντοπισμού ήχου, συγκρίναμε 72 datasets σε κοινές χωρικές θέσεις και αναλύσαμε τα αποτελέσματα με τη βοήθεια της τεχνικής PCA για μείωση των διαστάσεων. Η εφαρμογή της PCA μάς επέτρεψε να αποτυπώσουμε το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης των δεδομένων με λιγότερες συνιστώσες, οδηγώντας σε αποδοτική ομαδοποίηση των HRTF με βάση τα κύρια ακουστικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, με φασματική ομαδοποίηση (spectral clustering) εντοπίστηκαν φυσικές ομάδες δεδομένων, με κάθε ομάδα να εκπροσωπείται από το κεντρικό HRTF (centroid), το οποίο θεωρείται το πιο αντιπροσωπευτικό.

Η μελλοντική εργασία επικεντρώνεται κυρίως στην εφαρμογή των παραπάνων στην τεχνική του database matching [15] αξιοποιώντας ένα ευρύτερο σύνολο

διαθέσιμων HRTF, το οποίο ανέρχεται σε περίπου 1000 datasets. Η υλοποίηση και αξιολόγηση αυτής της μεθόδου έχει τη δυνατότητα να προσφέρει βελτιωμένες και προσωποποιημένες ακουστικές εμπειρίες στους χρήστες, ενισχύοντας τη φυσικότητα και την αίσθηση ρεαλισμού στις αντίστοιχες εφαρμογές, καθώς θα συμβάλει στην παροχή εξατομικευμένων HRTF.

4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό έργο υποστηρίχτηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα SONICOM (www.sonicom.eu) το οποίο χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα “Ορίζοντας Ευρώπη 2020” της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Union’s Horizon 2020) με αριθμό έργου No. 101017743.

5. Αναφορές

- [1] A. Andreopoulou, D. R. Begault, and B. F. G. Katz, “Inter-laboratory round robin HRTF measurement comparison,” *IEEE J Sel Top Signal Process*, vol. 9, no. 5, pp. 895–906, 2015.
- [2] J. Pauwels and L. Picinali, “On the relevance of the differences between HRTF measurement setups for machine learning,” in *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, 2023, pp. 1–5.
- [3] P. Bremen, M. M. van Wanrooij, and A. J. van Opstal, “Pinna cues determine orienting response modes to synchronous sounds in elevation,” *Journal of Neuroscience*, vol. 30, no. 1, pp. 194–204, 2010.
- [4] A. Roginska, T. S. Santoro, and G. H. Wakefield, “Stimulus-dependent HRTF preference,” in *Audio Engineering Society Convention 129*, Audio Engineering Society, 2010.
- [5] B. F. G. Katz and G. Parsehian, “Perceptually based head-related transfer function database optimization,” *J Acoust Soc Am*, vol. 131, no. 2, pp. EL99–EL105, 2012.
- [6] P. Majdak, F. Zotter, F. Brinkmann, J. De Muynke, M. Mihocic, and M. Noisternig, “Spatially oriented format for acoustics 2.1: Introduction and recent advances,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 70, no. 7/8, pp. 565–584, 2022.
- [7] T. McKenzie, C. Armstrong, L. Ward, D. T. Murphy, and G. Kearney, “Predicting the colouration between binaural signals,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 2441, 2022.

- [8] R. Barumerli, P. Majdak, M. Geronazzo, D. Meijer, F. Avanzini, and R. Baumgartner, “A Bayesian model for human directional localization of broadband static sound sources,” *Acta Acustica*, vol. 7, p. 12, 2023.
- [9] J. C. Middlebrooks and D. M. Green, “Sound and localization by human listeners,” *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 42, pp. 135–159, 1991, doi: 10.1146/annurev.ps.42.020191.001031.
- [10] J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997.
- [11] G. Marentakis and J. Hözl, “Compression efficiency and Signal Distortion of common PCA bases for HRTF Modelling,” in *Proceedings of the 18th Sound and Music Computing Conference*, Axa sas/SMC Network, 2021.
- [12] J. Hözl, “An initial Investigation into HRTF Adaptation using PCA,” *IEM Project Thesis, Institut für elektronische musik und akustik. Graz, Austria*, 2012.
- [13] F. Grijalva, B. Escobar, B. A. A. Acurio, and R. Álvarez, “Analysis and synthesis of hrtfs using principal component analysis,” in *2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [14] M. Zhang, Z. Ge, T. Liu, X. Wu, and T. Qu, “Modeling of individual HRTFs based on spatial principal component analysis,” *IEEE/ACM Trans Audio Speech Lang Process*, vol. 28, pp. 785–797, 2020.
- [15] A. Andreopoulou and A. Roginska, “Database matching of sparsely measured head-related transfer functions,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 65, no. 7/8, pp. 552–561, 2017.



Αξιολόγηση Υποκειμενικής Προτίμησης σε Ισοσταθμισμένα Ακουστικά Κεφαλής

Παναγιώτης Ζάχος
Υποψήφιος Διδάκτορας
p_zachos@upnet.gr

Αναστάσιος Μπέλεσης
Φοιτητής
up1059335@upnet.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής
mourjor@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αξιολογείται με αντικειμενικά κριτήρια πλήθος ακουστικών κεφαλής από μία βάση δεδομένων ως προς την απόκριση συχνότητάς τους. Για την αξιολόγηση των ακουστικών γίνεται σύγκριση της απόκρισής τους με δύο αποκρίσεις-στόχους, την επίπεδη και τη Harman απόκριση. Στη συνέχεια διενεργούνται πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης μουσικών αποσπασμάτων με 4 διαφορετικά ακουστικά και 3 διακριτές ισοσταθμίσεις, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ισοστάθμισης στη βαθμολογία. Από τα αποτελέσματα της αντικειμενικής αξιολόγησης δεν προκύπτει σημαντικός συσχετισμός μεταξύ της τιμής αγοράς των ακουστικών και της εγγύτητάς της απόκρισής τους σε οποιαδήποτε από τις δύο αποκρίσεις-στόχους. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποκειμενικής αξιολόγησης προέκυψε στατιστικά σημαντική η επίδραση της ισοστάθμισης στη βαθμολογία των αποσπασμάτων για τα ακουστικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Subjective Evaluation of Preference of Equalized Headphones

ABSTRACT

This paper evaluates over-ear headphones from a database with objective metrics regarding their frequency response. The evaluation is based on the differences between the frequency response of the headphones and two target responses. Subjective listening tests are then performed to evaluate musical excerpts played back through 4 different pairs of headphones with 3 discrete equalizations. The goal of these tests is to investigate the effect of equalization on the listeners' rating. The results of the objective evaluation suggest no statistically significant correlation between headphone prices and the similarity of their responses to any of the target responses. The results of the subjective listening tests suggest a statistically significant effect of equalization on the listeners' ratings for the headphones under test.

Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή τα ακουστικά αποτελούν την κύρια συσκευή αναπαραγωγής μουσικής και άλλων ακουστικών μέσων. Η παγκόσμια αγορά ακουστικών αξιολογήθηκε στα \$15.9B το 2020, με κάποιες εκτιμήσεις να φτάνουν τα \$45.7B για το 2026[1]. Η ταχεία ανάπτυξη της αγοράς καθιστά αναγκαία την εδραίωση προτύπων σχεδιασμού, με απώτερο σκοπό τη συνεχή βελτίωσή της ακουστικής εμπειρίας των ακροατών.

Ένας βασικός παράγοντας που προσδιορίζει την ποιότητα ενός ζευγαριού ακουστικών είναι η απόκριση συχνότητάς του. Πέρα από την επίπεδη απόκριση συχνότητας, που παραμένει απόκριση αναφοράς για ακουστικά που προορίζονται για επαγγελματική χρήση, τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί σε βιομηχανικό πρότυπο η καμπύλη Harman, η οποία προέκυψε ως ευρέως δημοφιλής μέσω υποκειμενικών αξιολογήσεων σε πληθώρα ερευνών. [2][6].

Η εργασία αυτή αρχικά αξιολογεί με αντικειμενικά κριτήρια 443 ακουστικά κεφαλής (over-ear headphones) από μια βάση δεδομένων ως προς την απόκριση συχνότητάς τους. Τα κριτήρια αυτά είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, η Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος, η Φασματική Επιπεδότητα (Spectral Flatness) και η διακριτή απόσταση Fréchet. Θέτοντας ως αποκρίσεις-στόχους τη Harman και την επίπεδη απόκριση συχνότητας, υπολογίζονται τα παραπάνω κριτήρια μεταξύ των αποκρίσεων-στόχων και των αποκρίσεων των ακουστικών. Στη συνέχεια διενεργούνται πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης 5 μουσικών αποσπασμάτων χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικά ακουστικά με 3 διακριτές ισοσταθμίσεις, βασισμένες στις αποκρίσεις-στόχους. Τα αποτελέσματα αναλύονται με στατιστικές μεθόδους ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της ισοστάθμισης στην βαθμολογία.

Μέσω αντικειμενικής αξιολόγησης διερευνάται η σχέση ποιότητας-τιμής των ακουστικών σύμφωνα με τα παρόντα βιομηχανικά πρότυπα και η με βάση τα συμπεράσματα εξάγονται στατιστικά για την εκτιμηθέντα ακουστικά. Τα πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης αποσκοπούν στην διερεύνηση της προτίμησης των ακροατών ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες αποκρίσεις-στόχους και στην απόκριση συχνότητας των ακουστικών υπό δοκιμή.

1. Μέθοδοι

1.1 Αποκρίσεις ακουστικών και καμπύλες στόχοι

Οι αποκρίσεις συχνότητας των ακουστικών που αξιολογήθηκαν με αντικειμενικά κριτήρια εξήχθησαν από το αποθετήριο AutoEQ [3]. Η επίπεδη απόκριση-στόχος υλοποιήθηκε με ένα IIR Butterworth 12ης τάξης με ζώνη διέλευσης [20Hz, 20KHz] και μοναδιαίο πλάτος. Τόσο οι αποκρίσεις της βάσης δεδομένων όσο και οι αποκρίσεις-στόχοι είχαν 4096 δείγματα, και συχνотικό εύρος [0Hz, 22050Hz]. Καθώς η βάση δεδομένων δεν περιέχει πληροφορίες για την απόκριση φάσης των ακουστικών, προστέθηκε τεχνητά γραμμική απόκριση φάσης, η οποία μετασχηματίστηκε έπειτα σε ελάχιστης φάσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο cepstrum.

Η απόκριση ελάχιστης φάσης εξασφαλίζει ευστάθεια στην περίπτωση σχεδίασης αντίστροφου φίλτρου. Στον Πίνακα 1.1 παρατίθενται τα μοντέλα των ακουστικών, οι τιμές αγοράς τους, καθώς και τα μουσικά αποσπάσματα με τα βασικά τους χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης. Τα μονοφωνικά μουσικά αποσπάσματα, διάρκειας 10s, επιλέχθηκαν με βασικά κριτήρια την υψηλή ποιότητα ηχογράφησης και το εύρος των ήχων και του συχνοτικού περιεχομένου τους.

Πίνακας 1.1 Τα ακουστικά και τα μουσικά αποσπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης

Ακουστικά		Μουσικά Αποσπάσματα	
Μοντέλο	Τιμή (USD)	Τίτλος/Καλλιτέχνης	Χαρακτηριστικά
AKG K240 Studio	70	Royalty Free 1	Ηλεκτρονική, συνθεσάιζερ
Sennheiser HD 560S	200	Royalty Free 2	Ποπ, ανδρικά φωνητικά
Sony WH1000-XM4	350	Matilda Mother/Pink Floyd	Ροκ, ανδρικά φωνητικά, ηλεκτρική κιθάρα
Ultrasone PROline 750	400	So What/ Miles Davis	Τζαζ, τρομπέτα, κοντραμπάσο
		Metastaseis/Iannis Xenakis	Πειραματικό, θόρυβος, ορχηστρικό

1.1 Αντικειμενικά Κριτήρια

Για κάθε απόκριση συχνότητας $R_u(k)$, $n = 4096$ σημείων, όπου u ο δείκτης του μοντέλου των ακουστικών στη βάση δεδομένων με $u = 1, 2, \dots, 443$ και κάθε απόκριση-στόχο $T_v(k)$, όπου $v = \{\text{Επίπεδη}, \text{Harman}\}$ υπολογίστηκε ως εξής το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE):

$$MSE_{u,v} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_u(k) - T_v(k))^2 \quad (1.1)$$

Η Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE) δίνεται από:

$$RMSE_{u,v} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (R_u(k) - T_v(k))^2} \quad (1.2)$$

Για τον υπολογισμό της Φασματικής Επιπεδότητας (SF) απαιτείται ο μετασχηματισμός των αποκρίσεων συχνότητας $R_u(k)$ και των αποκρίσεων-στόχων

$T_v(k)$ στις αντίστοιχες κρουστικές αποκρίσεις $r_u(k)$ και $t_v(k)$ ελαχίστης φάσης, επίσης $n = 4096$ δειγμάτων και με συχνότητα δειγματοληψίας $f_s = 44100 \text{ Hz}$. Τότε το περιοδόγραμμα της διαφοράς $d_{u,v}(k) = r_u(k) - t_v(k)$ θα δίνεται από τον τύπο:

$$\hat{P}_{u,v}(f) = \frac{\Delta t}{n} \left| \sum_{k=1}^n d_{u,v}(k) e^{-j2\pi f \Delta t k} \right|^2, -\frac{1}{2\Delta t} < f < \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.3)$$

όπου Δt το διάστημα δειγματοληψίας των κρουστικών αποκρίσεων. Το SF υπολογίζεται ως εξής:

$$SF_{u,v} = \frac{\sqrt{\prod_{k=1}^n \hat{P}_{u,v}(k)}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \hat{P}_{u,v}(k)} \quad (1.4)$$

Η διακριτή απόσταση Fréchet (d_F) μεταξύ δύο πολυγωνικών καμπυλών $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ και $Q = \{q_1, \dots, q_m\}$, η οποία αποτελεί ένα κριτήριο ομοιότητας και απόστασης μεταξύ των καμπυλών αυτών, υπολογίζεται ως εξής:

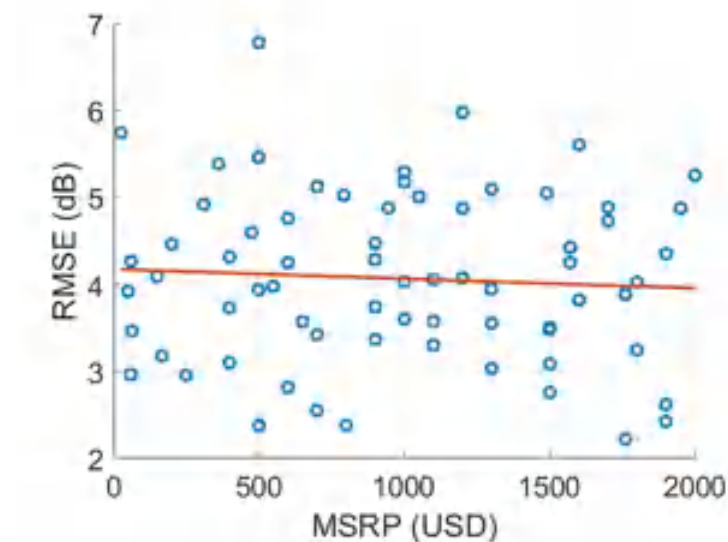
$$d_F(P, Q) = \min_{\sigma} \max_i d(p_i, q_{\sigma(i)}) \quad (1.5)$$

όπου d η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο σημείων και σ μία διάσχιση των σημείων (σειρά ζευγών) τέτοια ώστε να αντιπροσωπεύει έναν συσχετισμό των δεικτών i της P προς την Q , διατηρώντας την μονοτονία ($\sigma(i+1) \geq \sigma(i)$).

1.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την τιμή

Θεωρώντας ότι η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ τιμής και αντικειμενικών κριτηρίων έχει αξία κυρίως για εμπορικά ακουστικά καθημερινής χρήσης, ελήφθησαν υπόψιν τα ακουστικά εκείνα των οποίων η τιμή δεν ξεπερνά τα 2000 USD. Το εύρος τιμών 0 – 2000 USD χωρίστηκε σε 10 ζώνες τιμών εύρους 200 USD. Έπειτα, για να εξασφαλιστεί η ισορροπία σε ό,τι αφορά την εκπροσώπηση των ζωνών, βρέθηκε η ζώνη τιμών με τη μικρότερη εκπροσώπηση, και αφαιρέθηκε με τυχαίο τρόπο από κάθε άλλη ζώνη κατάλληλο πλήθος ακουστικών ώστε ο τελικός αριθμός ακουστικών κάθε ζώνης να είναι ίσος με αυτόν της ολιγοπληθέστερης ζώνης.

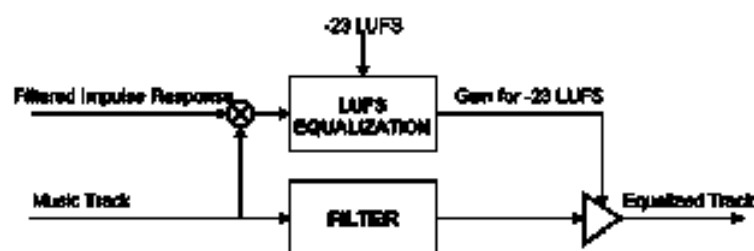
Στα αποτελέσματα αυτού του εύρους τιμών έγινε γραμμική παλινδρόμηση και υπολογίστηκε η κλίση της ευθείας που προέκυψε στα διαγράμματα αντικειμενικών κριτηρίων-τιμής. Επίσης υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης R μεταξύ της τιμής και των αντικειμενικών κριτηρίων. Η διαδικασία τυχαίας αφαίρεσης και υπολογισμού της κλίσης της ευθείας και του R επαναλήφθηκε 100 φορές και ελήφθη ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται ένα παράδειγμα διαγράμματος από το οποίο υπολογίστηκαν οι προαναφερθέντες συντελεστές.



Σχήμα 1.1 Διάγραμμα αντικειμενικού κριτηρίου-τιμής με γραμμική παλινδρόμηση για υπολογισμό της κλίσης και του συντελεστή συσχέτισης

1.3 Προετοιμασία Πειραμάτων Υποκειμενικής Αξιολόγησης

Αρχικά μετρήθηκε η απόκριση συχνότητας των ακουστικών του πίνακα 1.1 με το ανδρείκελο GRAS 45BC KEMAR. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή AutoEQ[4] προέκυψαν τα αντίστοιχα συνελκτικά FIR φίλτρα ισοστάθμισης για επίπεδη και Harman απόκριση στόχο, των οποίων η ορθή λειτουργία επιβεβαιώθηκε με εκ νέου μέτρηση των ακουστικών. Για κάθε μετρημένη ισοσταθμισμένη απόκριση και απόσπασμα ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Η διαδικασία ισοστάθμισης συχνότητας και έντασης των αποσπασμάτων ενόψει των πειραμάτων υποκειμενικής αξιολόγησης

Τελικά προέκυψαν τα 60 (4 ακουστικά x 3 ισοσταθμίσεις x 5 αποσπάσματα) ασυμπίεστα ηχητικά αρχεία συχνότητας δειγματοληψίας 44100Hz και ευκρίνειας 16bit/δείγμα. Η ισοστάθμιση των ακουστικών υλοποιήθηκε προφιλτράροντας τα προς αναπαραγωγή αρχεία. Τελικά σε κάθε περίπτωση η αναπαραγωγή του

ισοσταθμισμένου αποσπάσματος από τα ακουστικά προσομοιώνει επιτυχώς την αναπαραγωγή του ακατέργαστου αποσπάσματος από ισοσταθμισμένα ακουστικά, ενώ η ισοστάθμιση έντασης εξασφαλίζει ότι η συνολική αντιληπτή ένταση είναι -23 LUFS για όλα τα αρχεία.

1.4 Υποκειμενική Αξιολόγηση

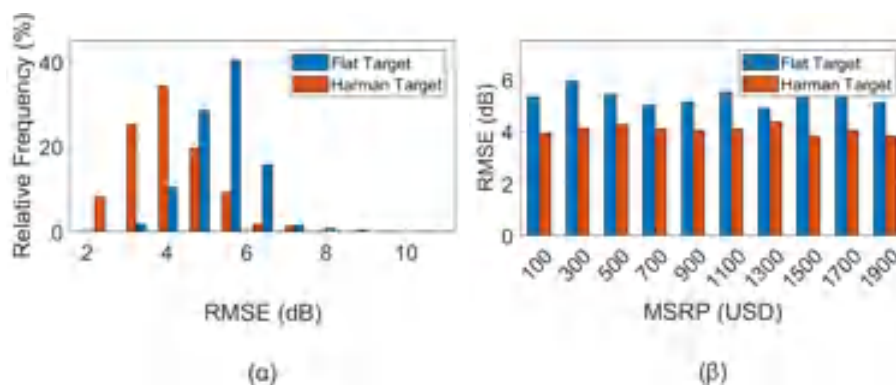
Τα πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον webMUSHRA[5]. Οι 20 συμμετέχοντες, εκ των οποίων το 25% μπορούν να θεωρηθούν expert listeners, κλήθηκαν να βαθμολογήσουν στην κλίμακα [-100,100] όλους τους συνδυασμούς ακουστικών-ισοσταθμίσεων-αποσπασμάτων, δίνοντας έμφαση στις ακουστές διαφορές μεταξύ των ισοσταθμίσεων για δεδομένα ακουστικά και απόσπασμα. Σε κάθε σελίδα αξιολόγησης οι 3 εκδοχές κάθε αποσπάσματος ήταν τοποθετημένες σε τυχαία σειρά.

Στα αποτελέσματα των πειραμάτων έγινε στατιστική ανάλυση με τη μέθοδο Two-Way ANOVA with Repeated Measures για την διερεύνηση της επίδρασης της ισοστάθμισης στη βαθμολογία. Η post hoc ανάλυση που επιλέχθηκε για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης ήταν η Tukey's Honestly Significant Difference (HSD).

2. Αποτελέσματα

2.1 Αποτελέσματα Αντικειμενικής Αξιολόγησης

Η σχετική συχνότητα εμφάνισης του RMSE ως προς τις αποκρίσεις στόχους, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1(α), ενώ στο Σχήμα 2.1(β) απεικονίζεται η μέση τιμή του RMSE στο εύρος τιμών 100-2000 USD. Το RMSE παρουσιάζεται αντί των υπόλοιπων αντικειμενικών κριτηρίων στο Σχήμα 2.1, διότι ερμηνεύεται εύκολα, ενώ ταυτόχρονα είναι αντιπροσωπευτικό σε ότι αφορά τα συμπεράσματα που προκύπτουν και από τα υπόλοιπα αντικειμενικά κριτήρια.



Σχήμα 2.1(α) Η σχετική συχνότητα εμφάνισης του RMSE για επίπεδη και Harman απόκριση-στόχο στο πλήθος των ακουστικών της βάσης δεδομένων (β) Η μέση τιμή του RMSE για επίπεδη και Harman απόκριση-στόχο στο εύρος τιμών 100-2000 USD

Από τα σχήματα αυτά συνάγεται αφενός ότι η πλειονότητα των ακουστικών προσεγγίζει την Harman απόκριση περισσότερο από την επίπεδη, και αφετέρου ότι δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντικός συσχετισμός μεταξύ της τιμής αγοράς ενός μοντέλου και της εγγύτητας της απόκρισής του σε οποιαδήποτε από τις δύο αποκρίσεις-στόχους. Στον Πίνακα 2.1 απεικονίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κλίσης της ευθείας και του συντελεστή συσχέτισης R που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.2.

Πίνακας 2.1 Η μέση τιμή της κλίσης της γραμμικά προσαρμοσμένης ευθείας και του συντελεστή συσχέτισης των διαγραμμάτων αντικειμενικών κριτηρίων – τιμής αγοράς για επίπεδη και Harman απόκριση-στόχο

		MSE	RMSE	SFD	FD
Επίπεδη Απόκριση- Στόχος	Κλίση	-0.00018 ± 0.0016	-0.0001 ± 0.0001	0 ± 0	-0.0061 ± 0.0058
	R	-0.1162 ± 0.1004	-0.1072 ± 0.0993	0.1822 ± 0.0748	-0.1072 ± 0.0993
Harman Απόκριση- Στόχος	Κλίση	0.0002 ± 0.0014	0 ± 0.0001	0 ± 0	0.0011 ± 0.0061
	R	0.0193 ± 0.0951	0.018 ± 0.0895	0.1705 ± 0.0763	0.018 ± 0.0895

Από τα δεδομένα αυτά φαίνεται ότι στο πλήθος των ακουστικών από 100 – 2000 USD δεν υπάρχει στατιστικά σημαντικός συσχετισμός μεταξύ της τιμής αγοράς τους και της εγγύτητας τους σε οποιαδήποτε από τις δύο αποκρίσεις-στόχους.

2.2 Αποτελέσματα Υποκειμενικής Αξιολόγησης

Από την ανάλυση ANOVA μεταξύ των συμμετεχόντων με ανεξάρτητες μεταβλητές τα ακουστικά, την ισοστάθμιση και το απόσπασμα και εξαρτημένη μεταβλητή τη βαθμολογία προέκυψε ως στατιστικά σημαντική η επίδραση της ισοστάθμισης ($F = 14.16, p \ll .001$). Από την post-hoc ανάλυση προέκυψε ότι οι συμμετέχοντες προτίμησαν την επίπεδη ισοστάθμιση κατά 9.16% περισσότερο σε σχέση με την ισοστάθμιση Harman και κατά 7.23% περισσότερο σε σχέση με την μη-ισοστάθμιση. Η επίδραση των ακουστικών στη βαθμολογία δεν προέκυψε ως στατιστικά σημαντική. Η επίδραση του αποσπάσματος στη βαθμολογία δεν προέκυψε στατιστικά σημαντική, με εξαίρεση το απόσπασμα «Metastaseis» το οποίο φάνηκε να επηρεάζει αρνητικά τη βαθμολογία. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο και οφείλεται στην ιδιαίτερα πειραματική φύση του αποσπάσματος αυτού.

3. Συμπεράσματα

Το γεγονός ότι η τιμή των ακουστικών δεν συσχετίζεται με την εγγύτητα της απόκρισης τους στις δύο αποκρίσεις-στόχους καταδεικνύει ότι η απόκριση συχνότητας είναι μόνο ένας από τους παράγοντες που καθιστούν τα ακουστικά ποιοτικά ή μη. Η ποιότητα κατασκευής, η απόκριση φάσης, η συνολική αρμονική παραμόρφωση και η άνεση στη χρήση είναι μόνο κάποιοι από τους παράγοντες που

ενδεχομένως ευθύνονται για τις διαφορές στην τιμή μεταξύ ακουστικών με παρόμοια απόκριση συχνότητας. Χωρίς να αποκλείεται το ενδεχόμενο κάποια μοντέλα ακουστικών να είναι υπερτιμημένα λόγω διαφημιστικών παραγόντων, η μελέτη της απόκρισης συχνότητας πλάτους δεν αρκεί για τη συνολική αξιολόγηση τους.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποκειμενικής αξιολόγησης φαίνεται να έρχονται σε αντιπαράθεση με ορισμένα πρότυπα της βιομηχανίας ακουστικών, στην οποία έχει εδραιωθεί η καμπύλη Harman ως επιθυμητή απόκριση-στόχος για ακουστική ευρείας κατανάλωσης τα τελευταία χρόνια, παρόλα αυτά είναι απαραίτητη περαιτέρω διερεύνηση του προκειμένου με περισσότερα ακουστικά και αξιολογητές. Οι παράγοντες που δυνάμει επηρεάζουν την ποιότητα της ακροαματικής εμπειρίας είναι πολλοί και επομένως δεν μπορούν να γενικευθούν με ασφάλεια τα συμπεράσματα της παρούσης εργασίας. Η δυνατότητα εξατομίκευσης της ισοστάθμισης στη διαδικασία παραγωγής ακουστικών με βάση τις προτιμήσεις του χρήστη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και περιορίζεται σε ακριβά μοντέλα και επομένως αξίζει η διερεύνηση των «ιδανικών» αποκρίσεων συχνότητας σε μεγαλύτερη κλίμακα.

4. Αναφορές

[1] S. E. Olive, “The Perception and Measurement of Headphone Sound Quality: What Do Listeners Prefer?,” *Acoustics Today*, vol. 18, no. 1, pp. 58–67, Spring 2022.

[2] oratory1990, “New measurements and results.” GitHub, AutoEQ. [Online]. Available:

<https://github.com/jaakkopasanen/AutoEq/tree/master/measurements/oratory1990/data/over-ear> [3] S. E. Olive, T. Welti, and E. McMullin, “Listener preference for different headphone target response curves,” presented at the AES Convention, Audio Engineering Society, Jan. 2013, pp. 7–8.

[4] jaakkopasanen, *AutoEQ*. [Online]. Available: <https://autoeq.app/>

[5] Schoeffler, M. (2014). Towards the Next Generation of Web-based Experiments : A Case Study Assessing Basic Audio Quality Following the ITU-R Recommendation BS . 1534 (MUSHRA)

[6] S. E. Olive, T. Welti, and E. McMullin, “The Influence of Listeners’ Experience, Age, and Culture on Headphone Sound Quality Preferences,” in *Convention Paper 9177*, 2014, pp. 6–11.



Ανάπτυξη ηχητικού συστήματος ακυρωτικής παρεμβολής μεταξύ καναλιών σε ανακλαστικό χώρο

Αλμπέρτο Ερσπάμερ^{1,*}, Χρήστος Γιακόπουλος, Ιωάννης Αντωνιάδης

¹Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Ηρώων Πολυτεχνείου 9

15772, Ζωγράφου, Αθήνα

*albertoerspamer@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα ακυρωτικής παρεμβολής μεταξύ καναλιών χρησιμοποιούνται για τον αποτελεσματικό έλεγχο των αναπαραγόμενων σημάτων σε σημεία ενδιαφέροντος. Συχνά χρησιμοποιούνται για την δυναμική χωρική αναπροσαρμογή των εκλαμβανόμενων ήχων όταν η χρήση ακουστικών από τους χρήστες δεν είναι εφικτή ή επιθυμητή. Στην παρούσα εργασία μελετάται, προσομοιώνεται και αναπτύσσεται πειραματικά ένα στερεοφωνικό σύστημα ακυρωτικής παρεμβολής σε πραγματικές ανακλαστικές συνθήκες. Δίνεται έμφαση στην απόδοση του συστήματος ως προς την συσχέτιση μεταξύ των επιθυμητών και των αναπαραγόμενων σημάτων καθώς και στην διαφορά επιπέδου έντασης μεταξύ των σημείων αναπαραγωγής. Διερευνάται η απόδοση του συστήματος και σε θέσεις αναπαραγωγής γειτνιάζουσες με την αρχική. Επίσης διερευνάται η επίδραση των ανακλάσεων, του κεφαλιού και της απόστασης των ηχείων από τα σημεία αναπαραγωγής.

Development of a crosstalk cancellation system in a reflective space

ABSTRACT

Crosstalk cancellation systems is a widely used technique for various purposes including precise control of audio signals in the points of interest. These systems are often used for binaural reproduction enabling effective control of the perceived location of sounds with speakers instead of wearable headphones. In this study a crosstalk cancelling system is designed, simulated and tested in a normal sound environment with reflections. The performance of the system is determined considering the correlation between the desired and reproduced signals in the positions of interest for various displacements of the reproduction points, as well as the level difference between the reproduction points. The influence of the head, the level of reflections, and the distance of the reproduction speakers from the reproduction points are also considered.

Εισαγωγή

Η τεχνική της ακυρωτικής παρεμβολής (crosstalk cancellation) είναι ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος του ήχου είτε σε συγκεκριμένα σημεία είτε γενικά στον χώρο. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα επιθυμητά σημεία αναπαραγωγής μπορούν να είναι δύο (διφωνική αναπαραγωγή) είτε περισσότερα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά και για χωρική αναπαραγωγή πεδίου (Pressure matching). Στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε με την περίπτωση αναπαραγωγής σε δύο σημεία ενδιαφέροντος.

Η ακριβής αναπαραγωγή σημάτων σε δύο σημεία ενδιαφέροντος παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί έτσι μπορούν να ελεγχθούν αποτελεσματικά τα ηχητικά χαρακτηριστικά του προσλαμβανόμενου ήχου στα δύο αυτιά. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η δημιουργία ηχητικών παραισθήσεων κάνοντας χρήση των πορισμάτων της ψυχοακουστικής [1]. Καθώς η εκλαμβανόμενη θέση ήχου στον χώρο εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά του όπως η διαφορά έντασης, η διαφορά φάσης των σημάτων στα δύο αυτιά, ο λόγος ανακλώμενου προς προσπίπτοντος πεδίου κ.α., η μέθοδος προτιμάται όταν σκοπός είναι ο έλεγχος της προσλαμβάνουσας διεύθυνσης και απόστασης των διαφόρων «ηχητικών αντικειμένων» στον χώρο.

Η δημιουργία αυτών των ηχητικών ψευδαισθήσεων δίνει την αίσθηση της μετακίνησης του ήχου κάνοντας την ακουστική εμπειρία πιο ρεαλιστική. Συχνά παραδείγματα εφαρμογής των αρχών της ψυχοακουστικής είναι το Dolby Atmos, το amplitude panning [2] κ.α. Τα συστήματα ακυρωτικής παρεμβολής παρουσιάζουν ενδιαφέρον γιατί μπορούν να επιτύχουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τον ακριβή έλεγχο των ηχητικών ψευδαισθήσεων. Πιθανές πρακτικές εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας είναι η δημιουργία ενισχυμένων ακουστικών εμπειριών στις τέχνες, η δημιουργία συστημάτων ακουστικής πραγματικότητας, συστήματα αληθοφανούς ακρόασης (περιπτώσεις ακουστικής προσομοίωσης ακριβείας για εκπαίδευση, ιατρικούς σκοπούς κ.α.), ακρόαση δικαναλικής (binaural) μουσικής, έρευνα σχετικά με την ανθρώπινη ηχητική αντιληπτικότητα κ.α.

Ένας βασικός περιορισμός στην δημιουργία ακουστικών ψευδαισθήσεων είναι ο βαθμός ευαισθησίας του ανθρώπινου εγκεφάλου σε μικρές αλλαγές των ηχητικών χαρακτηριστικών των ήχων στα δύο αυτιά. Μεταβολές στη διαφορά της ηχητικής πίεσης στα δύο αυτιά της τάξης μερικών dB, είτε μεταβολές ως προς την χρονική διαφορά των δύο σημάτων της τάξης των 100-1000 μ s μπορούν να μεταβάλλουν σημαντικά την προσλαμβανόμενη θέση του ήχου. Για τον λόγο αυτό συνήθως προτείνονται δυναμικές μέθοδοι αναπροσαρμογής των εφαρμοζόμενων φίλτρων [3], που ωστόσο εμφανίζουν υπολογιστικούς περιορισμούς ενώ η απόδοση τους επηρεάζεται από τις ανακλάσεις. Συνεπώς η διαπίστωση της απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος για μικρές μετακινήσεις από τα σημεία αναπαραγωγής κρίνεται σημαντική.

1. Ανασκόπηση λειτουργίας συστήματος παρεμβολής

Ένα σύστημα ακυρωτικής παρεμβολής περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια. Αρχικά πρέπει να γίνει μοντελοποίηση των συναρτήσεων μεταφοράς μεταξύ των πηγών

ήχου (ηχεία) και των σημείων στα οποία ζητούμενο είναι ο έλεγχος του σήματος [4]. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με τη διαδοχική αναπαραγωγή λευκού θορύβου από τα ηχεία. Κάθε φορά, τα σήματα που καταφτάνουν στα μικρόφωνα καταγράφονται. Είτε κατά την διάρκεια των διαταραχών είτε κατόπιν, γίνεται εφαρμογή ενός αλγορίθμου ελαχιστοποίησης σφάλματος για την εύρεση των συναρτήσεων μεταφοράς. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα κατάλληλα φίλτρα που αντισταθμίζουν την επίδραση του φυσικού συστήματος, ώστε να αναπαραχθούν τα επιθυμητά σήματα στα σημεία ενδιαφέροντος.

Στους ανακλαστικούς χώρους, ο υπολογισμός των αντίστροφων συναρτήσεων μεταφοράς προτιμάται να γίνεται στο πεδίο του χρόνου [4], λόγω της παρουσίας στοιχείων ελάχιστης φάσης (minimum phase components) στο φυσικό σύστημα. Τόσο για τις προσομοιώσεις όσο και για το πείραμα που ακολουθούν επιλέχθηκε μέγεθος φίλτρου 5000 taps. Για την μοντελοποίηση των ακουστικών μονοπατιών μεταξύ ηχείων – μικροφώνων επιλέχθηκε $\text{step size} = 0.00001$ ενώ για τον υπολογισμό των φίλτρων αντιστάθμισης $\text{step size} = 1$. Το μεγάλο μέγεθος του φίλτρου ήταν απαραίτητο για την σύγκλιση στο ανακλαστικό περιβάλλον εργαστηρίου ($T60=0.8s$) όπου το σύστημα δοκιμάστηκε.

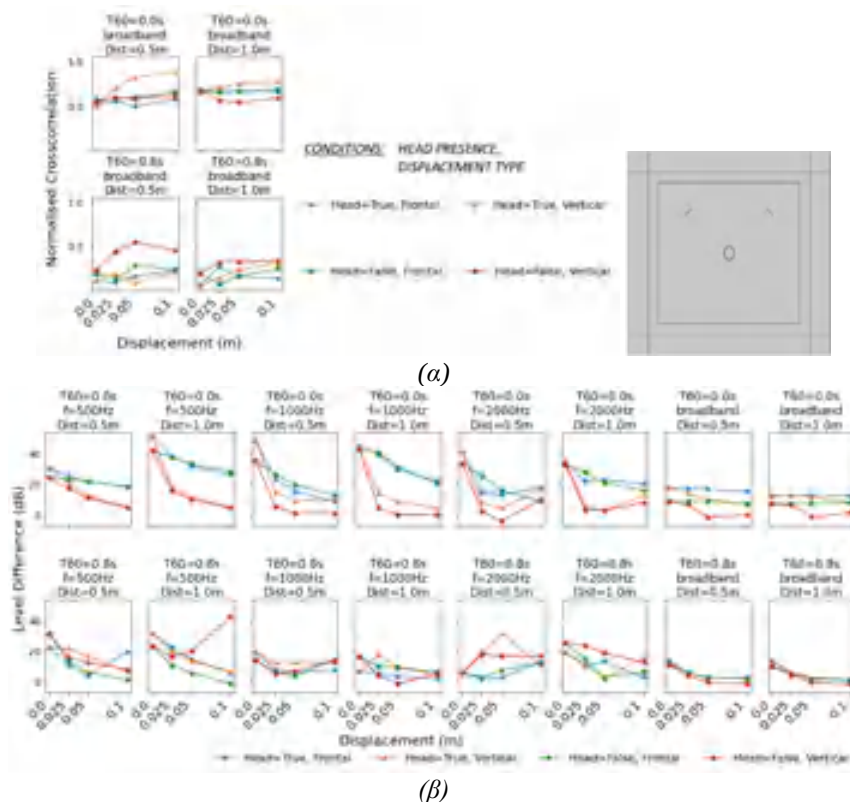
2. Μετρούμενα χαρακτηριστικά (συσχέτιση, διαφορά έντασης)

Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των κανονικοποιημένων συσχετίσεων α) μεταξύ των σημάτων στα δύο σημεία αναπαραγωγής και β) μεταξύ των επιθυμητών και των πραγματικά αναπαραγόμενων σημάτων. Η χρήση κανονικοποιημένων μεγεθών επιτρέπει την ακριβέστερη αξιολόγηση της ποιότητας αναπαραγωγής, μειώνοντας την επίδραση της διαφοράς ενέργειας των σημάτων. Εξετάζεται η απόδοση του συστήματος όσον αφορά και την επιτευχθείσα διαφοροποίηση ως προς το επίπεδο της έντασης στα δύο σημεία ενδιαφέροντος. Τόσο οι συσχετίσεις όσο και οι διαφορές επιπέδου έντασης μετρούνται μέσω προσομοιώσεων και πειραματικών δοκιμών για διάφορες θέσεις μετακίνησης των σημείων αναπαραγωγής. Οι μετακινήσεις είναι είτε πλάγιες είτε εμπρόσθιες και γίνονται ταυτόχρονα και από τα δύο σημεία.

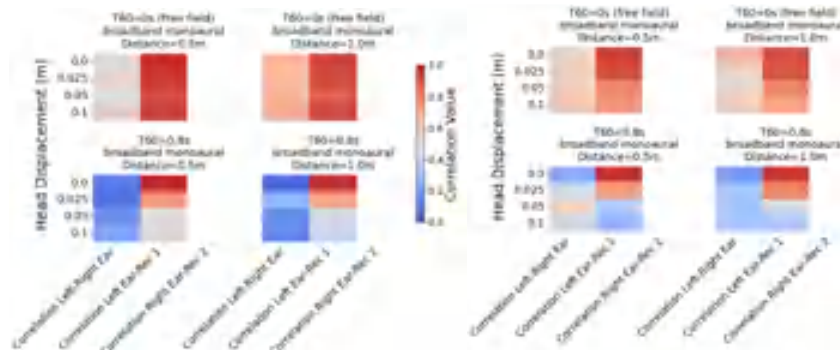
Η απόδοση του συστήματος αναλύεται για τρεις τύπους διαταραχών. Αρχικά, το σύστημα δοκιμάστηκε σε περιπτώσεις όπου η διαταραχή στοχεύει μόνο σε ένα σημείο αναπαραγωγής, ενώ στο άλλο σημείο απαιτείται η ενέργεια να είναι μηδενική. Για αυτήν την περίπτωση, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τρεις απλές μονοσυχνотικές διαταραχές (500Hz, 1000Hz και 2000Hz) και με μία διαταραχή ευρέως φάσματος (περίπτωση monaural broadband reproduction). Επίσης, εξετάστηκε η πιστότητα αναπαραγωγής δύο στατιστικά ανεξάρτητων σημάτων ίσης ενέργειας (επίσης ευρέως φάσματος) στα δύο σημεία αναπαραγωγής (binaural broadband reproduction). Το εύρος ζώνης των διαταραχών ευρέως φάσματος ορίστηκε στα 200-2500Hz, καθώς ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά όπως η διαφορά φάσης μεταξύ των προσλαμβανόμενων διαταραχών στα αυτιά είναι σημαντικά σε αυτό το εύρος. Επιπλέον, η επιλογή αυτής της φασματικής περιοχής μειώνει την πολυπλοκότητα των μοντέλων προσομοίωσης, καθιστώντας εφικτή την προσομοίωση χρονικά εξελισσόμενων σημάτων σε εύλογο χρόνο.

3. Προσομοιώσεις

Αναπτύχθηκε προσομοίωση του συστήματος ακυρωτικής παρεμβολής στο περιβάλλον COMSOL. Σχεδιάστηκε ένας διςδιάστατος τετραγωνικό χώρος, όπου μοντελοποιήθηκαν οι τοίχοι, ένα κεφάλι τυπικών διαστάσεων και τα ηχεία ως δύο τόξα διαμέτρου 16 εκατοστών, τοποθετημένα σε απόσταση 0.5 και 1.0 μέτρων από το κέντρο του κεφαλιού. Για τον καθορισμό του χρόνου ανάκλασης T60, παραμετροποιήθηκαν η πυκνότητα και η ταχύτητα διάδοσης του υλικού των τοίχων. Ο σχεδιασμός του κρανίου του κεφαλιού ακολούθησε τις προβλεπόμενες προδιαγραφές σύμφωνα με το [5]. Η μοντελοποίηση των συναρτήσεων μεταφοράς έγινε με διαταραχές χρονικού μήκους 0.9s. Για τον υπολογισμό της μέσης διαφοράς ενέργειας στα σήματα ευρέως φάσματος, υπολογίστηκαν πρώτα τα φάσματα των δύο μικροφώνων και στη συνέχεια η μέση τιμή της διαφοράς τους. Για τα σήματα μιας συχνότητας, η μέση τιμή της διαφοράς υπολογίστηκε σε ένα φασματικό εύρος 10 Hz γύρω από την αντίστοιχη συχνότητα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απεικονίζονται στα σχήματα 3.1-3.4.



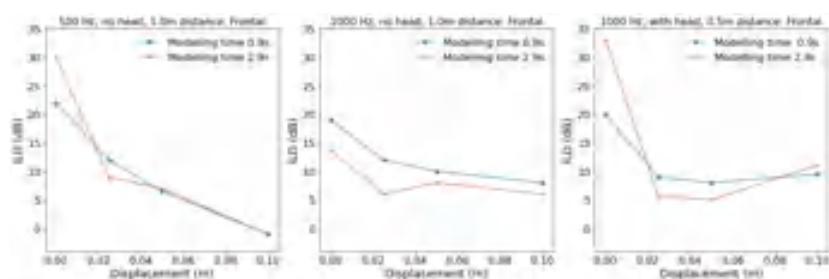
Σχήμα 3.1 Κανονικοποιημένη συσχέτιση (α) και διαφορά επιπέδου έντασης (β) μεταξύ των σημάτων στα δύο σημεία ενδιαφέροντος σε σχέση με την μετατόπιση των σημείων αναπαραγωγής. Η επιθυμητή ενέργεια στο ένα από τα δύο σημεία είναι μηδενική. T60 (χρόνος ανάκλασης), και Dist (απόσταση μεταξύ κεφαλιού-ηχείου).



Σχήμα 3.2 Κανονικοποιημένη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων (monaural broadband) στα δύο σημεία ενδιαφέροντος και μεταξύ των επιθυμητών και αναπαραγόμενων σημάτων σε σχέση με τη μετατόπιση των σημείων αναπαραγωγής. Η επιθυμητή ενέργεια στο ένα από τα δύο σημεία είναι μηδενική. Αριστερά: Με κεφάλι - Εμπρόσθιες μετακινήσεις. Δεξιά: Χωρίς κεφάλι - Πλάγιες μετακινήσεις.

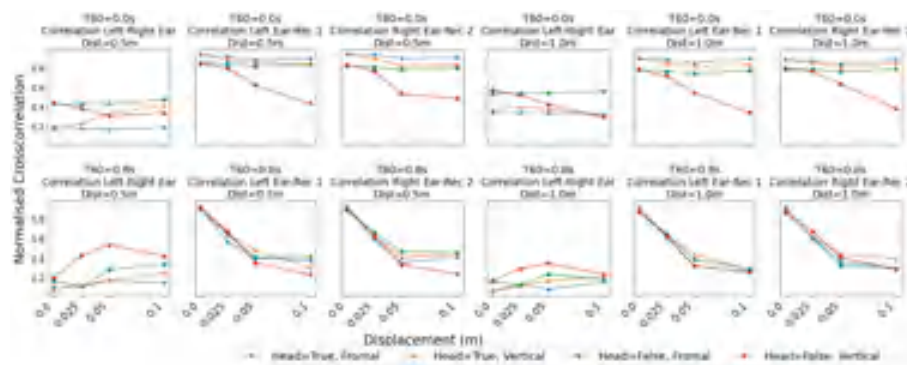
Τα σχήματα 3.1 και 3.2 απεικονίζουν την απόδοση του συστήματος όταν το ένα από τα δύο επιθυμητά σήματα έχει μηδενική ενέργεια. Είναι θεμιτό η κανονικοποιημένη συσχέτιση των σημάτων στα δύο σημεία αναπαραγωγής να είναι ελάχιστη. Για τα σήματα ευρέως φάσματος παρατηρείται ότι σε συνθήκες μηδενικής ανακλαστικότητας, η κανονικοποιημένη συσχέτιση μεταξύ των δύο σημείων είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με ανακλαστικά περιβάλλοντα, όπου και εμφανίζεται καλύτερος διαχωρισμός (σχήμα 3.1-α). Ωστόσο, η μεγαλύτερη ανακλαστικότητα οδηγεί σε μειωμένη απόδοση - μείωση στην κανονικοποιημένη συσχέτιση μεταξύ επιθυμητού - αναπαραγόμενου σήματος για μετακινήσεις των σημείων ενδιαφέροντος με ή χωρίς κεφάλι (σχήμα 3.2) και για τους δύο τύπους μετατόπισης. Ταυτόχρονα, παρατηρείται ότι η ύπαρξη κεφαλιού οδηγεί σε αυξημένη στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των αναπαραγόμενων σημάτων.

Οι προσομοιώσεις επίσης δείχνουν την μείωση της απόδοσης ως προς την επιθυμητή διαφορά ενέργειας στα δύο σημεία σε ένα ανακλαστικό περιβάλλον τόσο στα σημεία μοντελοποίησης όσο και στις άλλες θέσεις (σχήμα 3.1-β). Τέλος, σε ανακλαστικά περιβάλλοντα παρατηρήθηκε η εξάρτηση του συστήματος από τον χρόνο μοντελοποίησης των συναρτήσεων μεταφοράς. Για μεγαλύτερο χρόνο μοντελοποίησης (2.9s έναντι 0.9s) η απόδοση στα σημεία μοντελοποίησης είναι μεγαλύτερη ωστόσο σε αυτή την περίπτωση πολύ μικρές μετατοπίσεις οδηγούν σε χειρότερα αποτελέσματα (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Επίδραση του χρόνου μοντελοποίησης των συναρτήσεων μεταφοράς στην απόδοση του συστήματος (για $T_{60}=0.8s$). Η απόδοση βελτιώνεται στα μοντελοποιημένα σημεία αναπαραγωγής αλλά μειώνεται έντονα για μικρές μετακινήσεις.

Τέλος, αξιολογήθηκε η απόδοση του συστήματος για την περίπτωση αναπαραγωγής δύο στατιστικά ανεξάρτητων σημάτων ίσης ενέργειας στα δύο σημεία ενδιαφέροντος. Παρατηρείται ότι, σε μη ανακλαστικό περιβάλλον, η κανονικοποιημένη συσχέτιση μεταξύ των δύο σημείων αναπαραγωγής είναι υψηλότερη, όπως και η συσχέτιση μεταξύ του επιθυμητού και του αναπαραγόμενου σήματος. Αντίθετα, σε ανακλαστικό περιβάλλον, η κανονικοποιημένη συσχέτιση μεταξύ των δύο σημείων αναπαραγωγής είναι μειωμένη, αλλά η συσχέτιση μεταξύ επιθυμητού και αναπαραγόμενου σήματος εξαρτάται πολύ έντονα από τον βαθμό μετακίνησης των σημείων αναπαραγωγής (σχήμα 3.4).



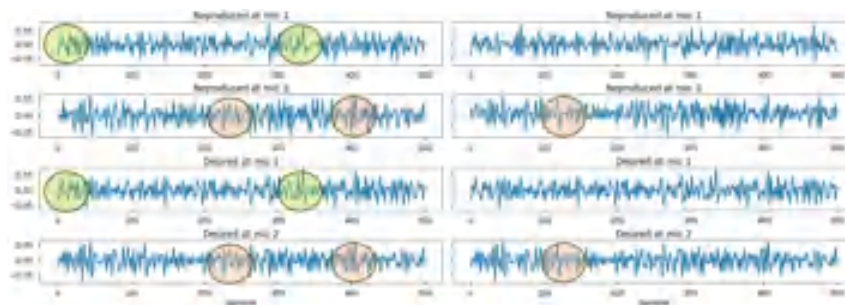
Σχήμα 3.4 Κανονικοποιημένες συσχετίσεις α) μεταξύ των σημάτων στα δύο σημεία ενδιαφέροντος και β) μεταξύ επιθυμητών-αναπαραγόμενων σημάτων σε σχέση με την μετατόπιση των σημείων αναπαραγωγής, για την περίπτωση αναπαραγωγής δύο σημάτων ευρέος φάσματος ίσως ενέργειας.

4. Πειραματική διάταξη

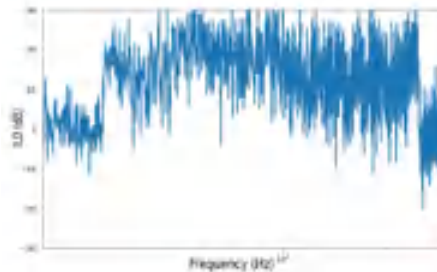
Το σύστημα ακρωτικής παρεμβολής δοκιμάστηκε και πειραματικά σε εργαστηριακές συνθήκες όπου ο μετρούμενος χρόνος ανάκλασης ήταν ίσος με τον αντίστοιχο χρόνο που επιλέχθηκε για τις προσομοιώσεις ($T_{60}=0.8s$). Το σχήμα 4.1 δείχνει την πειραματική διάταξη, ενώ στο σχήμα 4.2 φαίνεται η πολύ καλή απόδοση του συστήματος στα σημεία ενδιαφέροντος για αναπαραγωγή στατιστικά ανεξάρτητων σημάτων ίσης ενέργειας και η μείωση της ομοιότητας μεταξύ επιθυμητών - αναπαραγόμενων σημάτων για πλάγια μετακίνηση 2.5 εκατοστών. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η απόδοση του συστήματος για την περίπτωση αναπαραγωγής σήματος ευρέος φάσματος όπου το ένα εκ των δύο σημείων έχει μηδενική ενέργεια.



Σχήμα 4.1 Πειραματική διάταξη συστήματος ακυρωτικής παρεμβολής και μετρητική μέθοδος για την μέτρηση της απόδοσης για διάφορες μετακινήσεις.



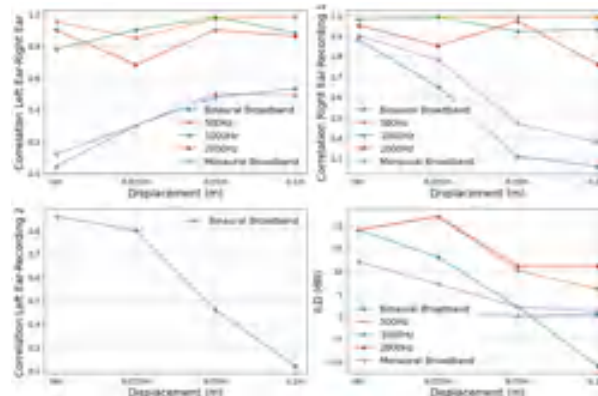
Σχήμα 4.2 Επιθυμητά και πραγματικά σήματα στα δύο σημεία ενδιαφέροντος για μηδενική μετακίνηση (αριστερά) και για μετακίνηση 2.5 cm (δεξιά).



Σχήμα 4.3 Μετρούμενη διαφορά έντασης στα δύο σημεία ενδιαφέροντος για την περίπτωση μονής διαταραχής ευρέος φάσματος με μηδενική μετακίνηση των σημείων ενδιαφέροντος για την πειραματική διάταξη.

Στο σχήμα 4.4 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πειραματικής διάταξης για όλες τις περιπτώσεις αναπαραγωγής. Το πειραματικό σύστημα δοκιμάστηκε για πλάγιες μετατοπίσεις χωρίς κεφάλι.

Σημειώνεται ότι στο πραγματικό πείραμα ο χρόνος των διαταραχών ήταν σημαντικά μεγαλύτερος (10s). Ο θόρυβος προερχόμενος από τα μικρόφωνα και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό οδηγεί στην δυσκολία επίτευξης τέλει σύγκλισης των αλγορίθμων μοντελοποίησης. Αυτό εξηγεί τη μέγιστη διαφοροποίηση των 20dB, σε σύγκριση με τα 30dB που παρατηρήθηκαν στις προσομοιώσεις για τις ίδιες συνθήκες με χρόνο μοντελοποίησης 2.9s (σχήμα 3.3).



Σχήμα 4.4 Μετρούμενα μεγέθη συσχέτισης και διαφοράς έντασης για διάφορες μετατοπίσεις των σημείων ενδιαφέροντος για τις διάφορες περιπτώσεις αναπαραγωγής.

5. Συμπεράσματα

Το προτεινόμενο σύστημα ακρωτικής παρεμβολής κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό στα σημεία μοντελοποίησης. Στο ανακλαστικό περιβάλλον που εξετάστηκε η συσχέτιση μεταξύ των επιθυμητών και των αναπαραγόμενων σημάτων ήταν μικρή (<0.7 και >0.4) για πλάγιες μετακινήσεις μεταξύ 2.5-5 εκατοστών αλλά ικανοποιητική (>0.7) για μετακινήσεις έως 2.5 εκατοστών. Για εμπρόσθιες μετακινήσεις, η συσχέτιση είναι σημαντικά πιο ικανοποιητική. Σε ανηχοικούς χώρους με ύπαρξη κεφαλιού, η συσχέτιση διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για όλες τις υπό εξέταση μετακινήσεις.

6. Αναφορές

- [1] P. Zahorik, D. Brungart, D.S. Brungart, and A.W. Bronkhorst, "Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research," Acta Acustica united with Acustica, 91, pp. 409-420 (2005).
- [2] V. Pulkki, M. Karjalainen, and J. Huopaniemi, "Analyzing Virtual Sound Source Attributes Using a Binaural Auditory Model" Journal of the Audio Engineering Society, 47 (4), (1999).
- [3] S. Galvez, M. Menzies, and F. Fazi, "Dynamic audio reproduction with linear loudspeaker arrays," Journal of the Audio Engineering Society, 67 (4), pp. 190-200 (2019).
- [4] P.A. Nelson, H. Hamada, and S.J. Elliott, "Adaptive inverse filters for stereophonic sound reproduction," IEEE Transactions on Signal Processing, 40, pp. 1621-1632 (1992).
- [5] P.A. Hasgall, F. Di Gennaro, C. Baumgartner, E. Neufeld, B. Lloyd, M.C. Gosselin, et al., "IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues V4.1," IT'IS Foundation (2022).



Ανάκτηση Ψηφιακών Ηχητικών Αρχείων “.wav” στην Ψηφιακή Δικανική Επιστήμη του Ήχου

Χρήστος Καντούτσος¹,
Εμπειρογνώμονας Εξεταστής Πειστηρίων Φωνής & Ήχου
Ε.Α.Π Ακουστικός Σχεδιασμός & Ψηφιακός Ήχος
(Μ.Δ.Ε_Τεχνικές Δικανικής Ανάλυσης στον Εντοπισμό Παραποίησης Ήχου)
[1xristos.kantoutsis@gmail.com](mailto:xristos.kantoutsis@gmail.com)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η μελέτη προτείνει μια αποτελεσματική μέθοδο ανάκτησης διαγραμμένων ηχητικών αρχείων της μορφής ".wav" από USB flash drives (sticks), αλλά και διάφορα άλλα μέσα αποθήκευσης χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία, με την βοήθεια εργαλείων ανοιχτού κώδικα, όπως ο δεκαεξαδικός προβολέας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σάρωσης της συσκευής, διαμέσου αναγνώρισης της δεκαεξαδικής υπογραφής της κεφαλίδας, και της αποκατάστασης των δεδομένων με τη χρήση του μαγικού χρυσού αριθμού για τον προσδιορισμό της τελευταίας διεύθυνσης δεδομένων του αρχείου. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον τρόπο λειτουργίας δεκαεξαδικού προβολέα και του δεκαεξαδικού σε μετατροπή δεκαδικού αριθμητικού συστήματος, καθώς συνδυάζονται με την κωδικοποίηση χαρακτήρων ASCII για την ανάλυση και την ανάγνωση των δεδομένων της κατασκευαστικής δομής ηχητικών αρχείων της μορφής ".wav", όπου και αναλύεται στο παρόν άρθρο. Επιπλέον, αναφέρονται καθιερωμένες τεχνικές ανάκτησης δεδομένων και επισημαίνεται η διαφοροποίηση της τεχνικής μέσω δεκαεξαδικού προβολέα.

Digital Wav Audio File Recovery in Digital Audio Forensics

ABSTRACT

This study proposes an effective method for recovering deleted ".wav" audio files from USB flash drives (sticks) and various other storage media using the same methodology, with the assistance of open-source tools such as a hex viewer. This is achieved by scanning the device, identifying the hexadecimal signature of the header, and restoring the data using the magic number to determine the last data address of the file. Additionally, the study discusses the operation of the hex viewer and the conversion between hexadecimal and decimal numeral systems, combined with ASCII character encoding, for analyzing and reading the data structure of ".wav" audio files, which is analyzed in this article. Furthermore, established data recovery techniques are mentioned, and the differentiation of the technique using a hex viewer is highlighted.

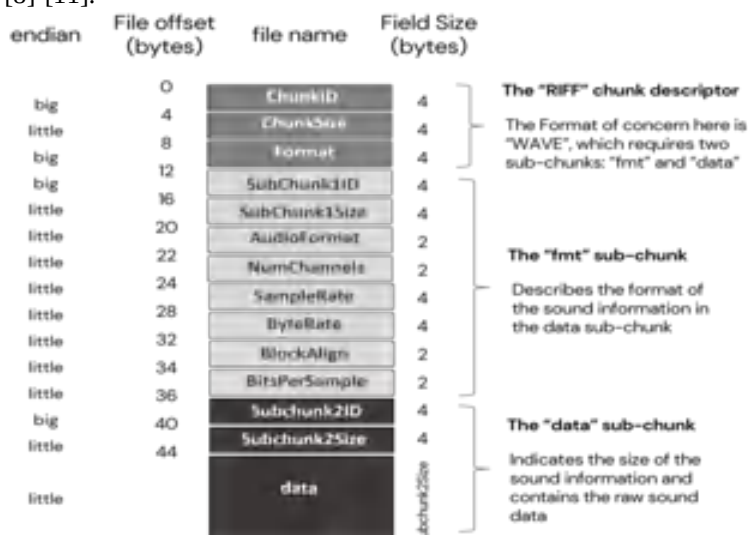
Εισαγωγή

Καθώς η τεχνολογία προχωρά και η χρήση σύγχρονων ψηφιακών μέσων αποθήκευσης αυξάνεται ραγδαία, η ανάγκη για αποτελεσματικές μεθόδους ανάκτησης και ανάλυσης δεδομένων γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Η εισαγωγή αυτής της μεθόδου στην δικανική επιστήμη του ήχου κρίνεται αναγκαία, καθώς ενισχύεται η ικανότητα άμεσης πρόσβασης στην κατασκευαστική δομή των αρχείων ήχου προς ανάκτηση και έλεγχο των δεδομένων τους σε επίπεδο byte, από τον εξεταστή. Η μέθοδος αυτή θα συμβάλει μελλοντικά στην ανάλυση και διερεύνηση αυθεντικότητας της ανακτώμενης ηχητικής πληροφορίας και επικύρωσης συμβατότητας, ή μη του μέσου που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή η αποθήκευση, παρέχοντας μια πιο πλήρη εικόνα των ενεργειών και των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν, μέχρι το αρχείο να ελεγχθεί μέσα από καθιερωμένες τεχνικές ανάλυσης ελέγχου αυθεντικότητας του.

1) Κατασκευαστική Δομή Ηχητικού Αρχείου “.wav”

1.1. Ανάλυση Δομής Αρχείου “.wav”

Για να μπορέσει ο κάθε χρήστης - αναλυτής να επιθεωρήσει την δομή του ηχητικού αρχείου, αλλά και να αντλήσει σχετικές χρήσιμες πληροφορίες μαζί με τον μαγικό δεκαεξαδικό αριθμό, αρκεί και μόνο να προβεί στο άνοιγμα του αρχείου και να προχωρήσει στην οπτική επιθεώρηση της κεφαλίδας, για πιο λεπτομερή ανάλυση των ηχητικών δεδομένων μέσω ενός δεκαεξαδικού προβολέα. Η κεφαλίδα (Header) για όλα τα αρχεία ήχου της ίδιας μορφής είναι ταυτόσημη, όπως επίσης και η ίδια διάταξη ακολουθείται στην δομή κατασκευής του αρχείου (βλ. εικόνα 1-1). Για περαιτέρω ανάλυση των πληροφοριών που απεικονίζονται στην εικόνα (1-1) βάσει της κατασκευαστικής δομής αρχείου της μορφής “.wav” προτείνεται η μελέτη των [1]-[2]-[8]-[11].

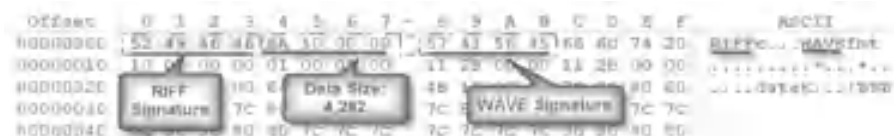


Εικόνα 1-1 Απεικόνιση κλασσικής δομής ηχητικού αρχείου “.wav” [1]-[2]-[8]

Τα αρχεία WAV ακολουθούν μια συγκεκριμένη δομή που περιλαμβάνει διάφορα πεδία με σημαντικές πληροφορίες (εικόνα 1-1). Στην αρχή του αρχείου, το "ChunkID" προσδιορίζει ότι το αρχείο είναι τύπου "RIFF", ενώ το πεδίο "ChunkSize" καθορίζει το συνολικό μέγεθος του αρχείου εξαιρουμένων των πρώτων 8 bytes. Το "Format" επιβεβαιώνει ότι το αρχείο είναι ένα WAVE αρχείο. Στη συνέχεια, το "SubChunk1ID" προσδιορίζει το πρώτο υπο-τμήμα, συνήθως το "fmt", ενώ το "SubChunk1Size" καθορίζει το μέγεθός του, συνήθως 16 bytes για αρχεία PCM. Το "AudioFormat" δείχνει τον τύπο της κωδικοποίησης του ήχου, ενώ το "NumChannels" αναφέρει πόσα κανάλια περιέχει. Το "SampleRate" ορίζει πόσα δείγματα ανά δευτερόλεπτο περιέχει, ενώ το "ByteRate" υπολογίζει το πόσα bytes χρειάζονται ανά δευτερόλεπτο για την αναπαραγωγή του ήχου. Το "BlockAlign" καθορίζει τον αριθμό των bytes που χρησιμοποιούνται για ένα δείγμα ήχου για όλα τα κανάλια και το "BitsPerSample" αναφέρει πόσα bits χρησιμοποιούνται για κάθε δείγμα ήχου. Τέλος, το "SubChunk2ID" καθορίζει ότι πρόκειται για τα πραγματικά δεδομένα ήχου, και το "SubChunk2Size" δείχνει το μέγεθός τους, με το πεδίο "data" να περιέχει αυτά τα δεδομένα [1]-[2]-[8]-[11]-[18].

1.2. Χρυσός Αριθμός (ChunkSize – Data Size)

Ειδικότερα, η κεφαλίδα περιλαμβάνει ένα πεδίο 4 byte από την αρχή του αρχείου, στη θέση 4-7 "byte offset" που περιέχει το μέγεθος δεδομένων του ηχητικού αρχείου ".wav". Το μέγεθος του αρχείου στο πεδίο 4-7 (εικόνα 1-2), ή αλλιώς το "ChunkSize" ή "Data Size" σε δεκαδικό, αποτελεί τον χρυσό αριθμό, καθώς είναι κρίσιμο για την ανάκτηση δεδομένων αρχείων ".wav". Παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες καθορισμού μεγέθους δεδομένων σε κάθε τμήμα (chunk) του αρχείου, διασφαλίζοντας την ακεραιότητά τους και την σωστή τοποθέτησή τους, βάση κατασκευαστικής δομής του αρχείου (εικόνες 1-1 & 1-2) [1]-[2]-[8].



Εικόνα 1-2 Αναγνώριση μορφής αρχείου ".wav" και χρυσού αριθμού [17]

Σύμφωνα και με την εικόνα (1-2), αλλά και την ανάλυση δομής του αρχείου ".wav" το "ChunkSize" ή αλλιώς "Data Size" σε δεκαδική μορφή, αποτελείται από 4 bytes σε μορφή little-endian. Το αναγνωριστικό ("RIFF") εντοπίζεται στην κεφαλίδα (4 bytes στην αρχή) και ακολουθεί το αναγνωριστικό της μορφής του αρχείου, δηλαδή η υπογραφή "WAVE" [1]-[2]-[6]-[8]. Γενικότερα ισχύει:

$$\text{ChunkSize} = \text{FileSize} - 8 \text{ bytes} \quad (1.1)$$

Γενικότερα η τελευταία διεύθυνση ηχητικών δεδομένων σε δεκαεξαδική αναπαράσταση ενός αρχείου της μορφής ".wav", είναι το σύνολο του offset και του μεγέθους δεδομένων του αρχείου, μειωμένο κατά 1 byte. Αυτό, συμβαίνει επειδή η διεύθυνση είναι zero-based, δηλαδή η αρίθμηση των διευθύνσεων ξεκινά από το μηδέν (0) και όχι από το ένα (1) (βλ. εικόνα (1-2)).

2) Λειτουργία Δεκαεξαδικού Προβολέα

2.1. Πώς λειτουργεί ένας δεκαεξαδικός προβολέας

Οι δεκαεξαδικοί προβολείς λειτουργούν προβάλλοντας το περιεχόμενο των αρχείων σε δεκαεξαδική μορφή, επιτρέποντας στους χρήστες να επιθεωρήσουν κάθε byte του αρχείου και να κατανοήσουν την κατασκευαστική δομή του εκάστοτε αρχείου το οποίο τίθεται προς εξέταση. Μέσω της ανάλυσης αυτής της μορφής, οι χρήστες μπορούν να τροποποιήσουν και να εξετάσουν τα δεδομένα με ακρίβεια, είτε να συλλέξουν και να επαληθεύσουν σχετικές πληροφορίες που αφορούν τα χαρακτηριστικά, τα μεταδεδομένα, τις ιδιότητες των αρχείων κ.ά. Αναλυτικότερα, η βασική διάταξη ενός δεκαεξαδικού προβολέα χωρίζεται συνήθως σε 3 εδάφια, όπως περιγράφεται και στην παρακάτω εικόνα (2-1) [2]-[3]-[7]-[8]-[13]-[17].



Εικόνα 2-1 Παράθυρο και πεδία βασικής διάταξης δεκαεξαδικού προβολέα [17]

2.2. Δεκαεξαδικό αριθμητικό σύστημα & κωδικοποίηση χαρακτήρων ASCII

Το δεκαεξαδικό αριθμητικό σύστημα, γνωστό και ως «*hexadecimal*» ή «*base 16*», χρησιμοποιείται ευρέως στους δεκαεξαδικούς προβολείς για την αναπαράσταση δεδομένων, καθώς αποτελεί σύστημα αρίθμησης που χρησιμοποιεί 16 σύμβολα για την αναπαράσταση δυαδικών αριθμών σε πιο συνοπτική μορφή. Αυτά τα σύμβολα περιλαμβάνουν τα ψηφία από το 0 έως το 9 και τα γράμματα από Α έως F, όπου το Α αντιπροσωπεύει τον αριθμό 10, το Β τον 11, και ούτω καθεξής έως το F, που αντιπροσωπεύει τον αριθμό 15 [1]-[2]-[4]-[8]-[6]-[7]-[13]. Η κωδικοποίηση χαρακτήρων ASCII (American Standard Code for Information Interchange) είναι ένα πρότυπο που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση κειμένου στους υπολογιστές κ.ά. Χρησιμοποιεί 7 bit για την κωδικοποίηση 128 διαφορετικών χαρακτήρων, συμπεριλαμβανομένων των λατινικών γραμμάτων, των αριθμών, των σημείων στίξης και κάποιων ειδικών χαρακτήρων ελέγχου. Ο παρακάτω τύπος (2.1) κρίνεται αναγκαίος για τον υπολογισμό συνολικού μεγέθους του αρχείου, καθώς μετατρέπει δεδομένα από δεκαεξαδικό σε δεκαδικό αριθμητικό σύστημα [1]-[2]-[4]-[5]-[6]-[7]-[8]-[13]-[17]:

$$N = a_n \times 16^n + a_{n-1} \times 16^{n-1} + \dots + a_1 \times 16^1 + a_0 \times 16^0 \quad (2.1)$$

Στον τύπο (2.1) η επιλογή του εκθέτη για το δεκαεξαδικό σύστημα αρίθμησης εξαρτάται από τη θέση του ψηφίου στον αριθμό, ξεκινώντας από το λιγότερο σημαντικό ψηφίο (LSB - Least Significant Bit) που είναι η πιο δεξιά θέση και προχωρώντας προς το πιο σημαντικό ψηφίο (MSB - Most Significant Bit) που είναι η πιο αριστερή θέση. Ο εκθέτης καθορίζεται με βάση τη θέση του ψηφίου, όπου το δεξιότερο ψηφίο έχει εκθέτη 0 και αυξάνεται καθώς πηγαίνουμε προς αριστερά [1].

3) Πειραματική Διαδικασία Ανάκτησης

3.1. Βήματα Ανάκτησης Ηχητικών Δεδομένων Αρχείου

Η εν λόγω μεθοδολογία ανάκτησης βασίζεται στο σκανάρισμα της συσκευής, μέσω εισαγωγής της δεκαεξαδικής κεφαλίδας (Hex-Header(offset-έναρξης) = 52 49 46 46), αναγνωριστικό ("RIFF"), μη γνωρίζοντας το τέλος (Footer) [19]. Το footer ενός αρχείου ".wav" μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση (1.1), καθώς δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη υπογραφή που να υποδεικνύει το τέλος, αλλά ο εντοπισμός βασίζεται στο μέγεθος που παρέχει ο χρυσός αριθμός (ChunkSize) που εμφανίζεται δίπλα στο Hex Header. Διενεργώντας ολική διαγραφή σε συσκευές όπως: USB Flash Drives, HDD, SSD, External Disks, και Memory Cards, για να εντοπιστεί στη συνέχεια η τελευταία διεύθυνση ενός ηχητικού αρχείου της μορφής ".wav" και να επιτευχθεί η ανάκτηση του συνόλου των δεδομένων του, εφαρμόστηκαν τα εξής βήματα:

1. Άνοιγμα της συσκευής, σκανάρισμα και εύρεση βάσει δεκαεξαδικής τιμής Hex Header (52 49 46 46) αρχείων της μορφής ".wav" στον δεκαεξαδικό προβολέα.

2. Εύρεση χρυσού αριθμού (ChunkSize) (εικόνα 1-2). Έπειτα, ανάγνωση του ChunkSize: Τα bytes εντοπίζονται σε μορφή little-endian επομένως προβαίνουμε σε big-endian μετατροπή. Σε μορφή big-endian, αυτά τα bytes διαβάζονται από το πιο σημαντικό byte (MSB) στο λιγότερο σημαντικό byte (LSB) [1]-[8]. Αυτό σημαίνει ότι τα bytes πρέπει να διαβαστούν από δεξιά προς τα αριστερά. Για παράδειγμα (βλ. εικόνα 1-2) εάν έχουμε τα bytes BA 10 00 00 από little-endian μορφή μετατρέπονται σε big-endian: 00 00 10 BA.

3. Μετατροπή χρυσού αριθμού (ChunkSize) σε δεκαδικό αριθμό: Η δεκαεξαδική τιμή του 000010BA μπορεί να υπολογιστεί, τύπος (2.1) ως: $0x000010BA = (1 \cdot 16^3) + (0 \cdot 16^2) + (11 \cdot 16^1) + (10 \cdot 16^0) = 1 \cdot 4096 + 0 \cdot 256 + 11 \cdot 16 + 10 \cdot 1 = 4282$ (decimal) [1]-[2]-[8].

4. Υπολογισμός του συνολικού μεγέθους του αρχείου: Το ChunkSize είναι 4282 bytes. Για να βρούμε το συνολικό μέγεθος του αρχείου, πρέπει να προσθέσουμε 8 bytes. Συνολικά "RIFF" ID (4 bytes) και το ίδιο το ChunkSize (4 bytes), σύμφωνα και με τον τύπο (1-1): $totalSize = ChunkSize + 8 = 4282 + 8 = 4290$.

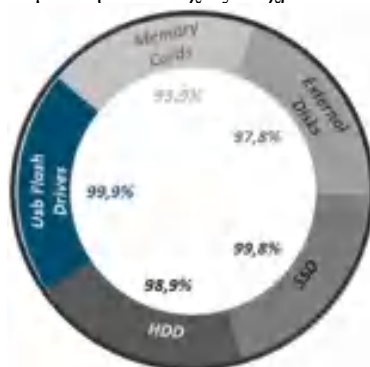
5. Επαλήθευση τελευταίας διεύθυνσης μετατρέποντας το συνολικό μέγεθος (διαιρώντας με το 16 μέχρις ότου το ακέραιο αποτέλεσμα της διαίρεσης να είναι 0) σε δεκαεξαδική τιμή: $4290 \div 16 = 268$ με υπόλοιπο 2 $\Rightarrow 268 \div 16 = 16$ με υπόλοιπο 12 $\Rightarrow 16 \div 16 = 1$ με υπόλοιπο 0 $\Rightarrow 1 \div 16 = 0$ με υπόλοιπο 1. Προκύπτει, 2 12 0 1 το πρώτο δεκαεξαδικό ψηφίο από δεξιά είναι το 1, το επόμενο ψηφίο είναι 0, έπειτα 12 = C σε δεκαεξαδική και το τελικό ψηφίο είναι 2. Η δεκαεξαδική τιμή του 4290 σε Little-Endian ισούται με 10C2, όπου και αποτελεί την τελευταία διεύθυνση byte.

6. Εξαγωγή δεδομένων & αποθήκευση: Μεταβαίνουμε στην θέση 10C2 και εξάγουμε το offset-λήξης. Καθώς γνωρίζουμε το offset-έναρξης (Hex Header), τα δεδομένα που απαρτίζουν το συγκεκριμένο αρχείο αποθηκεύονται με ανάλογη κατάληξη που προκύπτει, από τα πρώτα 4 bytes του αναγνωριστικού ".wav".

7. Στις περιπτώσεις που είναι γνωστό όμως το τέλος του αρχείου, η μεθοδολογία ανάκτησης βασίζεται στην γνώση της δεκαεξαδικής κεφαλίδας (Hex Header) 4 bytes, κοινή σε όλα ηχητικά αρχεία της ίδιας μορφής ".wav" (52494646- riff) που αντιστοιχούν στο Offset-Έναρξης, αλλά και του τέλους (Footer), από 2 έως 8 bytes που αντιστοιχεί στο Offset-Λήξης [19].

3.2. Πειραματικά Αποτελέσματα Ανάκτησης

Η μελέτη αυτή ανέδειξε ότι η χρήση δεκαεξαδικού προβολέα για την ανάκτηση διαγραμμένων “.wav” αρχείων από USB flash drives (sticks) μπορεί να είναι εξαιρετικά αποτελεσματική έως 100%, καθώς βρίσκει εφαρμογή ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία και σε μέσα αποθήκευσης όπως: HDD, SSD, External Disks & Memory cards, όπου και δοκιμάστηκε επιτυχώς σε χρονικό διάστημα ενός έτους.



Εικόνα 3-1 Απεικόνιση ποσοστών επιτυχίας ανάκτησης αρχείων “.wav” σε διαφορετικές συσκευές αποθήκευσης για χρονικό διάστημα πέραν του 1 έτους

Τα USB Flash Drives (εικ. 3-1) καταγράφουν το υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας (99,9%), ενώ οι υπόλοιπες συσκευές (HDD, SSD, External Disks, Memory Cards), παρουσιάζουν επιτυχία ανάκτησης από 95,9% έως 99,8% για χρονικό διάστημα πέραν του 1 έτους από την ημέρα διαγραφής, αποθηκευμένων ηχητικών αρχείων από την συσκευή και επαναφοράς τους.

4) Καθιερωμένες Τεχνικές Ανάκτησης Δεδομένων

Στην ψηφιακή εγκληματολογία (Digital Forensics), οι καθιερωμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται αφορούν, τη συλλογή, επαναφορά, ανάλυση και διατήρηση αποδεικτικών στοιχείων από ψηφιακές συσκευές και όχι μόνο, με τρόπο που να είναι αποδεκτός και συνυφασμένος με νόμιμες ενέργειες. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν, ανάλυση και ανάκτηση, εικόνας δίσκου, διαγραμμένων δεδομένων, αρχείων καταγραφής από κατεστραμμένα μέσα αποθήκευσης, ή της μνήμης από κατεστραμμένες συσκευές κ.ά., όπως και την αποκρυπτογράφηση και καταγραφή δεδομένων, που εντοπίζονται σε αποθηκευτικούς ψηφιακούς χώρους τοπικών δικτύων ηλεκτρονικών υπολογιστών και διάφορων περιφερειακών ή άλλων ειδικών σταθερών ή φορητών μέσων ψηφιακής αποθήκευσης δεδομένων κ.ά. [3]-[14]-[15]-[16]-[18]. Από την άλλη στην δικανική επιστήμη του ήχου (Audio Forensics), δεν υπάρχουν αντίστοιχες καθιερωμένες τεχνικές ανάκτησης δεδομένων σε ανάλογο επίπεδο από το μέσο αποθήκευσης ή καταγραφής, το οποίο ενδέχεται να χρησιμοποιήθηκε και βρίσκεται στα χέρια του εκάστοτε εξεταστή προς διερεύνηση. Βέβαια, πολλά εργαστήρια ηχητικής εγκληματολογίας παγκοσμίως, προβαίνουν σε έλεγχο για την λειτουργικότητα των κατασκευασμένων μέσων ηχογράφησης με σκοπό την διαπίστωση, είτε ασυμβατότητας, είτε περί γνησιότητας, του υλικού φορέα και του μέσου εγγραφής που πιθανόν να χρησιμοποιήθηκε [1]-[9]-[10]-[12].

5) Διαφοροποίηση της Τεχνικής Δεκαεξαδικού Προβολέα

Η τεχνική ανάκτησης ηχητικών δεδομένων μέσω δεκαεξαδικού προβολέα, είναι μια εξειδικευμένη μέθοδος ανάκτησης και ανάλυσης δεδομένων σε χαμηλότερο επίπεδο, δηλαδή στο επίπεδο των bytes και των bits. Αυτή η τεχνική διαφέρει σημαντικά από άλλες αυτοματοποιημένες τεχνικές ανάκτησης δεδομένων, λόγω του επιπέδου λεπτομέρειας και της άμεσης πρόσβασης που παρέχεται στα δεδομένα του εκάστοτε ηχητικού αρχείου που συγκροτούν την ίδια του την δομή. Ακόμα και μέσω συμβατικών εργαλείων που εξειδικεύονται στην ανάκτηση (λογισμικά εμπορικού σκοπού ή ανοικτού κώδικα) και διαφόρων αυτοματοποιημένων μεθόδων (ανάκτηση μέσω κώδικα), δεν προσφέρεται λεπτομερή πρόσβαση και εξέταση των δεδομένων που απαρτίζουν την κατασκευαστική δομή ενός αρχείου. Επιπλέον, η εν λόγω μέθοδος, παρέχει την δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών που σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά ιδιοτήτων και μεταδεδομένων, που πιστοποιούν το μέσο δημιουργίας ή καταγραφής, ενισχύοντας τον έλεγχο αυθεντικότητας αρχείων ήχου.

6) Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Η μελέτη αυτή ανέδειξε ότι η χρήση δεκαεξαδικού προβολέα για την ανάκτηση διαγραμμένων “.wav” αρχείων από USB flash drives (sticks) μπορεί να είναι εξαιρετικά αποτελεσματική και σε άλλα μέσα αποθήκευσης όπως και δοκιμάστηκε με μεγάλη επιτυχία. Ανοικτού κώδικα εργαλεία όπως Hex Editors παρέχουν τις απαραίτητες δυνατότητες για την ανάλυση και αποκατάσταση των δεδομένων με ακρίβεια, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων εμπορικών λογισμικών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία της ανάκτησης, όπως ο χρόνος από τη διαγραφή και η επαναχρησιμοποίηση του χώρου, καταδεικνύουν την ανάγκη για άμεση δράση και συνεχή ενημέρωση των τεχνικών ανάκτησης, καθώς δεν μπορεί να οριοθετηθεί το χρονικό περιθώριο επιτυχούς ανάκτησης όταν το μέσο έχει υποστεί εκτεταμένη χρήση. Στο μέλλον, η έρευνα μπορεί να επεκταθεί στη δοκιμή και αξιολόγηση της μεθοδολογίας σε πιο νεότερα μέσα αποθήκευσης, καθώς η τεχνολογία ολοένα και αναπτύσσεται ραγδαία, αλλά και στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων εργαλείων που θα συνδυάζουν την ακρίβεια του δεκαεξαδικού προβολέα με την ευκολία χρήσης των εμπορικών λογισμικών. Σαφώς, η έρευνα πρέπει να επεκταθεί και μέσα από την ανάλυση και άλλων μορφών ηχητικών αρχείων, κατανοώντας πλήρως και αναλύοντας την κατασκευαστική τους δομή, μέσω ενός δεκαεξαδικού προβολέα. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι, στην ηχητική εγκληματολογία δεν υπάρχουν αντίστοιχες καθιερωμένες τεχνικές ανάκτησης δεδομένων, η εισαγωγή της εν λόγω μεθοδολογίας, κρίνεται απαραίτητη για την ενίσχυση της ανάλυσης και επεξεργασίας των ηχητικών δεδομένων και απόδοσης της ακριβούς εικόνας του μέσου αποθήκευσης ή καταγραφής, το οποίο χρησιμοποιήθηκε. Με αυτόν τον τρόπο, η προτεινόμενη μέθοδος όχι μόνο βελτιώνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αλλά επίσης προσφέρει τη δυνατότητα τεκμηριωμένης ανάλυσης, ενισχύοντας έτσι την εγκυρότητα των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη διερεύνηση των ηχητικών δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση, βασισμένη σε ανοιχτά εργαλεία, αναμένεται να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός στη δικανική επιστήμη του ήχου (Audio Forensics) και όχι μόνο, καθιστώντας την πιο προσαρμοστική στις συνεχώς μεταβαλλόμενες τεχνολογικές απαιτήσεις.

7) Αναφορές

- [1] C. Kantoutsis «Digital forensics techniques in audio tampering detection» Master's thesis, Hellenic Open University, Patras (2024).
- [2] «Hex Editing for Archivists» AV-RD. [Online]. Available: https://www.av-rd.com/knowhow/data/hexedit_archivists-1.html#reading-analyzing-the-data. Accessed: Aug. 20, 2024.
- [3] R. Kaur and A. Kaur «Digital forensics» International Journal of Computer Applications, vol. 50, pp. 5-9 (2012).
- [4] «ASCII Code - The extended ASCII table» ASCII-Code.com. [Online]. Available: <https://www.ascii-code.com/>. Accessed: Aug. 20, 2024.
- [5] S. O. O. Duke and J. N. Obidinnu «The inverted-triangle technique of converting the computer number systems (binary, octal and hexadecimal) to decimal» Global Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 15, pp. 255-264 (2009).
- [6] S. Sourabh and M. Chauhan «Computer file signature analysis through hexadecimal editor software» in Proceedings of 3rd International Conference on Computing Informatics and Networks: ICCIN 2020, Singapore: Springer, pp. 89-100 (2021).
- [7] R. B. Hayward and B. Toft Hex: The full story CRC Press, New York (2019).
- [8] P. Bubestinger-Steindl, «Hex Editing for Archivists (Part 2): How to Read & Edit Binary Data,» AV-RD, 2018. Available: https://www.av-rd.com/knowhow/data/hexedit_archivists-2.html. Accessed: Aug. 24, 2024..
- [9] BPM-FSA-002, «Best Practice Manual for Digital Audio Authenticity Analysis,» ENFSI, 2024.
- [10] SWGDE «Best Practices for Digital Audio Authentication» Version 1.2, Scientific Working Group on Digital Evidence, (2017).
- [11] «Wav (RIFF) File Format Tutorial,» Topher Lee, 2024. Available: <http://www.topherlee.com/software/pcm-tut-wavformat.html>. Accessed: Aug. 24, 2024.
- [12] D. Lacey, Digital Audio Forensics Fundamentals, CRC Press, 2020.
- [13] «010 Editor Manual,» SweetScape Software, 2024. Available: <https://www.sweetscape.com/010editor/manual/>. Accessed: Aug. 24, 2024.
- [14] E. Karra Taniskidou, "Computer Forensics," National Technical University of Athens, School of Applied Mathematical and Physical Sciences, (2014).
- [15] «What is Digital Forensics?» EC-Council, 2024. Available: <https://www.eccouncil.org/cybersecurity-exchange/computer-forensics/what-is-digital-forensics/>. Accessed: Aug. 24, 2024.
- [16] M. Rafique, and M. N. A. Khan «Exploring static and live digital forensics: Methods, practices and tools» International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 4, pp. 1048-1056 (2013).
- [17] «HxD - Freeware Hex Editor and Disk Editor» mh-nexus, 2024. Available: <https://mh-nexus.de/en/hxd/>. Accessed: Aug. 24, 2024.
- [18] S. Bhalshankar and A. K. Gulve «Audio Steganography: LSB Technique Using a Pyramid Structure and Range of Bytes» Government College of Engineering, Aurangabad, 2015.
- [19] G. Kessler, "File Signatures," available at: https://www.garykessler.net/library/file_sigs.html, (Accessed: 30/08/2024).



Το ηχητικό περιβάλλον της φοιτητικής καθημερινότητας την περίοδο της πανδημίας

Ρίκα Δελιγιαννίδου, Δωροθέα Παρίντα, Βενετίνα Τσουκαλά, Ευάγγελος Φυντάνης,
Νίκος Μπάρκας

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
nbarkas@arch.duth.gr (υπεύθυνου)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δημοσίευση αποτελεί τμήμα προπτυχιακής έρευνας στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. την περίοδο κοινωνικής αποστασιοποίησης, κατά τη διάρκεια της πανδημίας (2020-21). Σκοπός ήταν η διερεύνηση και αξιολόγηση του ηχητικού περιβάλλοντος όπου διαβιών καθημερινά οι φοιτητές / φοιτήτριες.

Η έρευνα επιχειρεί να αποτυπώσει την ηχητική καθημερινότητα των φοιτητών / φοιτητριών και τους τρόπους με τους οποίους επηρεάζει την ζωή τους. Παράλληλα, προσπαθεί να αξιολογήσει τις αντιλήψεις για την ακουστική άνεση στη φοιτητική διαμονή συγκριτικά με την πρότερη, οικογενειακή ζωή των ερωτώμενων και την πιθανή διαμόρφωση μιας ανεκτικής στάσης απέναντι στους θορύβους, ανάλογα με το τύπο και το πλήθος των συνοικούντων στην οικογενειακή κατοικία.

Όπως διαπιστώνουμε, κατά την διάρκεια της φοιτητικής ζωής εμπεδώνεται μια τάση υποτίμησης του προβλήματος της ηχορύπανσης και των μακροχρόνιων επιπτώσεων της στην υγεία.

The sound environment of student everyday life during the pandemic

ABSTRACT

The paper is a part of undergraduate research at the Department of Architectural Engineering of the D. U. of Thessaloniki, the period of social distancing, during the pandemic (2020-21). The purpose was to investigate and evaluate the sound environment where the students live every day.

The research attempts to capture the audio daily life of students and the ways in which it affects their lives. At the same time, it tries to evaluate the perceptions of the acoustic comfort in student accommodation compared to the previous, family life of the interviewees and the possible formation of a tolerant attitude towards noises, depending on the type and number of people living in the family residence.

As we can see, during student life a tendency to underestimate the problem of noise pollution and its long-term effects on health is consolidated.

Εισαγωγή

Η δημοσίευση είναι τμήμα μιας προπτυχιακής έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Δ.Π.Θ. την περίοδο κοινωνικής αποστασιοποίησης, κατά τη διάρκεια της πανδημίας (2020-21). Σκοπός της ήταν να διερευνήσει το ηχητικό περιβάλλον στο οποίο διαβιούν οι φοιτητές / φοιτήτριες, να αποτυπώσει την ηχητική καθημερινότητα τους και να προσδιορίσει τους τρόπους με τους οποίους επηρεάζει την ζωή τους. Παράλληλα, επιχειρείται μια αξιολόγηση των φοιτητικών αντιλήψεων όσον αφορά την ακουστική άνεση στη φοιτητική διαμονή, τη σύγκριση με την πρότερη, οικογενειακή κατοικία των ερωτώμενων και την πιθανή διαμόρφωση μιας ανεκτικής στάσης απέναντι στους θορύβους, ανάλογα με τη διαρρύθμιση και το πλήθος των συνοικούντων στην οικογενειακή κατοικία. [1]

Η ελλειψή (ως ανύπαρκτη) ηχομόνωση στους περισσότερους χώρους φοιτητικής διαμονής οδηγεί συνήθως στη λανθασμένη πεποίθηση ότι η ηχορύπανση αποτελεί ένα φυσικό (κι επομένως αναπόφευκτο) φαινόμενο, δηλαδή πως η ακουστική άνεση δεν αποτελεί αυτονόητο δικαίωμα του κάθε πολίτη. Ευνόητα, οι οικοδομικές ελλείψεις αυτών των χώρων προσωρινής διαμονής, σε συνδυασμό με τις οικονομικές δυσκολίες της πλειονότητας των οικογενειών, αποθαρρύνουν την αναζήτηση και επιλογή ενός φοιτητικού καταλύματος με κριτήριο επιλογής την καλή ηχομόνωση.

Θόρυβος είναι κάθε ήχος που ενοχλεί στην εργασία, στον ύπνο, στην επικοινωνία. Οι θόρυβοι συνοδεύουν τη σύγχρονη καθημερινότητα και αποτελούν κύριο λόγο υποβάθμισης της ποιότητας ζωής στο αστικό περιβάλλον. Οι πιθανότερες πηγές εξωτερικών θορύβων είναι η κυκλοφορία, οι βιομηχανίες, οι συναθροίσεις και τα καταστήματα αναψυχής. Οι θόρυβοι στο εσωτερικό των κτιρίων προέρχονται κυρίως από τη λειτουργία των οικιακών Η/Μ συσκευών και τις κινήσεις ή τις ομιλίες των συνοίκων / συγκατοίκων. [2]

Σύμφωνα με το άρθρο 12 του Ελληνικού Κτιριοδομικού Κανονισμού, η ακουστική άνεση είναι η ηχητική κατάσταση που εξυπηρετεί τις λειτουργικές ανάγκες των χρηστών ενός κτιρίου, τους προστατεύει από εξωτερικούς θορύβους και τους παρέχει ένα κατάλληλο ακουστικό περιβάλλον. Ένα σύνολο παραμέτρων και κριτηρίων ακουστικής άνεσης προσδιορίζουν τις απαιτήσεις ηχομόνωσης και τις προδιαγραφές ηχοπροστασίας. Ωστόσο, αυτές οι διατυπώσεις είναι απατηλές, επειδή στην πραγματικότητα η έκδοση μιας οικοδομικής άδειας δεν περιλαμβάνει την υποβολή και τον έλεγχο μιας μελέτης ηχομόνωσης, επομένως το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο δεν κατοχυρώνει την τεχνική αρμοδιότητα των μελετητών, ούτε προσδιορίζει την ευθύνη των κατασκευαστών. [3], [4], [5]

1. Μεθοδολογία

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δείγμα 26 φοιτητών / φοιτητριών, που σε ποσοστό 50% φοιτούσαν στην Πολυτεχνική Σχολή Δ.Π.Θ. ενώ οι υπόλοιποι /ες σε διάφορα άλλα ιδρύματα της χώρας (στο Ηράκλειο, το Βόλο, την Αθήνα, τη Λαμία, την Κοζάνη και την Κομοτηνή). Το ερωτηματολόγιο συντάχθηκε ύστερα από διαδοχικές απόπειρες, ξεκινώντας από προσωπικές εμπειρίες. Αποτελείται από 12 ομάδες ερωτήσεων, συνολικά 26 ερωτήσεις, εκ των οποίων 9 αφορούσαν

προσωπικά στοιχεία, 3 αφορούσαν οικοδομικά ζητήματα της οικογενειακής και της φοιτητικής κατοικίας, ενώ οι υπόλοιπες 14 αφορούσαν υποκειμενικές εκτιμήσεις απέναντι στην πηγή και τα χαρακτηριστικά του θορύβου σε διάφορες περιστάσεις, καθώς και την υποκειμενική αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης στους χώρους της φοιτητικής διαμονής.

Το ερωτηματολόγιο διακινήθηκε ψηφιακά στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Οι ανώνυμες απαντήσεις αποδελτιώθηκαν, κατηγοριοποιήθηκαν και απεικονίστηκαν σε διαγράμματα (πίτες ή ιστογράμματα). Κατά τη συλλογή των δεδομένων, οι δυσκολίες αφορούσαν κυρίως την ολοκληρωμένη (χωρίς αντιφάσεις) συμπλήρωση των ερωτήσεων ανάπτυξης, αλλά και την έγκαιρη αποστολή των απαντήσεων. Το τελικό δείγμα περιλαμβάνει 13 φοιτητές και 13 φοιτήτριες, που στη συντριπτική πλειονότητα νοικιάζουν σε πολυκατοικία (92%), ατομικά (68%) ή με συγκατοικο (28%).

Από όσους/όσες διαμένουν σε πολυκατοικία, ποσοστό 46% ενοικιάζει στον 1^ο όροφο, σε διαμερίσματα εγγύς σε δημόσιο χώρο ή σε δρόμο. Όσον αφορά την οικογενειακή κατοικία διαμένουν σε πόλη (ποσοστό 65.5%), συνοικούν με 4 ή περισσότερα άτομα (77%) και φαίνεται πως είναι εξοικειωμένοι με τους θορύβους της συγκατοίκησης. Επίσης δηλώνουν πως στο οικογενειακό σπίτι διέμεναν σε ανεξάρτητο δωμάτιο (89%), δηλαδή διέθεταν ένα προσωπικό χώρο για ηρεμία ή διάβασμα.



2. Τα δεδομένα της έρευνας

Όσον αφορά την ηλεκτρική συσκευή που ενοχλεί συχνότερα στην φοιτητική διαμονή, από το δικό τους ή γειτονικό διαμέρισμα, το μεγαλύτερο ποσοστό των ενοχλήσεων (σε πολλαπλές απαντήσεις) αφορά το πλυντήριο ρούχων 54%, την ηλεκτρική σκούπα 46%, τα στερεοφωνικά 19% και την τηλεόραση με 11.5%. Φαίνεται δηλαδή πως, για τη σημερινή νεολαία η τηλεόραση αποτελεί έναν λευκό (απαρατήρητο) ήχο που δεν ενοχλεί, καθώς επίσης και πως οι συσκευές με σταθερό ήχο λειτουργίας (πχ κλιματιστικό, ψυγείο) δεν γίνονται συνήθως αντιληπτές ως πηγές θορύβου.

Όσον αφορά τις κύριες περιστάσεις θορυβικής όχλησης από γειτονικά διαμερίσματα (μέχρι 3 απαντήσεις), κυριαρχούν οι καυγάδες (58%), οι συζητήσεις (34.5%), τα υδραυλικά συστήματα και το βάδισμα (31%), δηλαδή θόρυβοι κοινωνικής συμπεριφοράς και οικοδομικών ελλείψεων.



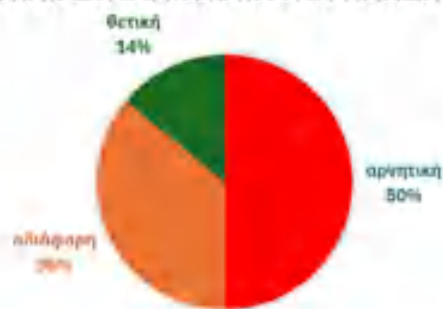
Οι υποκειμενικές οχλήσεις προέρχονται κυρίως (ποσοστό 73%) από δρόμους ή δημόσιους χώρους, δηλαδή οφείλονται μάλλον σε προβληματικά κουφώματα, παρά στα εσωτερικά τοιχώματα της κατοικίας. Οι ενοχλητικοί κυκλοφοριακοί θόρυβοι προέρχονται κυρίως από μοτοσυκλέτες (82%) και αφορούν κυρίως ενοίκους χαμηλών ορόφων. Επίσης, όσον αφορά τις μουσικές εκπομπές, αφορούν κυρίως την ένταση και το είδος της μουσικής (από 27%), ενώ όσον αφορά την περίσταση της ενόχλησης αφορά κυρίως τη μελέτη (58%) και τον ύπνο (23%).



Την περίοδο της κοινωνικής αποστασιοποίησης, σχετικά μικρό ποσοστό (31%) εκτιμά πως επιδεινώθηκαν οι οχλήσεις από τους γείτονες, λόγω των περιορισμών

στην κυκλοφορία. Αυτή την ίδια περίοδο, όταν είχε απαγορευτεί η μουσική στα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, ποσοστό 50% δηλώνει δυσανεξία και ποσοστό 36% αδιαφορία

Η ΑΠΑΓΟΡΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΣΤΑ ΚΑΤΑΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΝΔΗΜΙΑ



Στην θεώρηση πως ο θόρυβος είναι φυσικό (κι αναπόφευκτο) φαινόμενο, ποσοστό 69% συμφωνεί, δηλαδή μάλλον έχει συνηθίσει να διαμένει σε σπίτια περιορισμένης ακουστικής άνεσης. Τέλος στη σχετική εκτίμηση πως η ηχομόνωση είναι οικοδομική πολυτέλεια (σε συνδυασμό με τις οικονομικές δυσκολίες για την εξεύρεση φοιτητικής κατοικίας) ποσοστό 79% δηλώνει πως η ηχομόνωση δεν αποτέλεσε κριτήριο επιλογής της φοιτητικής κατοικίας. Επίσης η πλειονότητα (92%) δηλώνει πως διαβάζει στον χώρο της φοιτητικής διαμονής, ενώ ως αντίδραση σε περιστάσεις θορύβου, δηλώνουν πως καταφεύγουν σε κάποιο καφέ (50%) ή σε άλλο σπίτι, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό των υπολοίπων δηλώνει πως υπομένει το θόρυβο φορώντας ακουστικά ή βάζοντας εντονότερα μουσική.

Οι απαντήσεις στις ερωτήσεις ανάπτυξης, σχετικά με οδυνηρές θορυβικές εμπειρίες αναφέρονται (44%) στους γείτονες και στην κυκλοφορία ή σε οικοδομικές εργασίες στα γειτονικά διαμερίσματα, κατά τις ώρες κοινής ησυχίας (από 25%). Φαίνεται δηλαδή πως οι ενοχλήσεις προέρχονται κυρίως από τα οικοδομικά διαχωριστικά στοιχεία (μεσοτοιχίες και πατώματα, ποσοστό 69%) και δευτερευόντως από τα κουφώματα (ποσοστό 25%), δεδομένα που αντιφάσκουν σε σχέση με προηγούμενες απαντήσεις επιλογής, όσον αφορά την πηγή και το είδος του θορύβου.

3. Συμπεράσματα - επίλογος

Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν πως οι φοιτητές και οι φοιτήτριες στην πλειονότητα αντιμετωπίζουν κοινά προβλήματα θορύβου. Όσον αφορά το είδος των θορύβων κυριαρχούν οι εξωτερικές οχλήσεις (73%), από μοτοσυκλέτες (82%), αλλά και οι οικοδομικές εργασίες, δηλαδή μάλλον τη χαμηλή ηχομονωτική ικανότητα των κουφωμάτων. Ως εσωτερικός θόρυβος, γενικά προηγείται η ενόχληση από

διαπληκτισμούς (57%) και ακολουθεί ο λειτουργικός θόρυβος από το πλυντήριο ρούχων (54%) στο ίδιο ή σε γειτονικό διαμέρισμα.

Χαρακτηριστική είναι η χαμηλή προσδοκία των φοιτητών / φοιτητριών για ακουστική άνεση (70%), με αποτέλεσμα να επιδεικνύουν υπομονή (92%) αντί να αντιδράσουν. Ενδεικτική είναι επίσης η απουσία αναφοράς στην ηχομόνωση (ποσοστό 79%), ως κριτηρίου επιλογής μιας φοιτητικής κατοικίας, καθώς ο θόρυβος θεωρείται φυσικό κι αναπόφευκτο φαινόμενο. Τέλος φαίνεται πως η απαγόρευση της μουσικής στα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος κατά την περίοδο της πανδημίας, φαίνεται πως επιβάρυνε την ψυχολογία των φοιτητών / φοιτητριών, μολονότι οι θόρυβοι από τα γειτονικά διαμερίσματα μάλλον παρέμειναν ίδιοι (50%) ή εντάθηκαν (31%).

Οι ολοκληρωμένες κι αναλυτικές απαντήσεις στις ερωτήσεις ανάπτυξης έδειξαν πως κάποιοι ερωτώμενοι / κάποιες ερωτώμενες δεν έδειξαν ιδιαίτερη προσοχή στο ερωτηματολόγιο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται απαντήσεις με αντιφάσεις και χωρίς συνοχή, αλλά και να περιοριστούν οι ολοκληρωμένες απαντήσεις. Πρόκειται πιθανά για μια γενικότερη στάση που αφορά τον πρόχειρο και ακατάστατο τρόπο συμμετοχής στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Βέβαια γνωρίζαμε εξ αρχής πως δεν είχαμε τη δυνατότητα της άμεσης επαφής με τα άτομα του δείγματος, ωστόσο επιζητήσαμε απαντήσεις εν θερμώ, μέσα στην ατμόσφαιρα της πανδημίας.

Γενικά, παρατηρήθηκε μια συγκριτικά ανεκτική και απαθής στάση στα ζητήματα του θορύβου, κατάσταση που μπορεί να ερμηνευτεί λόγω μιας αίσθησης προσωρινότητας στη διαμονή. Φαίνεται δηλαδή πως στη φοιτητική καθημερινότητα παραγνωρίζονται τα προβλήματα που σχετίζονται με το θόρυβο, την ηχορύπανση και τις επιπτώσεις στην ψυχική και σωματική υγεία. Πρόκειται για μια κοινωνική στάση που καλλιεργείται με ιδεολογικά και πολιτιστικά στερεότυπα, διαμορφώνεται μέσα από τις σοβαρές ελλείψεις στην εκπαίδευση και στο θεσμικό πλαίσιο, εδράζεται πάνω στην ηχομονωτική ανεπάρκεια των κτιριακών κατασκευών και τελικά (για να μην κρυβόμαστε) αξιολογεί αρνητικά τις επιδόσεις όσων δηλώνουν πως ασχολούνται με την ηχοπροστασία.

Τελικά, η έρευνά μας (στο συγκεκριμένο πεπερασμένο χρονικό και ποσοτικό πλαίσιο) έδειξε την υποτίμηση του θορύβου και της ηχορύπανσης, αλλά και των επιπτώσεων τους στην υγεία. Ελπίζουμε ότι η ερευνά μας θα συμβάλει στην ευαισθητοποίηση των νέων στα ζητήματα του θορύβου και στην σπουδαιότητα της ακουστικής άνεσης κατά την διάρκεια της φοιτητικής ζωής.

4. Αναφορές

- [1] Δ. Παρίντα - Κ.Β. Τσουκαλά - Ευ. Φυντάνης «Διερεύνηση του ηχητικού περιβάλλοντος της φοιτητικής καθημερινότητας», Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, Τ.Α.Μ. - Δ.Π.Θ, Ξάνθη 2023
- [2] Χρ. Αθανασόπουλος, «Προστασία κτιρίων», Αθήνα, 1991
- [3] Ελληνικός Κτιριοδομικός Κανονισμός, άρθρο 12 (ΦΕΚ 59 / Δ / 3-02-89)
- [4] Ν. Μπάρκας, «Πρόγραμμα ΕΥΑΙΣΘΟ : ήχος και θόρυβος, μια θεωρητική εισαγωγή» διδακτικές σημειώσεις Τ. Α. Μ. – Δ. Π. Θ. Ξάνθη, 2017
- [5] World Health Organization (WHO) «International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems, 10th revision», 2019 (ανακτήθηκε 5/11/23)



Σφαιρική νομική πείρα από δικαστική και εξωδικαστική μεταχείριση περιπτώσιολογίας υποθέσεων ηχορρύπανσης

Νίκη Τσαφούρου – Δικηγόρος, LL.M, MSc
Φειδιππίδου 12, Αθήνα, TK 11526
nikktaf@gmail.com και ntsafourou@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην καθημερινή ζωή και νομική πράξη απαντώνται περιπτώσεις ηχορρύπανσης από διαφορετικές πηγές: 1) από τον τρόπο διαβίωσης σε άλλες γειτονικές κατοικίες, 2) από τη λειτουργία γειτονικών καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος και κέντρων διασκέδασης, 3) από τη λειτουργία παρακείμενων μηχανολογικών εγκαταστάσεων και μηχανημάτων, 4) από τη λειτουργία γειτονικών χώρων άθλησης, 5) από τη χρήση από το κοινό γειτονικών δημόσιων χώρων (πάρκων, πλατειών, προαυλίων εκκλησιών). Με την παρούσα επιχειρείται συστηματοποίηση της ανά πηγή ηχορρύπανσης εφαρμοζόμενης νομοθεσίας δημοσίου δικαίου, επισκόπηση των εξωδικαστικών προσπαθειών επίλυσης μεταξύ ιδιωτών, ανάδειξη της αποτελεσματικότερης νομικής βάσης ιδιωτικού δικαίου στην δικαστική επίλυση μεταξύ ιδιωτών, καταγραφή του βαθμού δικαστικής δικαίωσης ανά δικαστική διαδικασία και δικαστικό στάδιο, αποτύπωση της παρέμβασης Αστυνομίας και Υγειονομικής Υπηρεσίας, και εξαγωγή συμπερασμάτων επί των ανωτέρω.

Comprehensive legal experience from judicial and extrajudicial handling of noise pollution cases

ABSTRACT

In everyday life as well as in legal reality there are noise pollution cases coming from different sources: 1) the way of living in neighbouring houses, 2) the function of stores of health interest with music and nightclubs, 3) the function of neighbouring mechanical installations and machines, 4) the use of neighbouring sports fields, 5) the use of neighbouring public spaces (parks, squares, courtyard of the churches). Thus, this work includes a systemization of the provisions of public law applicable by source of noise pollution, the extra-judicial efforts of individuals to resolve such disputes, the identification of the most effective provision of private law in judicial resolution of such disputes, the degree of success of judicial resolution by judicial procedure and stage, the intervention of the police and the health department, and, the drawing conclusions on the above.

Εισαγωγή

Το πρόβλημα της ηχορρύπανσης είναι πολυπαραγοντικό, πλην όμως κατ' αρχήν προϋποθέτει γειτνίαση, και εκδηλώνεται κυρίως ανάμεσα σε κλειστούς χώρους οριζόντιων ιδιοκτησιών πολυκατοικιών (δίπλα, άνωθεν, κάτωθεν) και ανάμεσα σε κλειστούς χώρους μεζονετών (χωρισμένων με μεσοτοιχία), κείμενων ακόμα και σε ακριβές περιοχές της χώρας, αλλά και ανάμεσα σε κλειστούς χώρους διαφορετικών οικοδομών με διακριτούς εξωτερικούς τοίχους με τον έναν να είναι πλησίον του άλλου σε μικρή απόσταση και τα ανοίγματά τους να «επικοινωνούν» άμεσα, δηλαδή χωρίς άλλα ενδιάμεσα εμπόδια, διευκολύνοντας την απευθείας μεταφορά του θορύβου μεταξύ τους. Βεβαίως, οι περισσότεροι κλειστοί χώροι έχουν ως αναπόσπαστο μέρος τους και έναν μικρότερο ανοιχτό χώρο, όπως μπαλκόνι, βεράντα, αυλή, κήπο κτλ., γεγονός που δημιουργεί επίσης προϋποθέσεις ηχορρύπανσης. Ενώ δεν αποκλείεται ηχορρύπανση να εκδηλώνεται και ανάμεσα σε έναν κλειστό και έναν ανοιχτό χώρο, με συνηθέστερη περίπτωση να εκπέμπεται από τον ανοιχτό χώρο καταφθάνοντας κι επιβαρύνοντας τον κλειστό χώρο. Τούτων δοθέντων, όσο υπάρχει γειτνίαση, θα υπάρχουν και περιπτώσεις ηχορρύπανσης οι οποίες αναλόγως των ιδιαιτεροτήτων τους, θα αξιώσουν νομική κάλυψη, στο πλαίσιο δε αυτό, η κατηγοριοποίησή τους ανά θεματική πηγή αποδεικνύεται κομβική για την εφαρμοστέα εκάστοτε νομοθεσία δημοσίου δικαίου. Αντίθετα, για την εφαρμοστέα εκάστοτε νομοθεσία ιδιωτικού δικαίου υφίστανται «καθολικές» νομικές βάσεις, μεταξύ των οποίων προκρίνεται η αποτελεσματικότερη. Σημαντική είναι ακόμα και η εμπειρία από την τριβή με την ηχορρύπανση σε επίπεδο προσπάθειας τόσο εξωδικαστικής όσο και δικαστικής επίλυσης αυτής.

1. Η περιπτώσιολογία / ομαδοποίηση των υποθέσεων ηχορρύπανσης και η αντίστοιχη νομοθεσία δημοσίου δικαίου

Στην καθημερινή ζωή και νομική πράξη απαντώνται περιπτώσεις ηχορρύπανσης από διαφορετικές πηγές. Οι συχνότερες εξ αυτών φαίνεται ότι είναι 1) από τον τρόπο διαβίωσης και εν γένει χρήσης σε άλλες γειτονικές κατοικίες, 2) από τη λειτουργία γειτονικών καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος και κέντρων διασκέδασης, 3) από τη λειτουργία παρακείμενων μηχανολογικών εγκαταστάσεων και μηχανημάτων, 4) από τη λειτουργία γειτονικών χώρων άθλησης, 5) από χρήση δημόσιων χώρων (πάρκων, πλατειών, προαυλίων εκκλησιών κτλ) από το κοινό. Έτσι:

1) Ο τρόπος διαβίωσης και χρήσης σε άλλες γειτονικές κατοικίες μπορεί να σημαίνει εκπομπή μουσικής, φωνασκίες, σύρσιμο επίπλων, χτύπους, ποδοβολητά, οικόσιτα ζώα, λειτουργία οικιακών μηχανημάτων και ηλεκτρικών συσκευών, όπως πλυντήρια, ψυγεία, air condition, κτλ. Σχετικώς εφαρμόζεται η εξής δημοσίου δικαίου νομοθεσία: η Αστυνομική Διάταξη 3/1995, το άρθρο 12 παρ. 6 του Ν. 1481/1984, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, το άρθρο 417 επ. ΚΠΔ, το άρθρο 12 της Υ.Α. 3046/304/1989 "Κτιριοδομικός Κανονισμός" (ΦΕΚ 59/Δ/1989) εκδοθείσας κατ' εξουσιοδότηση του άρθρου 26 του ν. 1577/1985 "Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός (ΦΕΚ 210/Α/1985), το άρθρο 15 του ν. 4830/2021 (ΦΕΚ Α 169/18.09.2021) περί διατήρησης ζώων συντροφιάς σε

κατοικίες (σε αντικατάσταση του παλαιού άρθρου 17 παρ. 1 και 4 της Υγειονομικής Διάταξης Υ1β/2000/1995 και του παλαιού άρθρου 6 του ν. 3170/2003).

2) Η λειτουργία γειτονικών καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος και κέντρων διασκέδασης σημαίνει κυρίως εκπομπή μουσικής (ζωντανής και μη), φωνασκίες θαμώνων κτλ. Σχετικώς εφαρμόζεται η εξής δημοσίου δικαίου νομοθεσία: η Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985, η Αστυνομική Διάταξη 3/1995, το άρθρο 12 παρ. 6 του Ν. 1481/1984, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, το άρθρο 417 επ. ΚΠΔ, το άρθρο 2 παράγραφος 2 σημείο α' του π.δ. 180/1979, το άρθρο 15 παρ. 2 της Κ.Υ.Α. οικ. 16228/17.5.2017 (ΦΕΚ Β 1723 2017), το άρθρο 12 της Υ.Α. 3046/304/1989 "Κτιριοδομικός Κανονισμός".

3) Η λειτουργία παρακείμενων ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και μηχανημάτων μπορεί να αφορά είτε σε γειτονικές κατοικίες, όπως μηχανήματα εξαερισμού και αφύγρανσης εσωτερικής πισίνας, εξωτερικές μονάδες κλιματισμού κτλ., είτε σε γειτονικά καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, όπως καμινάδες / ανεμιστήρες εξαερισμού κουζίνας κτλ., είτε και σε οποιαδήποτε άλλη αιτία όπως λειτουργία βιομηχανιών και βιοτεχνιών, εργοταξίων, διενέργειας τεχνικών έργων κτλ. Σχετικώς εφαρμόζεται η εξής δημοσίου δικαίου νομοθεσία: το π.δ. 1180/81 (Υ.Ε.Κ. 293/Α 6-10-1981), τα άρθρα 28, 29, 30 του νόμου 1650/1986, η Αστυνομική Διάταξη 3/1995, το άρθρο 12 παρ. 6 του Ν. 1481/1984, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, το άρθρο 417 επ. ΚΠΔ, το άρθρο 12 της Υ.Α. 3046/304/1989 "Κτιριοδομικός Κανονισμός".

4) Η λειτουργία γειτονικών χώρων άθλησης μπορεί να σημαίνει τόσο κλειστούς χώρους γυμναστηρίων όσο και ανοιχτούς χώρους γηπέδων. Σχετικώς εφαρμόζεται η εξής δημοσίου δικαίου νομοθεσία: Το άρθρο 32 παρ. 1 και 2 του νόμου 2725/1999, το άρθρο 4 ζ' του π.δ. 219/2006, η Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985, η Κ.Υ.Α. ΔΙΑΔΠ/Φ.Α.2.1/33565/2013 (ΦΕΚ Β' 3169/12/12/2013), η Αστυνομική Διάταξη 3/1995, το άρθρο 12 παρ. 6 του Ν. 1481/1984, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, το άρθρο 417 επ. ΚΠΔ, το άρθρο 12 της Υ.Α. 3046/304/1989 "Κτιριοδομικός Κανονισμός".

5) Η χρήση δημόσιων χώρων από πολίτες μπορεί να σημαίνει φωνασκίες, τραγούδια, μουσικά όργανα, μαγνητόφωνα, ραδιόφωνα κτλ. Σχετικώς εφαρμόζεται η εξής δημοσίου δικαίου νομοθεσία: Η Αστυνομική Διάταξη 3/1995, το άρθρο 12 παρ. 6 του Ν. 1481/1984, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, το άρθρο 417 επ. ΚΠΔ, το άρθρο 12 της Υ.Α. 3046/304/1989 "Κτιριοδομικός Κανονισμός".

2. Οι εξωδικαστικές / τεχνικές προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος μεταξύ ιδιωτών

Πολλές φορές είναι τέτοιο το πρόβλημα της ηχορρύπανσης που οι ίδιοι οι δέκτες της ηχορρύπανσης, αναζητούν προσφορές ηχομόνωσης, που συνίστανται σε παρέμβαση στον χώρο του πομπού της ηχορρύπανσης, τις οποίες εμφανίζουν στους τελευταίους ως πρόταση εξωδικαστικής επίλυσης του προβλήματος που αντιμετωπίζουν. Προς τούτο υπογράφουν ιδιωτικά συμφωνητικά μεταξύ τους, ενώ οι δέκτες συχνά προσφέρονται να συμμετάσχουν στο κόστος της ηχομονωτικής παρέμβασης στον χώρο του πομπού, είτε με τη μορφή δανείου είτε με τη μορφή δωρεάς, εν όλω ή εν μέρει. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου οι δέκτες της

ηχορρύπανσης, όταν δεν βρίσκουν κανένα κοινό σημείο επαφής και συνεννόησης με τον πομπό της ηχορρύπανσης, εξωθούνται σε λύσεις όπως οι ηχομονωτικές παρεμβάσεις στον δικό τους χώρο, ιδίως εξόδους, για να περιορίσουν στοιχειωδώς τα αποτελέσματα του προβλήματος, με την αιτία βέβαια να παραμένει απερίοριστη, κάτι που και από τεχνικής άποψης δεν κρίνεται το βέλτιστο / το αποτελεσματικότερο.

3. Η δικαστική επίλυση του προβλήματος μεταξύ ιδιωτών, η αντίστοιχη νομοθεσία ιδιωτικού δικαίου, η αποτελεσματικότερη νομική βάση της και ο βαθμός δικαστικής δικαίωσης

Όταν ο πομπός της ηχορρύπανσης δεν συνεργάζεται με τον δέκτη της για την επίλυση του προβλήματος ή δεν αναλαμβάνει αυτοβούλως δράση προς τον αυτοπεριορισμό του, τότε χωρεί δικαστικός εξαναγκασμός του, δηλαδή με προσωρινή διαταγή, ασφαλιστικά μέτρα, οριστική δικαστική απόφαση επί αγωγής.

Έτσι, υφίσταται το ασφαλιστικό μέτρο της προσωρινής ρύθμισης κατάστασης (άρθρο 692 παρ. 4 ΑΚ) και ακολούθως η τακτική αγωγή βάσει του δικαιώματος στην προσωπικότητα (άρθρο 57ΑΚ) ή των περιορισμών της κυριότητας (άρθρα 1003ΑΚ [και 3 του ν. 3741/1929 αν πρόκειται για οροφокτησία]) και της αγωγής διατάραξης της νομής (άρθρο 989ΑΚ) ή των περιορισμών της κυριότητας (άρθρο 1003ΑΚ) και της αγωγής διατάραξης της κυριότητας (άρθρο 1108ΑΚ), συν της αδικοπραξίας (άρθρων 914ΑΚ) και της ικανοποίησης της ηθικής βλάβης (άρθρο 59ΑΚ). Εκ της νομοθεσίας ιδιωτικού δικαίου κρίνεται αποτελεσματικότερη ως νομική βάση αυτή του άρθρου 57ΑΚ περί του δικαιώματος της προσωπικότητας, για τους εξής λόγους:

1. Δεν υπόκειται στους περιορισμούς του άρθρου 1003 ΑΚ περί της υπό προϋποθέσεις υποχρέωσης ανοχής θορύβου, όπως υπόκεινται τα άρθρα 1108 ΑΚ και 989ΑΚ περί του δικαιώματος της κυριότητας και της νομής [1, 2, 3].

2. Η προσβολή του δικαιώματος της προσωπικότητας προϋποθέτει «παράνομία» η οποία έγκειται όχι μόνο στην παράβαση ρητής διάταξης νόμου [4], όπως είναι οι εκάστοτε ανωτέρω διατάξεις δημοσίου δικαίου, αλλά και σε οποιαδήποτε κοινωνικά απρόσφορη επέμβαση στη σφαίρα του συγκεκριμένου κάθε φορά αγαθού, η οποία λαμβάνει χώρα χωρίς προς τούτο δικαίωμα ή με την άσκηση μεν δικαιώματος, που όμως είτε είναι μικρότερης σπουδαιότητας από το προσβαλλόμενο είτε ασκείται υπό περιστάσεις που καθιστούν την άσκησή του καταχρηστική κατ' άρθρο 281 ΑΚ και 25 παρ. 3 του Σ [5, 6, 7]. Δηλαδή δεν απαιτείται να είναι η προσβάλλουσα το αγαθό συμπεριφορά απαγορευμένη από ειδική διάταξη νόμου αλλά αρκεί το ότι είναι βλαπτική και κοινωνικά απρόσφορη και μόνο.

3. Συναφώς, για την απόδειξη της «παράνομιας», δεν απαιτείται ο ακριβής καθορισμός της έντασης του θορύβου σε αντικειμενικά μεγέθη, ήτοι σε μονάδες μέτρησης του ήχου, δοθέντος ότι και ο συνήθης ακόμα θόρυβος μπορεί να θεμελιώσει παράνομη προσβολή προσωπικότητας λόγω της σαφούς διάκρισης ανάμεσα στις διατάξεις των άρθρων 57 ΑΚ και 1003 ΑΚ [2].

4. Για τη στοιχειοθέτηση του κατεπείγοντος, στο πλαίσιο αίτησης ασφαλιστικών μέτρων και αιτήματος χορήγησης προσωρινής διαταγής, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό θεωρείται ότι υφίσταται διαρκώς στην περίπτωση σοβαρής προσβολής της υγείας του αιτούντος και γενικότερα στην παρεμπόδιση της χρήσης των

δικαιωμάτων που συνθέτουν την προσωπικότητα του αιτούντος [8, 9]. Άλλωστε, ο απόλυτος χαρακτήρας του δικαιώματος της προσωπικότητας παρέχει διαρκή αξίωση προς τους τρίτους να το σέβονται και να μην το προσβάλλουν.

Ως προς τον βαθμό δικαστικής δικαίωσης, παρατηρείται γενικώς ποικιλία δικαστικών αποφάσεων οι οποίες όλο και πληθαίνουν. Αν μπορεί να συναχθεί ένας «κανόνας» περί της δικαστικής αντιμετώπισης της ηχορρύπανσης, έναντι των εξαιρέσεων που πάντα θα υπάρχουν, αυτός είναι ο εξής:

Σε επίπεδο προσωρινών διαταγών, παρατηρείται ότι οι δικαστές είναι φειδωλοί στην χορήγησή τους, και όταν τις χορηγούν, αυτές είναι συνήθως «συγκρατημένες» κατά περιεχόμενο, δηλαδή περιορίζονται στο να διατάσσουν με αυτές την τήρηση των δημοσίου δικαίου διατάξεων περί των ωρών κοινής ησυχίας, και των ανώτατων ορίων ηχοστάθμης.

Σε επίπεδο ασφαλιστικών μέτρων, παρατηρείται ότι οι δικαστές είναι πιο απλόχεροι στο να διατάσσουν, πέρα από την τήρηση των δημοσίου δικαίου διατάξεων περί των ωρών κοινής ησυχίας και των ανώτατων ορίων ηχοστάθμης, και τη λήψη μέτρων ηχομόνωσης.

Σε επίπεδο αγωγών, παρατηρείται ότι οι δικαστές κάνουν γενικώς δεκτά τα αιτήματα της τήρησης των δημοσίου δικαίου διατάξεων περί των ωρών κοινής ησυχίας και των ανώτατων ορίων ηχοστάθμης, καθώς και της λήψης μέτρων ηχομόνωσης, και, στην περίπτωση παραβίασης τούτων των διατασσομένων, της απειλής χρηματικής ποινής και προσωπικής κράτησης. Ενώ παρατηρείται ότι, κατά περίπτωση, επιδικάζουν και αποζημίωση λόγω αδικοπραξίας ή ηθικής βλάβης η οποία όμως δεν έχει μεγάλο ύψος.

4. Η επαφή με τις δημόσιες αρχές Αστυνομίας και Περιφέρειας

Παρατηρείται γενικώς ότι η Αστυνομία παρεμβαίνει πιο αποτελεσματικά στις περιπτώσεις διαπίστωσης της παράβασης διατάξεων δημοσίας τάξεως (όπως η Αστυνομική Διάταξη 3/1995) παρά στις περιπτώσεις διαπίστωσης της παράβασης διατάξεων δημοσίας υγείας (όπως η Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985), αν και η αρμοδιότητά της κατά νόμον εκτείνεται και στα δύο. Πχ. Πολλές φορές η Αστυνομία δεν διαθέτει ηχόμετρο, ή, αν διαθέτει, δεν ξέρει πώς να το χρησιμοποιήσει / χειριστεί, ούτε ξέρει πώς να εφαρμόσει σωστά τις προϋποθέσεις ελέγχου με αυτό, όπως τάσσονται ειδικότερα από την Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985 (λχ σε ποιο σημείο να σταθεί να διενεργήσει την ηχομέτρηση, ποιο είναι κάθε φορά το ανώτατο επιτρεπτό όριο ηχοστάθμης ανάλογα με το σημείο διενέργειας του ελέγχου). Οι λίγες -και ποιοτικά μη ικανοποιητικές- περιπτώσεις που η Αστυνομία διενεργεί ηχομετρήσεις, είναι κυρίως περιπτώσεις διαπίστωσης ηχορρύπανσης προερχόμενης από καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, και όχι πχ από αθλητικές εγκαταστάσεις.

Η Περιφέρεια δε, ως η κατεξοχήν αρμόδια στις περιπτώσεις διαπίστωσης της παράβασης διατάξεων δημοσίας υγείας (όπως η Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985), παρατηρείται ότι διενεργεί ελέγχους σχεδόν πάντα εντός του ωραρίου της, και άρα σε χρόνο συχνά διαφορετικό από τον κρίσιμο / καταγγελλόμενο κατά τον οποίο εκδηλώνεται η ηχορρύπανση. Επίσης, η Περιφέρεια παρατηρείται ότι ενίοτε αναζητά διευκρινίσεις από το αρμόδιο Υπουργείο, ως προς τον τρόπο εφαρμογής των διατάξεων δημοσίας υγείας (όπως η

Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985), και τούτο κατόπιν καταγγελίας πολίτη, κάτι που οδηγεί στην έκδοση διευκρινιστικών εγκυκλίων.

5. Συμπέρασμα

Η δημοσίου δικαίου νομοθεσία για την προστασία από την ηχορρύπανση αναδεικνύεται αρκετά πλήρης για κάθε πηγή, ομοίως και η ιδιωτικού δικαίου νομοθεσία ανεξαρτήτως πηγής, ενώ η εφαρμογή και ερμηνεία της τελευταίας από τα δικαστήρια πολύ θετική, με τα προβλήματα να εστιάζονται τελικά κυρίως στην από πρακτικής άποψης παρέμβαση της Αστυνομίας και της Περιφέρειας, οι οποίες θα πρέπει να καταρτιστούν και εξοικειωθούν περισσότερο με τον ορθό τρόπο διενέργειας ελέγχων διαπίστωσης της ηχορρύπανσης, δηλαδή με τον ορθό τρόπο εφαρμογής των διατάξεων δημόσιας τάξης και κυρίως δημόσιας υγείας, αλλά και με την εντατικοποίηση αυτών με ποιοτικούς πάντα όρους. Επίσης, θα πρέπει να αξιολογηθεί ως σύγχρονη αναγκαιότητα και επιταγή η προστασία των πολιτών από την ηχορρύπανση. Αυτό προϋποθέτει ευαισθητοποίηση της Πολιτείας προς την κατεύθυνση αυτή, η οποία σίγουρα υποβοηθείται από την ενεργό δράση των πολιτών, τις κρούσεις / καταγγελίες τους προς Αστυνομία και Περιφέρεια, και την άσκηση των ιδιωτικών δικαιωμάτων τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει ήδη μία σχετική κινητικότητα της Πολιτείας. Ενδεικτικά αναφέρεται η πρόσφατη Εγκύκλιος της Εισαγγελίας του Αρείου Πάγου (ΕγκΕισΑΠ 14/2023) [10] περί του θέματος ενεργοποίησης των κατά τόπους Εισαγγελέων, με σχετικές παραγγελίες τους καθώς και των προανακριτικών υπαλλήλων, αστυνομικών και υγειονομικών, για την βεβαίωση των ανάλογων παραβάσεων ηχορρύπανσης ανεξαρτήτως πηγής.

6. Αναφορές

- [1] Νομικό περιοδικό «Νομικό Βήμα» (NoB), απόφαση 718/2001 Αρείου Πάγου, σελ. 1097 (2002)
- [2] Ισοκράτης, Τράπεζα Νομικών Πληροφοριών (ΤΝΠ), Δικηγορικός Σύλλογος Αθηνών (ΔΣΑ) - αναζήτηση νομολογίας - απόφαση 479/2013 Εφετείου Λάρισας
- [3] QUALEX, Τράπεζα Νομικών Πληροφοριών (ΤΝΠ), απόφαση 11/2020 Τριμελούς Εφετείου Κέρκυρας
- [4] Νομικό περιοδικό «Ελληνική Δικαιοσύνη» (ΕλλΔνη), απόφαση 718/2001 Αρείου Πάγου, τόμος 42, σελ. 942 (2002)
- [5] Νομικό περιοδικό «Ελληνική Δικαιοσύνη» (ΕλλΔνη), απόφαση 1688/1998 Εφετείου Αθηνών, τόμος 39, σελ. 667 (1999)
- [6] Νομικό περιοδικό «Ελληνική Δικαιοσύνη» (ΕλλΔνη), απόφαση 12154/1990 Εφετείου Αθηνών, τόμος 32, σελ. 1673 (1991)
- [7] Καράκωστας Ι., *Περιβάλλον και Δίκαιο*, Εκδόσεις Α. Ν. Σάκκουλα, Αθήνα-Κομοτηνή, σελ. 177-178 (2000)
- [8] Νομικό περιοδικό «Περιοδικό Δίκη» (ΠερΔικ), απόφαση 3421/2000 Μονομελούς Πρωτοδικείου Πατρών, τόμος 88 (2001)
- [9] Νομικό περιοδικό Εφαρμογές Αστικού Δικαίου (ΕφΑΔ), απόφαση 5731/2011 Μονομελούς Πρωτοδικείου Θεσσαλονίκης, σελ. 328 (με παρατ. Παπασπυρόπουλου Α.) (2011)
- [10] Εγκύκλιος της Εισαγγελίας του Αρείου Πάγου (ΕγκΕισΑΠ) 14/2023



Διακρίβωση μικροφώνων αναφοράς με την μέθοδο της αντιστροφής και η εφαρμογή τους στην διακρίβωση μικροφώνων ελεύθερου πεδίου

Κωνσταντίνος Ζαχαρίας^{1,*}, Χρήστος Μπαντής¹

¹Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας - Εθνικό Σύστημα Υποδομών Ποιότητας,
ΒΙ.ΠΕ.Θ Σίνδου, 57022 Θεσσαλονίκη

*zacharias@eim.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος της αντιστροφής (reciprocity calibration) για την διακρίβωση εργαστηριακών μικροφώνων αναφοράς και η εφαρμογή τους για την διακρίβωση μικροφώνων εργασίας ελεύθερου πεδίου. Πραγματοποιήθηκε διακρίβωση τριών μικροφώνων αναφοράς με την μέθοδο της αντιστροφής και προσδιορίστηκε η ευαισθησία τους σε ηχητικό πεδίο πίεσης. Στην συνέχεια ένα από τα μικρόφωνα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε για την διακρίβωση ενός μικροφώνου εργασίας (working standard) ελεύθερου πεδίου, σύμφωνα με την μέθοδο της διαδοχικής σύγκρισης σε ανηχικό θάλαμο. Τέλος μελετήθηκε η χρήση προσομοιωτή στόματος (mouth simulator) ως πρότυπη ηχητική πηγή, καθώς επίσης οι ιδιαιτερότητες της μεθόδου αντιστροφής και οι παράγοντες των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην διακρίβωση μικροφώνων ελεύθερου πεδίου σε ανηχικό θάλαμο.

Reciprocity calibration method for standard microphones and their application in the calibration of free-field microphones

ABSTRACT

In this paper, the reciprocity calibration method for the calibration of reference laboratory microphones and its application for the calibration of free-field working microphones are briefly presented. The sensitivity of three reference microphones to a sound pressure field was determined using the reciprocity method. Subsequently, one of the reference microphones was employed to calibrate a free-field working standard microphone in accordance with the method of successive comparison within an anechoic chamber. Finally, the utilisation of a mouth simulator as a standard sound source was investigated, in addition to the specific characteristics of the successive comparison method and the uncertainty factors associated with the calibration of free-field microphones within an anechoic chamber.

Εισαγωγή

Η ευαισθησία ενός μικροφώνου, δηλαδή η ηλεκτρική τάση που παράγει ένα μικρόφωνο ως προς την ηχητική πίεση, είναι η βασικότερη παράμετρος που προσδιορίζεται κατά την διαδικασία διακρίβωσής του. Η πιο κοινή μέθοδος διακρίβωσης είναι η σύγκριση του υπό διακρίβωση μικροφώνου με ένα εργαστηριακό μικρόφωνο αναφοράς. Τα μικρόφωνα αναφοράς με τη σειρά τους διακρίβωνονται εφαρμόζοντας την μέθοδο της αντιστροφής (pressure reciprocity calibration). Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή της αντιστροφής του τρόπου λειτουργίας του εργαστηριακού μικροφώνου, δηλαδή ότι μπορεί να λειτουργήσει ως δέκτης αλλά και ως πομπός ηχητικών κυμάτων έχοντας τον ίδιο λόγο απόκρισης προς διέγερση. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου που εφαρμόζεται είναι ότι δεν υπάρχει αναφορά σε κάποια ηχητική ποσότητα όπως η ευαισθησία του μικροφώνου (V/Pa) ή η ηχητική πίεση (Pa), αλλά μόνο σε θεμελιώδεις ηλεκτρικές, μηχανικές και φυσικές παραμέτρους όπως η DC τάση, η συχνότητα, το μήκος, η θερμοκρασία κα. Η προαναφερθείσα μέθοδος διακρίβωσης ονομάζεται απόλυτη ή πρωτεύουσα διακρίβωση και τα διακριβωμένα μικρόφωνα είναι πρωτεύοντα πρότυπα διότι έχουν τις υψηλότερες μετρολογικές ιδιότητες και η τιμή τους είναι αποδεκτή χωρίς να γίνεται αναφορά σε άλλα πρότυπα του ίδιου μεγέθους. Η προηγούμενη μέθοδος αφορά στον προσδιορισμό της ευαισθησίας ενός εργαστηριακού μικροφώνου το οποίο είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις όπου αναπτύσσεται ηχητικό πεδίο πίεσης, δηλαδή εντός κλειστών κοιλοτήτων. Όμως οι περισσότερες και πρακτικές εφαρμογές των εργαστηριακών μικροφώνων αφορούν την χρήση τους για την μέτρηση της ηχητικής πίεσης εκτός κλειστών κοιλοτήτων (cavities), σε συνθήκες ανοιχτών χώρων ή αλλιώς σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (free-field). Επομένως προκύπτει η ανάγκη του προσδιορισμού του συντελεστή ευαισθησίας των μικροφώνων ελεύθερου πεδίου ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση με ακρίβεια της ηχητικής πίεσης σε αυτές τις συνθήκες. Η μέθοδος διακρίβωσης των μικροφώνων σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου πραγματοποιείται σε ανηχικό θάλαμο και βασίζεται στην σύγκριση της απόκρισης του μικροφώνου ελεύθερου πεδίου με την απόκριση ενός μικρόφωνα αναφοράς. Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκριτικής διακρίβωσης έχει το πλεονέκτημα ότι προσομοιάζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιούνται τα μικρόφωνα ελεύθερου πεδίου. Είναι δευτερεύουσα διακρίβωση διότι η αναφορά είναι ένα πρωτεύον εργαστηριακό μικρόφωνο και το υπό διακρίβωση μικρόφωνο είναι ένα μικρόφωνο γενικής χρήσεως (working standard - μικρόφωνο εργασίας) για ακουστικές μετρήσεις.

1. Διακρίβωση μικροφώνων αναφοράς με την μέθοδο της αντιστροφής

Η μέθοδος διακρίβωσης μικροφώνων αναφοράς με την μέθοδο της αντιστροφής περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο IEC 61094-2 [1] σύμφωνα με το οποίο, για την διακρίβωση απαιτούνται τρία εργαστηριακά μικρόφωνα τα οποία συνδυάζονται ανά δύο (συνολικά τρεις συνδυασμοί) και συνδέονται ακουστικά μεταξύ τους μέσω του αέρα που περιέχεται εντός της κυλινδρικής κοιλότητας που σχηματίζεται από ένα συζεύκτη (coupler). Έτσι σε κάθε ζεύγος το μικρόφωνο που λειτουργεί ως ηχητική πηγή (πομπός) δημιουργεί εντός της κοιλότητας μία ηχητική πίεση η οποία μετράται

από το μικρόφωνο που λειτουργεί ως δέκτης. Εφαρμόζοντας τις βασικές εξισώσεις τεσσάρων ακροδεκτών οι οποίες ισχύουν για ένα εργαστηριακό μικρόφωνο αναφοράς, προκύπτει για κάθε ζεύγος μικροφώνων και ένα αντίστοιχο γινόμενο των συντελεστών ευαισθησίας τους για το ηχητικό πεδίο πίεσης. Επιλύοντας το σύστημα των τριών εξισώσεων για τα τρία ζεύγη, προκύπτουν οι ευαισθησίες πίεσης των τριών μικροφώνων.

Η παραπάνω μεθοδολογία διακρίβωσης εργαστηριακών μικροφώνων (τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές του προτύπου IEC 61094-1 [2]) υλοποιείται με το Reciprocity Calibration System Type 9699 της εταιρίας Brüel & Kjær [3]. Το ζεύγος των μικροφώνων μαζί με τον συζεύκτη τοποθετούνται στον ειδικό θάλαμο και στην συνέχεια η γεννήτρια σημάτων παράγει το ημιτονοειδές σήμα της επιθυμητής συχνότητας για την οποία θα προσδιοριστεί ο συντελεστής ευαισθησίας πίεσης των μικροφώνων. Έτσι το μικρόφωνο πομπός παράγει επίπεδα ηχητικά κύματα εντός του συζεύκτη τα οποία μετρώνται από το μικρόφωνο δέκτη. Η τάση εξόδου που εμφανίζεται στο μικρόφωνο δέκτη οδηγείται μέσω του ζωνοδιαβατού φίλτρου στο ψηφιακό βολτόμετρο. Η τάση εισόδου στο μικρόφωνο πομπός και η τάση εξόδου στο μικρόφωνο δέκτη μετρούνται διαδοχικά από το βολτόμετρο. Η παραπάνω διαδικασία μέτρησης εφαρμόζεται και στα τρία ζεύγη μικροφώνων και καταγράφονται οι τιμές των μετρήσεων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος επιπλέον ελέγχει τα όργανα μέτρησης του συστήματος 9699 μέσω ειδικού προγράμματος. Μετά το πέρας των μετρήσεων από τις τάσεις πομπού T και δέκτη R υπολογίζεται ο λόγος τάσεων T/R και για τα τρία ζεύγη των μικροφώνων και σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες λοιπές ηλεκτρικές, ακουστικές και φυσικές παραμέτρους υπολογίζονται οι ευαισθησίες πίεσης των μικροφώνων. Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην δημοσίευση των συγγραφέων στο συνέδριο Μετρολογίας 2022 [4] για περισσότερες πληροφορίες.

2. Διακρίβωση μικροφώνων ελεύθερου πεδίου (free-field)

2.1 Διακρίβωση μικροφώνων ελεύθερου πεδίου με την μέθοδο της διαδοχικής σύγκρισης

Όταν ένα μικρόφωνο πίεσης βρίσκεται σε ελεύθερο πεδίο, τα προσπίπτοντα ηχητικά κύματα στην μεμβράνη του προκαλούν σκέδαση ηχητικών κυμάτων με αποτέλεσμα την αύξηση της ηχητικής πίεσης σε υψηλές συχνότητες και επομένως της απόκρισης του μικροφώνου [5]. Έτσι έχουν κατασκευαστεί κατάλληλα τροποποιημένα μικρόφωνα πίεσης, αποκαλούμενα μικρόφωνα ελεύθερου πεδίου, ώστε να αντισταθμίζεται η αύξηση της απόκρισης με την αύξηση της συχνότητας του ηχητικού κύματος. Όλα τα παραπάνω κωδικοποιήθηκαν στο πρότυπο IEC 61094-8 [6] το οποίο περιγράφει την διαδικασία διακρίβωσης εργαστηριακών μικροφώνων ή μικροφώνων εργασίας για τον προσδιορισμό του συντελεστή ευαισθησίας τους σε ελεύθερο ηχητικό πεδίο. Η διακρίβωση των μικροφώνων με την μέθοδο της διαδοχικής σύγκρισης βασίζεται στην προϋπόθεση ότι το μικρόφωνο ελεύθερου πεδίου και το μικρόφωνο αναφοράς εκτίθενται διαδοχικά στο ίδιο ηχητικό πεδίο. Αρχικά το μικρόφωνο αναφοράς χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ηχητικής πίεσης στο ελεύθερο πεδίο και στη συνέχεια αντικαθίσταται από το υπό διακρίβωση μικρόφωνο ελεύθερου πεδίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται εντός ανηχικού

θαλάμου σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου και τα μικρόφωνα κατά την εναλλαγή τους τοποθετούνται στην ίδια θέση ώστε να είναι όμοιος ο επηρεασμός από την όποια χωρική ανομοιομορφία του ηχητικού πεδίου. Εφόσον ισχύουν οι προηγούμενες προϋποθέσεις, τότε η ευαισθησία του μικρόφωνου ελεύθερου πεδίου M_{FF} είναι το γινόμενο της ευαισθησίας του μικρόφωνου αναφοράς M_{REFp} και του λόγου VR_{FR} της τάσης εξόδου του μικροφώνου ελεύθερου πεδίου V_{FF} προς την τάση εξόδου του μικροφώνου αναφοράς V_{REF} :

$$M_{FF} = M_{REFp} \cdot VR_{FR} \quad (2.1)$$

$$VR_{FR} = \frac{V_{FF}}{V_{REF}} \quad (2.2)$$

Το μικρόφωνο αναφοράς είναι ένα πρωτεύον εργαστηριακό μικρόφωνο του οποίου η ευαισθησία έχει προσδιοριστεί με την μέθοδο της αντιστροφής για ηχητικό πεδίο πίεσης. Οπότε για να είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου της διαδοχικής σύγκρισης, είναι απαραίτητο να διορθωθεί η ευαισθησία M_{REFp} του μικροφώνου αναφοράς εξαιτίας της αύξησης της απόκρισής του με την αύξηση της συχνότητας του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος. Ορίζεται έτσι ένας συντελεστής διόρθωσης C ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την ευαισθησία M_{REFp} μας δίνει την ευαισθησία του μικροφώνου αναφοράς σε ελεύθερο πεδίο $M_{RFF} = C \cdot M_{REFp}$. Συνεπώς από τις εξισώσεις 2.1 και 2.2:

$$M_{FF} = C \cdot M_{REFp} \cdot \frac{V_{FF}}{V_{REF}} \quad (2.3)$$

Έχει καθιερωθεί για πρακτικούς λόγους και ευκολία αριθμητικών υπολογισμών, οι ευαισθησίες των μικροφώνων να είναι προσδιορισμένες σε dB re 1 V/Pa, οπότε η εξίσωση 2.3 τροποποιείται σε:

$$M_{FF} = C + M_{REFp} + V_{FF} - V_{REF} \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης C εξαρτάται από την συχνότητα του ηχητικού κύματος και την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι τιμές του δίνονται από την τεχνική οδηγία IEC TS 61094-7 [7] για μικρόφωνα τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές του προτύπου IEC 61094-1 [2], μέσω υπολογισμού από μία πολυωνμική συνάρτηση 8^{ου} βαθμού για μικρόφωνα LS1 (διάμετρος 1") και 9^{ου} βαθμού για μικρόφωνα LS2a (διάμετρος 1/2").

Η επιλογή του ηχείου που χρησιμοποιείται ως ηχητική πηγή έχει σημαντική επίδραση στον εύρος των συχνοτήτων μέτρησης και στην συνολική αβεβαιότητα μέτρησης του υπό διακρίβωση μικροφώνου. Ιδανικά το ηχείο θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να λειτουργεί σαν σημειακή πηγή και να διατηρεί τα πανκατευθυντικά χαρακτηριστικά του μέχρι την μέγιστη συχνότητα των μετρήσεων. Επιπλέον η ευαισθησία του ηχείου πρέπει να επαρκεί ώστε παράγει την απαιτούμενη ηχητική στάθμη στο σημείο μέτρησης και η στάθμη να παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Επίσης η απόκριση συχνότητας θα πρέπει να είναι σταθερή για το εύρος των συχνοτήτων της διακρίβωσης. Ηχείο το οποίο μπορεί να συνδυάζει

απόλυτα όλα τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά είναι πρακτικά αδύνατο να κατασκευαστεί. Ως εκ τούτου γίνονται συμβιβασμοί στην επιλογή του ηχείου δίνοντας έμφαση στην καλύτερη εκπλήρωση κάποιων από τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά. Ηχεία μικρών διαστάσεων είναι αρκετά αποδοτικά σε υψηλές συχνότητες και λειτουργούν ικανοποιητικά ως σημειακή πηγή αλλά η απόδοσή τους και η ηχητική τους στάθμη μειώνεται σημαντικά στις χαμηλές συχνότητες. Για παράδειγμα ένα ηχείο διαστάσεων 30 mm μπορεί να έχει ικανοποιητική απόκριση ακόμα και πάνω από τα 20 kHz αλλά είναι αναποτελεσματικό σε συχνότητες μικρότερες των 2 kHz. Ένα μεγαλύτερο ηχείο διαστάσεων 75 mm μπορεί να παράγει ικανοποιητική ηχητική στάθμη από τα 125 Hz αλλά είναι αναποτελεσματικό σε συχνότητες πάνω από τα 10 kHz [6]. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η καταλληλότητα ως πρότυπη ηχητική πηγή ενός προσομοιωτή στόματος (mouth simulator) B&K 4227 ο οποίος είναι κατασκευασμένος και προορίζεται για την προσομοίωση του ηχητικού πεδίου της ανθρώπινης φωνής. Συμφωνά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του B&K 4227, δείχνει να συνδυάζει το πλεονέκτημα των ηχείων μικρών διαστάσεων με άνοιγμα οπής (vent port) παραγωγής ηχητικού πεδίου 20 mm αλλά και απόκρισης συχνοτήτων από ~80 Hz μέχρι ~12500 Hz με μέγιστη στάθμη 110 dB SPL στα 25 mm απόσταση. Δηλαδή δείχνει να πληροί ταυτόχρονα την ικανότητα να λειτουργεί ως σημειακή πηγή με ικανοποιητική ηχητική στάθμη και σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, ενώ για την εκπλήρωση των προηγούμενων τεχνικών προδιαγραφών συνήθως απαιτείται η χρήση 2 ή και περισσότερων ηχητικών πηγών.

2.2 Μετρήσεις διακρίβωσης μικροφώνου εργασίας ελεύθερου πεδίου σε ανηχικό θάλαμο

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον ανηχικό θάλαμο του Εργαστηρίου Ακουστικής και Δονήσεων του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας / ΕΣΥΠ. Ο θάλαμος είναι κατασκευασμένος σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3745 και πληροί τις απαιτήσεις για μετρήσεις ακριβείας και διακριβώσεις σε ελεύθερο πεδίο και προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος και πίεσης. Οι εσωτερικές διαστάσεις του ανηχικού θαλάμου είναι 4.75 m X 4.75 m X 3.68 m και συχνότητα αποκοπής είναι 125 Hz. Η διάταξη για την διακρίβωση για τις μετρήσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Διάταξη διακρίβωσης μικροφώνων εργασίας ελεύθερου πεδίου σε ανηχικό θάλαμο. Αριστερά το μικρόφωνο αναφοράς/εργασίας τοποθετημένο σε ράβδο διαμέτρου 1/2" μήκους 50 cm στερεωμένη σε τρίποδο. Δεξιά η ηχητική πηγή (εξ. διάμετρος 88 mm, οπής 20 mm) B&K 4227 αναρτημένη σε συρματοσχοίνο.

Ως αναφορά χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο εργαστηριακό μικρόφωνο πίεσης Brüel & Kjær 4180 LS2aP (διάμετρος $\frac{1}{2}$ ") no 2208273 και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ευαισθησίας που είχαν υπολογιστεί προηγουμένως με την μέθοδο της αντιστροφής και το Reciprocity Calibration System Type 9699. Οι τιμές της ευαισθησίας πίεσης του μικροφώνου αναφοράς, διορθωθήκαν σύμφωνα με το πρότυπο IEC TS 61094-7 ώστε να προκύψουν οι τιμές ευαισθησίας ελεύθερου πεδίου για την αντίστοιχη συχνότητα του ηχητικού κύματος και θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το υπό διακρίβωση μικρόφωνο είναι ένα μικρόφωνο εργασίας ελεύθερου πεδίου Brüel & Kjær 4191 WS2F (διάμετρος $\frac{1}{2}$ ") no 2114055. Ως ηχητική πηγή χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής στόματος Brüel & Kjær 4227 και κατά την τοποθέτηση χρησιμοποιήθηκε αυτορρυθμιζόμενο γραμμικό αλφάδι LASER ώστε να τα ακουστικά κέντρα της ηχητικής πηγής και του μικροφώνου να είναι συνευθειάκα, σχήμα 2.1. Έγιναν μετρήσεις στις αποστάσεις 25 cm και 32 cm μεταξύ του προσομοιωτή στόματος και του μικροφώνου, ενώ η ελάχιστη απόσταση από τις ακμές των ηχοαπορροφητικών υλικών ήταν 160 cm. Ως ενισχυτής ισχύος χρησιμοποιήθηκε ένας στερεοφωνικός ολοκληρωμένος ενισχυτής H | H VX-450 MOS-FET 2 X 150 W RMS, ενώ ως ενισχυτής σήματος των μικροφώνων ο Brüel & Kjær 2673 οποίος ήταν κοινός για τα μικρόφωνα 4180 & 4191. Για την παραγωγή των ημιτονοειδών σημάτων διέγερσης της ηχητικής πηγής 4227 αλλά και για την μέτρηση των τάσεων εξόδου του ενισχυτή σήματος 2673 των μικροφώνων χρησιμοποιήθηκε η κάρτα ήχου Creative Labs E-MU 1616m με δειγματοληψία 44.1 kHz και ανάλυση 16 bit. Το μικρόφωνο ελεύθερου πεδίου διακριβώθηκε από 100 Hz μέχρι 16000 Hz στις τυποποιημένες κατά ISO 266 συχνότητες (10^n Hz, $n=2.1, 2.2, \dots$). Αρχικά πριν την εκκίνηση των μετρήσεων η ηχητική πηγή τροφοδοτήθηκε με σταθερή ισχύ και λειτουργούσε για τουλάχιστον 30 λεπτά ώστε να επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία του μεγαφώνου και να σταθεροποιηθεί η παραγομένη ηχητική πίεση. Η διαδικασία ξεκινάει με την τοποθέτηση του μικροφώνου αναφοράς 4180 σε απόσταση 32 cm από την ηχητική πηγή. Οι μετρήσεις ξεκινούν από τη χαμηλότερη συχνότητα των 100 Hz και η κάρτα ήχου παράγει το ημιτονοειδές σήμα των 100 Hz με πλάτος 1 V RMS το οποίο οδηγείται στην είσοδο του ενισχυτή ισχύος. Η έξοδος του ενισχυτή είναι συνδεδεμένη στον προσομοιωτή στόματος 4227 ο οποίος παράγει το ηχητικό κύμα. Το κέρδος του ενισχυτή ρυθμίστηκε κατάλληλα ώστε η ισχύς εξόδου να είναι 0.6 W προκαλώντας 75 dB SPL στην θέση του μικροφώνου και λόγο σήματος προς θόρυβο καλύτερο από $SNR > 40$ dB. Τα 0.6 W από τον ενισχυτή είναι πολύ χαμηλότερα από την μέγιστη ισχύ λειτουργίας των 10 W στα 4 Ω αντίστασης μεγαφώνου του 4227, εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλή αρμονική παραμόρφωσή $THD < 2\%$ και αποφυγή υπερθέρμανσης. Η μετρούμενη ηχητική στάθμη μετατρέπεται σε τάση από το μικρόφωνο, ενισχύεται από τον ενισχυτή σήματος 2673 και τάση εξόδου του μετράται από την είσοδο της κάρτας ήχου. Εφαρμόζοντας των γρήγορο μετασχηματισμό Fourier FFT υπολογίζεται το πλάτος του μετρούμενου σήματος σε dBV για το μικρόφωνο αναφοράς. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στις υπόλοιπες συχνότητες μέχρι την μέγιστη συχνότητα των 16000 Hz οπότε και ολοκληρώνεται η πρώτη ομάδα μετρήσεων των τάσεων αναφοράς $V_{REF1}(f)$. Στην συνέχεια αντικαθίσταται στην ίδια θέση το μικρόφωνο αναφοράς με το υπό διακρίβωση μικρόφωνο εργασίας ελεύθερου πεδίου 4191 και επαναλαμβάνεται η διαδικασία των μετρήσεων διατηρώντας τις ίδιες συνθήκες μέτρησης. Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων έχει ληφθεί η πρώτη ομάδα μετρήσεων $V_{FF1}(f)$ για το μικρόφωνο ελεύθερου πεδίου. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 3 ομάδες μετρήσεων για το μικρόφωνο αναφοράς και 2 για το

υπό διακρίβωση με την διαδοχική σειρά REF1, FF1, REF2, FF2, REF3. Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά της μετρούμενης τάσης του μικροφώνου ελεύθερου πεδίου από το αναφοράς ανά διαδοχική ομάδα μέτρησης στην κάθε συχνότητα, δηλαδή, $V_{FF1}(f)-V_{REF1}(f)$, $V_{FF1}(f)-V_{REF2}(f)$, $V_{FF2}(f)-V_{REF2}(f)$, $V_{FF2}(f)-V_{REF3}(f)$ και μετέπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή των διαφορών $V_{FF}(f)-V_{REF}(f)$ από όλες τις ομάδες για την κάθε συχνότητα μέτρησης f . Η μέση τιμή των διαφορών για τα μικρόφωνα είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην εξίσωση 2.4 για το υπολογισμό της ευαισθησίας του μικροφώνου ελεύθερου πεδίου. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων του μικροφώνου ελεύθερου πεδίου και αναφοράς είναι ενδεικτική της σταθερότητας της παραγόμενης ηχητική στάθμης από την πηγή και η τιμή της εισάγεται στο ισοζύγιο υπολογισμού της συνολικής αβεβαιότητας της διακρίβωσης. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται σε ενδεικτικές συχνότητες τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το μικρόφωνο αναφοράς και ελεύθερου πεδίου.

Πίνακας 2.1 Αποτελέσματα διακρίβωσης μικρόφωνου εργασίας ελεύθερου πεδίου σε αηχωτικό θάλαμο με την μέθοδο της διαδοχικής σύγκρισης.

Συχνότητα [Hz]	MRp [dBV/Pa]	C [dB]	MRff [dBV/Pa]	$\Delta V(f)$ [dB]	MFF [dBV/Pa]	FR [dB]
126	-38.04	0.00	-38.04	-0.44	-38.48	-0.02
251	-38.05	0.00	-38.05	-0.41	-38.46	0.00
501	-38.05	0.01	-38.04	-0.41	-38.45	0.01
1000	-38.05	0.06	-37.99	-0.48	-38.47	-0.01
1995	-38.02	0.27	-37.75	-0.73	-38.48	-0.02
3981	-37.90	1.05	-36.85	-1.69	-38.54	-0.08
7943	-37.45	3.70	-33.75	-4.61	-38.36	0.10
15849	-37.18	8.64	-28.54	-9.10	-37.64	0.82

Όπου MRp η ευαισθησία του μικρόφωνου αναφοράς για πεδίο πίεσης, C ο συντελεστής διόρθωσης από πεδίο πίεσης σε ελεύθερο, $MRff$ η ευαισθησία του μικρόφωνου αναφοράς σε ελεύθερο πεδίο, $\Delta V(f)$ η μέση τιμή της διαφοράς $V_{FF}(f)-V_{REF}(f)$, MFF η ευαισθησία του μικρόφωνου εργασίας ελεύθερου πεδίου και FR η απόκριση συχνότητας του μικροφώνου με αναφορά την ευαισθησία στα 251 Hz. Η αβεβαιότητα της διακρίβωσης για διάστημα εμπιστοσύνης 95% είναι 0.15 dB για 100 Hz – 5 kHz, 0.20 dB για 6 kHz – 8 kHz, 0.30 dB για 9 kHz – 12 kHz και 0.40 dB για 13 kHz – 16 kHz. Οι σημαντικότερες συνεισφορές στο ισοζύγιο αβεβαιοτήτων προέρχονται από την ευαισθησία του μικρόφωνου αναφοράς και την ανομοιογένεια του ηχητικού πεδίου και απόκλιση από τις συνθήκες ελεύθερου πεδίου στις υψηλές συχνότητες. Σε όλες τις συχνότητες μέτρησης η τυπική απόκλιση της διαφοράς $\Delta V(f)$ ήταν μικρότερη ή ίση από 0.01 dB πολύ μικρότερη από τις αβεβαιότητες της μέτρησης, το οποίο δείχνει ότι παραγόμενη στάθμη από την ηχητική πηγή και γενικά οι συνθήκες μέτρησης ήταν σταθερές και επηρεάζουν ελάχιστα το τελικό αποτέλεσμα. Για την εκτίμηση του επηρεασμού της ανομοιογένειας του ηχητικού πεδίου, οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν σε απόσταση 25 cm και υπολογίστηκε η ευαισθησία του μικρόφωνου ελεύθερου πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόκλιση των ευαισθησιών του μικρόφωνου ελεύθερου πεδίου για τις δύο αποστάσεις ήταν μέχρι 0.01 dB για 100 Hz – 5 kHz, μέχρι 0.03 dB για 6.3 kHz – 8

kHz και μέχρι 0.04 dB για 10 kHz – 16 kHz. Τα αποτελέσματα των αποκλίσεων των ευαισθησιών είναι σημαντικά μικρότερα από τις αβεβαιότητες της διακρίβωσης και δείχνουν αμελητέο επηρεασμό της ευαισθησίας από την χωρική ανομοιομορφία του ηχητικού πεδίου. Οπότε σύμφωνα με τα παραπάνω ο προσομοιωτής στόματος παράγει σταθερή ηχητική στάθμη και ηχητικό πεδίο σύμφωνα με τις προϋποθέσεις για μετρήσεις σε ελεύθερο πεδίο και επομένως είναι κατάλληλος για διακριβώσεις μικροφώνων εργασίας ελεύθερου πεδίου σε ανηχικό θάλαμο.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα δημοσίευση παρουσιάστηκε συνοπτικά η εφαρμογή της μεθόδου της αντιστροφής (pressure reciprocity calibration) για την διακρίβωση 3 εργαστηριακών μικροφώνων αναφοράς τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές του προτύπου IEC 61094-1 και του υπολογισμού της ευαισθησίας πίεσης τους. Η μεθοδολογία διακρίβωσης είναι σύμφωνη με το πρότυπο IEC 61094-2 και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρέχει την υψηλότερη ακρίβεια και επαναληψιμότητα μετρήσεων συνδυασμένη με την μικρότερη αβεβαιότητα στον υπολογισμό της ευαισθησίας πίεσης. Στην συνέχεια εφαρμόζοντας την μέθοδο της διαδοχικής σύγκρισης σε ανηχικό θάλαμο, ένα από τα μικρόφωνα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε για την διακρίβωση ενός μικροφώνου εργασίας ελεύθερου πεδίου έχοντας ως ηχητική πηγή ένα προσομοιωτή στόματος (mouth simulator). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η προσομοιωτής στόματος πληροί της προδιαγραφές του IEC 61094-8 και είναι κατάλληλος για χρήση ως ηχητική πηγή διακρίβωσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έχουν υψηλή επαναληψιμότητα και η αβεβαιότητα του συντελεστή ευαισθησίας είναι αρκετά χαμηλή ώστε το διακριβόμενο μικρόφωνο να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

4. Αναφορές

- [1] IEC 61094-2:1992 *Electroacoustics - Measurement microphones - Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique* International Electrotechnical Commission (1992).
- [2] IEC 61094-1:1992 *Measurement microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones* International Electrotechnical Commission (1992).
- [3] Brüel & Kjær *Reciprocity Calibration System 9699 Technical Documentation* Brüel & Kjær (1998).
- [4] Κωνσταντίνος Ζαχαρίας, Χρήστος Μπαντής «Διακρίβωση εργαστηριακών μικροφώνων αναφοράς με την μέθοδο της αναστροφής (pressure reciprocity calibration)» στο 8ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας (2022).
- [5] Tamil Chandran A., Surendran P. «Selection and Calibration of Acoustic Sensors» *IJERT Vol. 5*, Issue 6, Σελίδες 396-403 (2016).
- [6] IEC 61094-8:1998 *Measurement microphones - Part 8: Methods for free-field calibration of working standard microphones by comparison* International Electrotechnical Commission (1998).
- [7] IEC TS 61094-7:2006 *Measurement microphones - Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones* International Electrotechnical Commission (2006).



Ηχητικός Σχεδιασμός Ακουστικού Χάρτη σε Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Ηλίας Σταμπουλής¹, Καλλιόπη Χουρμουζιάδου²

¹ Ηλεκτρονικός Μηχανικός, MSc Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού ΕΑΠ

² Αρχιτέκτων Μηχ., MArch, PhD, Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου
Σχεδιασμού ΕΑΠ, Σχολή Επιστημών Σχεδιασμού ΔΠΙΑΕ, Σέρρες
stab.ilias@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευρεία διάδοση των ψηφιακών τεχνολογιών έχει επηρεάσει την αλληλεπίδραση μας με τους χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα τελευταία χρόνια, χώροι όπως μουσεία και μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς έχουν εντάξει διαδραστικές εφαρμογές στην πρακτική τους, με σκοπό να εμπλουτίσουν την εμπειρία που προσφέρουν. Εντός του πλαισίου διερεύνησης των τεχνολογικών δυνατοτήτων στη μετάδοση πολιτιστικού περιεχομένου, στην παρούσα εργασία παρέχεται αναδρομή στο πεδίο αυτό, καθώς και ανάπτυξη νέας εφαρμογής για κινητές συσκευές για την οποία έχει δημιουργηθεί πρωτότυπο υλικό που αφορά στον χώρο του Γαλεριανού Συγκροτήματος στη Θεσσαλονίκη. Η εφαρμογή αξιοποιεί τις δυνατότητες του ήχου δι' εντοπισμού (locative audio) για την αναπαραγωγή του ηχητικού περιεχομένου στην τοποθεσία των μνημείων. Η περιήγηση έχει τη μορφή ηχητικού περιπάτου (audio walk), στη διαδρομή του οποίου τα σχεδιασμένα αμφιωτικά (binaural) αρχεία ήχου αναπαράγονται μέσω ακουστικών όταν ο χρήστης βρίσκεται στα σημεία ενδιαφέροντος. Χρησιμοποιώντας τεχνικές τρισδιάστατου ήχου (spatial audio), η εφαρμογή αποσκοπεί στην εμβύθιση (immersion) του χρήστη στην εμπειρία της ηχο-διαδρομής, προσφέροντας νέες δυνατότητες στην περιήγηση και στην κατανόηση των χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Sound Map Design in Cultural Heritage Sites

ABSTRACT

The widespread use of digital technologies has affected our interaction with cultural heritage sites. In recent years, museums and cultural heritage sites have integrated interactive applications into their practice, in order to enhance the provided experience. Within the context of exploring the technological possibilities in the communication of cultural content, this paper provides a review of this field, as well as the development of a mobile application that has incorporated original material about the site of the Galerian Complex in Thessaloniki. The application utilizes locative audio practices for audio reproduction at the location of the monuments. The tour takes the form of an audio walk, where designed binaural audio files are played back through the user's headphones at the points of interest. By using spatial audio techniques, the application aims to create an immersive experience, offering new possibilities in visiting and understanding cultural heritage sites.

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της αξιοποίησης διαδραστικών εφαρμογών στους χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς και των τεχνολογικών δυνατοτήτων στη μετάδοση πολιτιστικού περιεχομένου. Εδώ και αρκετά χρόνια, οι διαδραστικές εφαρμογές έχουν ενταχθεί στην πρακτική μουσείων και μνημείων, με σκοπό να εμπλουτίσουν την εμπειρία. Ταυτόχρονα, η πρόοδος των τεχνολογιών των κινητών συσκευών, των δικτύων και του εντοπισμού της θέσης έχουν πολλαπλασιάσει τις δυνατότητες συνδυασμού ήχων και τόπων.

Στόχο της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός ενός ηχητικού χάρτη χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς, με τη μορφή εφαρμογής για κινητές συσκευές με λειτουργικό σύστημα Android για την πραγματοποίηση ηχητικού περιπάτου με δυνατότητα περιήγησης στους χώρους των μνημείων και παρουσίαση της ιστορίας τους μέσω της ακρόασης. Η εφαρμογή λαμβάνει υπόψη τη θέση του χρήστη και ενεργοποιεί την αναπαραγωγή των αντίστοιχων ηχητικών αρχείων, τα οποία περιέχουν την αφήγηση, με βασικές πληροφορίες για τα μνημεία, τη χρήση τους και το ιστορικό πλαίσιο. Παράλληλα με την αφήγηση, γίνεται η αναπαραγωγή σχετικών ηχοτοπίων, στα οποία επιχειρείται αναπαράσταση του ηχητικού περιβάλλοντος στο παρελθόν. Η πορεία του ηχητικού περιπάτου διαμορφώνεται από τον επισκέπτη, χωρίς συγκεκριμένη αφετηρία και τέλος. Η περιήγηση επικεντρώνεται στο Γαλεριανό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, χτισμένο τον 3^ο αιώνα μ.Χ.

1. Ηχο-διαδρομές και Ψηφιακά Μέσα στους Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς

1.1 Ηχο-διαδρομές

Ο όρος *soundwalk* εισήχθη από τον Καναδό συνθέτη R. Murray Schafer, ο οποίος διέκρινε δύο τύπους: τον περίπατο ακρόασης (*listening walk*) -που απαιτεί την ενεργό παρουσία του συμμετέχοντα, ο οποίος ακολουθεί έναν αρχηγό- και τον ηχο-περίπατο (*soundwalk*) -μια εξερεύνηση του ηχοτοπίου συγκεκριμένης περιοχής χρησιμοποιώντας μια παρτιτούρα ως οδηγό, η οποία μπορεί επίσης να περιέχει ασκήσεις εξάσκησης του αυτιού [1]. Προκειμένου να διευρυνθεί η εμπειρία ακρόασης, οι ακροατές ενθαρρύνονται «να εξερευνήσουν ήχους που σχετίζονται με το περιβάλλον και, από την άλλη πλευρά, να συνειδητοποιήσουν τους δικούς τους ήχους (φωνή, βήματα κ.λπ.) εντός του περιβαλλοντικού πλαισίου» [2].

Επεκτείνοντας την ιδέα της ακρόασης του ηχοτοπίου ως αισθητηριακή εμπειρία, η Andra McCartney [3] περιγράφει τον ηχητικό περίπατο ως «μια δημιουργική και ερευνητική πρακτική που περιλαμβάνει την ακρόαση και μερικές φορές την ηχογράφιση ενώ κινούμαστε σε έναν τόπο με ρυθμό περπατήματος». Αυτή η πρακτική προσθέτει το στοιχείο της χρήσης τεχνολογιών ηχογράφησης για να επιτρέψει στους συμμετέχοντες να αποτυπώσουν την εμπειρία τους. Τα τελευταία χρόνια, έχει εισαχθεί η έννοια του ακουστικού περιπάτου (*audio walk*), ο οποίος αποτελείται από μια σειρά αρχείων ήχου σχεδιασμένων για ακρόαση μέσω ακουστικών σε διάφορα σημεία ή τμήματα κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής [4]. Σε αυτά, η αφήγηση και ο τόπος συνυφαίνονται για να δημιουργήσουν ένα συνδεδεμένο με την τοποθεσία ακουστικό περιβάλλον που χρησιμοποιεί τη φυσική δομή της πόλης [5].

Ο όρος «ηχητικοί χάρτες» συνήθως αναφέρεται σε διαδικτυακούς χάρτες, οι οποίοι περιέχουν σημεία που υποδεικνύουν διαθέσιμες ηχογραφήσεις με γεωγραφική ετικέτα. Αποτελούνται από έναν χάρτη (Google Map ή OpenStreetMap) και συνδεδεμένα με την τοποθεσία ηχοτοπία, μέσω ηχογράφων πεδίου (field recordists), καλλιτεχνών και κοινού [5]. Σύμφωνα με τη Waldock [6], μπορεί να είναι μια μόνιμη ερευνητική πηγή, το ακουστικό αρχείο ενός περιβάλλοντος, ένα ιστορικό αρχείο και μια υποκειμενική αναπαράσταση της πόλης.

Η ηχητική χαρτογράφηση περιλαμβάνει συχνά τη χρήση κινητής τεχνολογίας -από ειδικές συσκευές εγγραφής ήχου υψηλής πιστότητας μέχρι κινητά τηλέφωνα- για την πραγματοποίηση ηχογραφήσεων πεδίου, διαθέσιμων για διαδικτυακή ακρόαση [7]. Αντίθετα, ο όρος «ήχος δι' εντοπισμού» (locative sound) αναφέρεται σε πρακτικές στις οποίες ο ήχος αναπαράγεται μόνο σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Όπως περιγράφεται από τον Thulin [7], «η ηχητική χαρτογράφηση προσλαμβάνει την πραγματική, επί τόπου εμπειρία και δημιουργεί μια αναπαράσταση», ενώ ο ήχος δι' εντοπισμού «χρησιμοποιεί κώδικα και υποδομές εντοπισμού της τοποθεσίας για να δημιουργήσει επιτόπου εμπειρίες».

1.2 Αξιοποίηση των Ψηφιακών Μέσων στους Χώρους Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Η σχέση και η αλληλεπίδρασή μας με τους χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς, όπως συμβαίνει και γενικότερα με το περιβάλλον μας, έχει επηρεαστεί από την ευρεία διάδοση και την εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών, όπως των χωρο-ευαίσθητων εφαρμογών, οι οποίες αξιοποιούν τη δυνατότητα των κινητών συσκευών να αναγνωρίζουν τη θέση του χρήστη στο χώρο, με ή χωρίς την χρήση κάμερας για την ανάγνωση ψηφιακής πληροφορίας (QR codes) [8].

Η τάση στις ψηφιακές τεχνολογίες σήμερα είναι να παρέχονται εργαλεία και εφαρμογές που ενδυναμώνουν τους τελικούς χρήστες -άτομα χωρίς τεχνολογικές γνώσεις- μέσω σχεδιασμού, τροποποίησης επέκτασης, εξέλιξης εφαρμογών [9], καθιστώντας το όριο ανάμεσα στον σχεδιαστή και τον τελικό χρήστη δυσδιάκριτο [8]. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν οι πλατφόρμες ARIS και Echoes. Η δεύτερη περιλαμβάνει εφαρμογές όπως η Echoes Explorer για τη δημιουργία και την αναπαραγωγή ακουστικών περιπάτων, σχεδιασμένων από δημιουργούς και καλλιτέχνες από όλο τον κόσμο. Η συλλογή Unseen Soundwalks περιλαμβάνει εμπυθιστικές ηχο-διαδρομές που επαναπροσδιορίζουν μέρη που έχουν χαθεί στο χάρτη της πόλης της Βαρσοβίας, στην Πολωνία. Το Ellen Reid SOUNDWALK συνδυάζει τη μουσική σύνθεση, τον ηχητικό σχεδιασμό, τον τρισδιάστατο ήχο (spatial audio) και τον εντοπισμό μέσω GPS, για τη δημιουργία ενός «δημόσιου έργου τέχνης που χρησιμοποιεί μουσική για να φωτίσει το φυσικό περιβάλλον» στο «ΙΣΝ Νόστος: Πάρκο Σταύρος Νιάρχος». Άλλο παράδειγμα είναι το Soundwalks, το οποίο αποσκοπεί στη βελτίωση της ταξιδιωτικής εμπειρίας με τρισδιάστατα ηχητικά εφέ και ιδιαίτερη αφήγηση, διαθέσιμο σε 20 προορισμούς παγκοσμίως με μία ποικιλία θεμάτων, ώστε οι χρήστες να ανακαλύπτουν τις πόλεις με το δικό τους ρυθμό.

2. Ακουστικός περίπατος στο Γαλεριανό συγκρότημα

Το Γαλεριανό Ανακτορικό Συγκρότημα χτίστηκε στο μεταίχμιο της ρωμαϊκής και της βυζαντινής εποχής από τον τετράρχη Γαλέριο (299 μ.Χ.) [10]. Σημαντικό

τμήμα του ήρθε στο φως με τις ανασκαφές στο 2^ο μισό του 20^{ου} αιώνα (κάποια κτίρια επισκέψιμα), ενώ τα περισσότερα βρίσκονται στα θεμέλια της σύγχρονης πόλης, όπως ο Ιππόδρομος, μέρος του δυτικού σκέλους του οποίου είναι ορατό ανατολικά της εκκλησίας της Νέας Παναγιάς.

Ο ακουστικός περίπατος της εργασίας πραγματοποιείται μέσω εφαρμογής που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο Android Studio, ένα ολοκληρωμένο προγραμματιστικό περιβάλλον (IDE). Ο ηχητικός χάρτης είναι μία εφαρμογή ήχου δι' εντοπισμού (locative audio) με χρήση εικονικών περιμέτρων (geofences) και καθορισμό επιθυμητής εγγύτητας του χρήστη. Οι εικονικές περιμέτροι έχουν τη δυνατότητα αποστολής συμβάντων εισόδου ή εξόδου του χρήστη, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση ή την παύση της αναπαραγωγής του ήχου.

3. Μεθοδολογία σχεδιασμού

Η βασική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την υλοποίηση της εφαρμογής της εργασίας αποτελείται από δύο κύρια στάδια: τον σχεδιασμό του ηχητικού περιεχομένου και την ανάπτυξη της εφαρμογής.

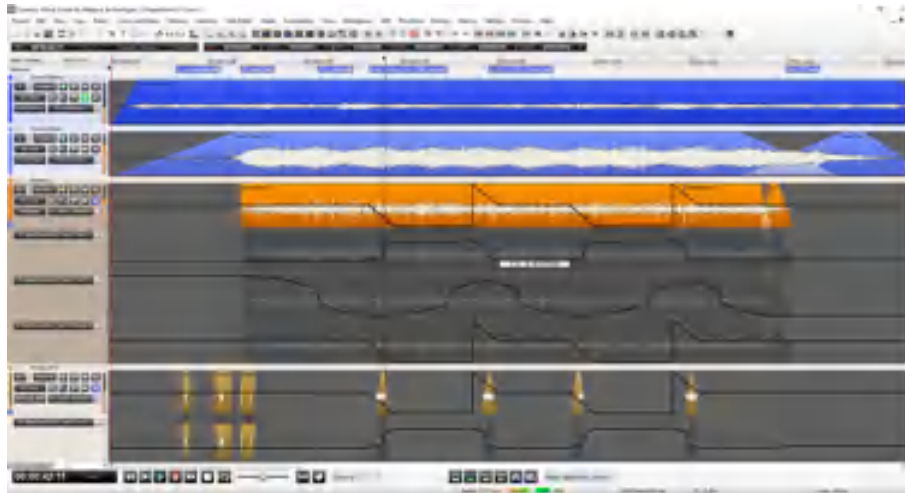
3.1 Ηχητικό Περιεχόμενο

Το ηχητικό περιεχόμενο της εφαρμογής συναποτελείται από την αφήγηση και τον ηχητικό σχεδιασμό. Για την ηχογράφιση, επεξεργασία και σχεδιασμό των ήχων, χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός εργασίας ψηφιακού ήχου (digital audio workstation – DAW) Pyramix της Merging Technologies (Εικόνα 1). Επιπλέον, για τον ηχητικό σχεδιασμό έγινε χρήση του λογισμικού Spat Revolution της Flux, ένα γραφικό περιβάλλον για τον έλεγχο της θέσης των ηχητικών πηγών σε τρισδιάστατους εικονικούς και πραγματικούς χώρους.

Στα κείμενα της αφήγησης (σε α' πρόσωπο) γίνεται περιγραφή των μνημείων του Γαλεριανού Συγκροτήματος, με πληροφορίες για την κατασκευή, τη λειτουργία τους και το ιστορικό πλαίσιο, παροτρύνοντας στον χρήστη να αφογκραστεί το ακουστικό περιβάλλον των χώρων και να παρατηρήσει τα μνημεία στο σημερινό αστικό περιβάλλον. Δεν έχει γίνει χωρική επεξεργασία (spatialization) της αφήγησης, για αποφυγή αποπροσανατολισμού του επισκέπτη. Η ηχογράφιση και η επεξεργασία της αφήγησης έγινε με χρήση του λογισμικού Pyramix, ενώ χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα ηχητικά εφέ, με τη μορφή ψηφιακών plugins για την ρύθμιση και τη βελτίωση του ηχητικού αποτελέσματος. Στη συνέχεια, έγινε εξαγωγή των αρχείων σε μορφή WAV (Waveform Audio Files) αλλά και σε συμπιεσμένη μορφή M4A (MPEG-4 Audio) με κωδικοποίηση AAC, για μείωση του όγκου δεδομένων. Η εκφώνηση των κειμένων έγινε από την Μάρα Τσικάρη, ηθοποιό και ραδιοφωνική παραγωγό.

Παράλληλα, σχεδιάστηκαν τα ηχοτοπία για τους χώρους των μνημείων. Για παράδειγμα, στον Ιππόδρομο μέρος του ηχητικού σχεδιασμού μιας αρματοδρομίας περιλαμβάνει ήχους από το πλήθος των θεατών στις κερκίδες -βοή πριν (7 παραλλαγές) και επευφημίες κατά τη διάρκεια του αγώνα (7 παραλλαγές)- με μίξη από ηχογράφιση σύγχρονης ιπποδρομίας και συναυλίας και κατόπιν μοντάζ για την αποκοπή ήχων του σύγχρονου περιβάλλοντος. Ήχοι από έξι άρματα των τεσσάρων αλόγων αποτυπώνουν την εξέλιξη της αρματοδρομίας. Για κάθε άρμα, δημιουργήθηκε ένα στερεοφωνικό αρχείο, το οποίο αποτελείται από τέσσερα αρχεία

ήχου από καλπασμό αλόγων και δύο αρχεία από ήχο ξύλινης άμαξας. Παράλληλα, επιλέχθηκαν ήχοι οι οποίοι αξιοποιήθηκαν ως ηχητικά εφέ, όπως χλιμίντρισμα και ρουθούνισμα αλόγων, μαστίγιο και διολίσθηση των τροχών στις στροφές.



Εικόνα 1. Δημιουργία του ηχοτοπίου για τον Ιππόδρομο στο Pyramix.

3.2 Σχεδιασμός Εικονικού Χώρου

Ο ακροατής είναι τοποθετημένος στο κέντρο του στίβου ή στις θέσεις των θεατών και περιβάλλεται από τους ήχους των θεατών και των αρμάτων, καθώς αυτά κινούνται κατά τη διάρκεια του αγώνα. Η χρήση αμφιωτικής ακρόασης, αποσκοπεί στην εμπύθιση του χρήστη στο εικονικό ηχοτοπίο. Ο σχεδιασμός του εικονικού χώρου του Ιπποδρόμου και η τοποθέτηση των ηχητικών πηγών πραγματοποιήθηκε στο Spat Revolution με χωρική τοποθέτηση (spatialization) και απόδοση (rendering) των πηγών σε πραγματικό χρόνο, μέσω κατάλληλων Plug-Ins, από τον σταθμό εργασίας ψηφιακού ήχου (DAW) Pyramix. Δημιουργήθηκαν 26 κανάλια, τα οποία χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες (track groups): Crowd Murmur (1-7), Crowd Cheer (8 – 14), Horses (1-6) και Horses SFX (1 – 6). Στις δύο τελευταίες έχει προγραμματιστεί η αυτοματοποίηση των παραμέτρων θέσης και περιστροφής των πηγών για την δημιουργία της κίνησης των αρμάτων. Για την επιστροφή του ήχου από το Spat Revolution, δημιουργήθηκαν δύο Mix Busses: το Binaural για την αμφιωτική μίξη και το Stereo για την στερεοφωνική. Επιπλέον, εισήχθη ένα δοκιμαστικό Mix Bus για την απευθείας ακρόαση των ήχων εκτός του περιβάλλοντος του Spat Revolution.

3.3 Χωρική Μίξη των Ηχητικών Πηγών

Η χωρική μίξη (spatialization) των πηγών πραγματοποιείται στους δύο χώρους (Rooms) του Spat Revolution. Η αλλαγή της θέσης των πηγών στο χώρο πραγματοποιείται μετακινώντας το αντίστοιχο γραφικό αντικείμενο στο τρισδιάστατο γραφικό περιβάλλον. Εκτός από τη θέση της πηγής, μπορούν να ρυθμιστούν υποκειμενικοί παράγοντες (perceptual factors), όπως η παρουσία (presence) και η ακουστική περικάλυψη (envelopment), καθώς και επιλογές για την

αντήχηση, εκπομπή ήχου, περιστροφή ως προς τους άξονες XYZ, απορρόφηση αέρα και ρυθμός μείωσης της στάθμης με την απόσταση.

Οι πηγές που περιέχουν ήχους από το πλήθος των θεατών τοποθετούνται στις κερκίδες, περιμετρικά του στίβου του Ιπποδρόμου. Τα άρματα αρχικά τοποθετούνται στην υπάφηση. Η κίνηση τους κατά τη διάρκεια του αγώνα έχει προγραμματιστεί μέσω αυτοματοποίησης των παραμέτρων της θέσης, Pos X και Pos Y, καθώς και της περιστροφής Rotation Z. Η ίδια αυτοματοποίηση έχει γίνει και στα κανάλια των ηχητικών εφέ των αλόγων. Στους εικονικούς χώρους του Spat περιέχεται μηχανή αντήχησης, η οποία ρυθμίστηκε με στόχο την προσέγγιση της αίσθησης του χώρου του Ιπποδρόμου. Για τον περιηγητή πραγματοποιήθηκε μίξη για δύο διαφορετικές θέσεις.

4. Υλοποίηση της Εφαρμογής

4.1 Δημιουργία και Λειτουργία

Το μεγαλύτερο μέρος του κώδικα της εφαρμογής έχει γραφτεί στη γλώσσα προγραμματισμού Kotlin, με πλεονεκτήματα ότι είναι συνοπτική και διαλειτουργική με τη Java και άλλες γλώσσες. Κάθε έργο στο Android Studio περιέχει μία ή περισσότερες λειτουργικές μονάδες (modules) με αρχεία πηγαίου κώδικα (εφαρμογών Android, βιβλιοθηκών και μηχανής εφαρμογών της Google (Google App Engine), καθώς και αρχεία πόρων. Σε φάκελο περιλαμβάνονται όλοι οι πόροι της εφαρμογής που δεν περιέχουν κώδικα Kotlin ή Java. Για τη δημιουργία και τον έλεγχο των geofences (εικονικών περιμέτρων), χρησιμοποιήθηκε το δείγμα κώδικα Creating and Monitoring Geofences. Η διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών GeofencingApi. παρακολουθεί τις μεταβάσεις και αποστέλλει μία ειδοποίηση όταν η κινητή συσκευή εισέρχεται ή εξέρχεται από μία εικονική περίμετρο. Η αναπαραγωγή των αρχείων ήχου γίνεται μέσω της υπηρεσίας που καλείται όταν η συσκευή εισέλθει σε μία εικονική περίμετρο.

Η εφαρμογή έχει μόνο μία κλάση δραστηριότητας, την κλάση MainActivity, η οποία εκτελείται όταν γίνεται εκκίνηση της εφαρμογής, υπεύθυνη για την αρχικοποίηση και τη λειτουργία όλων βασικών στοιχείων, όπως η προετοιμασία της γραμμής πλοήγησης, ο έλεγχος της εξουσιοδότησης χρήσης τοποθεσίας της συσκευής, η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των geofences, η αποστολή μηνυμάτων σφάλματος.

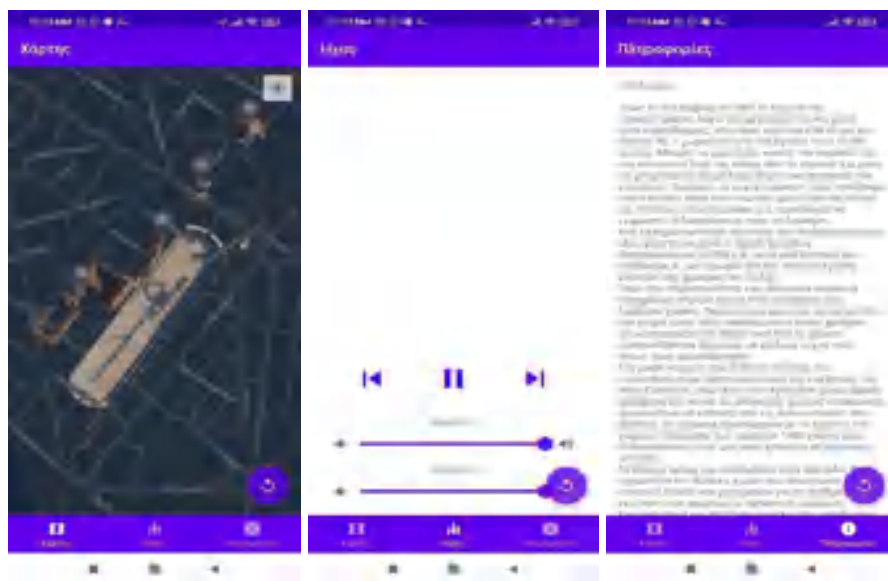
Η διάταξη οθόνης της κύριας δραστηριότητας, το αρχείο activity_main.xml, περιλαμβάνει τη γραμμή πλοήγησης, το «αιωρούμενο» πλήκτρο (floating button) που χρησιμοποιείται για επανεκκίνηση των geofences, και το απόσπασμα της διεπαφής χρήστη όπου εμφανίζονται τα τρία fragments: MapFragment, SoundFragment, υπεύθυνο για τη λειτουργία των πλήκτρων και των ρυθμιστικών του ήχου και InfoFragment για την εμφάνιση των πληροφοριών (info).

4.2 Διεπαφή Χρήστη

Η διεπαφή χρήστη (User Interface – UI) της εφαρμογής του Ηχητικού Χάρτη αποτελείται από τρεις οθόνες. Η αρχική οθόνη εμφανίζει το χάρτη, με επικάλυψη (overlay) με την αναπαράσταση της κάτοψης των μνημείων, τη θέση του χρήστη και δείκτες στο κέντρο των εικονικών περιμέτρων (geofences). Η δεύτερη οθόνη

περιέχει τα πλήκτρα και τα ρυθμιστικά για τον ήχο - ένα πλήκτρο εναλλαγής (pause/resume) και δύο πλήκτρα για τη μετάβαση στο προηγούμενο ή στο επόμενο αρχείο της λίστας αναπαραγωγής. Επιπλέον, υπάρχουν δύο ρυθμιστικά (sliders) για τη στάθμη της αφήγησης και των ηχοτοπίων ξεχωριστά. Στην τρίτη οθόνη εμφανίζονται πληροφορίες σχετικά με τα μνημεία, με τη μορφή κειμένου με κύλιση.

Για την εναλλαγή μεταξύ των οθονών χρησιμοποιείται η γραμμή πλοήγησης στο κάτω μέρος της οθόνης (bottom navigation bar). Επίσης, στο κάτω δεξιά μέρος της οθόνης υπάρχει ένα «αιωρούμενο» πλήκτρο (Floating Action Button) το οποίο κάνει επανεκκίνηση της εφαρμογής. Στην Εικόνα 2 εμφανίζονται στιγμιότυπα από τις τρεις οθόνες του Ηχητικού Χάρτη.



Εικόνα 2. Περιβάλλον εφαρμογής.

4.3 Εκτίμηση Λειτουργίας

Ο σχεδιασμός της εφαρμογής αποτελεί μία πρόταση και όχι τελειοποιημένο εμπορικό προϊόν, καθώς έχουν γίνει συμβιβασμοί σχετικά με τη λειτουργία της εφαρμογής. Κατά τη διάρκεια των περιηγήσεων διαπιστώθηκαν δυσλειτουργίες, όπως είναι ο απότομος τερματισμός της εφαρμογής όταν χρησιμοποιούνται τα πλήκτρα για τη ρύθμιση της αναπαραγωγής του ήχου και των ειδοποιήσεων (push notifications) των γεγονότων μετάβασης των εικονικών περιμέτρων. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι κάποιες φορές υπάρχει καθυστέρηση στην αποστολή συμβάντων κατά την έξοδο από την εικονική περίμετρο ενός μνημείου.

Ενώ η αίσθηση του εντοπισμού του ήχου, ειδικά όταν υπάρχει κίνηση της ηχητικής πηγής, και της ακουστικής περικάλυψης (envelopment) είναι εντυπωσιακή, κάποιες φορές δίνεται η εντύπωση ότι χάνεται μέρος από το συχνοτικό περιεχόμενο του ήχου και από το βάθος της μίξης, σε σύγκριση με μία στερεοφωνική μίξη. Αυτό το πρόβλημα βελτιώνεται ως ένα βαθμό δοκιμάζοντας διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς σχετιζόμενες με την κεφαλή (HRTFs).

Η χρήση του χάρτη, με την επικάλυψη της εικόνας της κάτοψης της αναπαράστασης του Γαλεριανού Συγκροτήματος και σε συνδυασμό με την ένδειξη της θέσης του χρήστη, είναι πολύ βοηθητική στην περιήγηση στους χώρους του μνημειακού συνόλου. Το ίδιο ισχύει και για τις ειδοποιήσεις που εμφανίζονται όταν ο περιηγητής πλησιάζει ή απομακρύνεται από ένα σημείο ενδιαφέροντος.

5. Αποτελέσματα, συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του πρώτου συγγραφέα σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε εφαρμογή ήχου δι' εντοπισμού που προσφέρει στον περιηγητή τη δυνατότητα να γνωρίσει καλύτερα τους χώρους του Γαλεριανού συγκροτήματος, με πρακτικές χωρικού ήχου (spatial audio) και αμφιωτικής ακρόασης προς την δημιουργία μιας εμπυθιστικής εμπειρίας (immersive audio). Η ακρόαση των ήχων σε συνδυασμό με το πραγματικό ακουστικό περιβάλλον ενδυναμώνει την εμπειρία, ενώ η όραση του περιηγητή δεν εμπλέκεται, καθώς δεν απαιτείται η εστίαση του στην οθόνη της κινητής συσκευής και η προσοχή του επικεντρώνεται στην ακρόαση. Σε μελλοντικό σχεδιασμό, ο ηχητικός χάρτης θα μπορούσε να εισάγει δυνατότητες όπως η μείωση της στάθμης με την απόσταση, τρισιδιάστατες πηγές, με αμφιωτική ακρόαση, αξιοποιώντας την κατεύθυνση και την περιστροφή της κινητής συσκευής, χαμηλοπερατό φίλτρο, ειδικά στον ηχητικό σχεδιασμό κλειστών χώρων και να βελτιώσει τον έλεγχο των μεταβάσεων (εισόδου/εξόδου) των εικονικών περιμέτρων.

Βιβλιογραφία

- [1] R. M. Schafer *The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World*. Destiny Books, Rochester (1994).
- [2] B. Truax (edited by) *Handbook for Acoustic Ecology* (2η εκδ.). Cambridge Street Publishing (1999).
- [3] A. McCartney «Soundwalking: creating moving environmental sound narratives» *The Oxford Handbook of Mobile Music Studies*, **2**, pp 212-237 (2014).
- [4] S. Bradley, «History to go: oral history, audiowalks and mobile media» *Oral History*, **40**, pp 99-110. (2012)
- [5] A. Talianni «Walking-with-sounds: creative agency, artistic collaboration and the sonic production of acoustic city spaces» University of Edinburgh (2019).
- [6] J. Waldock «Soundmapping: Critiques And Reflections On This New Publicly Engaging Medium» *Journal of Sonic Studies*, **1** (2018)
- [7] S. Thulin «Composing Places: Practices and Potentials of Sound Mapping and Locative Audio» Concordia University Montreal (2014).
- [8] Ν. Νικονάνου, Α. Μπούνια, Α. Φιλίππουπολίτη, Α. Χουρμουζιάδη & Ν. Γιαννούτσου *Μουσειακή μάθηση και εμπειρία στον 21ο αιώνα*. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα (2015).
- [9] G. Fischer «End User Development and Meta-Design: Foundations for Cultures of Participation» *JOEUC*, **22**, pp 52-82 (2010).
- [10] Φ. Αθανασίου, Β. Μάλαμα, Μ. Μίζα & Μ. Σαραντίδου *Γαλεριανό Συγκρότημα. Μία εικονική περιήγηση*. ΙΣΤ' Εφορία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, Θεσσαλονίκη (2013).



AudioScout: Συλλογή ηχητικών δεδομένων στο πεδίο

Ενές Αχμέτ Κεχαγιά
Ερευνητής,
Τμήμα Κινηματογράφου, ΑΠΘ
enesachm@film.auth.gr

Λάζαρος Βρύσης
Ερευνητής,
Τμήμα Δημοσιογραφίας & ΜΜΕ, ΑΠΘ
lvrysis@auth.gr

Χρήστος Γούσιος
Αν. Καθηγητής,
Τμήμα Κινηματογράφου, ΑΠΘ
cgoussios@film.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει το AudioScout, μια εφαρμογή διαχείρισης ηχητικού υλικού που στοχεύει να αναβαθμίσει την εργασία των sound designers. Η εφαρμογή είναι σχεδιασμένη για να επιτρέπει την αποτελεσματική καταγραφή, οργάνωση, επεξεργασία και αναπαραγωγή ηχητικών δεδομένων. Οι sound designers αντιμετωπίζουν την πρόκληση να αποθηκεύουν και να διαχειρίζονται πολλές ηχογραφήσεις, προκειμένου να δημιουργήσουν το σωστό ηχητικό υπόβαθρο για κάθε παραγωγή. Το AudioScout προσφέρει μια διαισθητική διεπαφή που επιτρέπει την εύκολη ηχογράφηση σε υψηλή ποιότητα όπως επίσης παρέχει τη δυνατότητα ταξινόμησης των αρχείων βάσει μεταδεδομένων όπως τοποθεσία, χρονοσφραγίδα, και είδος ήχου. Στην εφαρμογή θα ενσωματωθούν πιο προηγμένες τεχνολογίες, όπως αυτοματοποιημένη επεξεργασία και αναγνώριση ήχων με βάση τεχνητή νοημοσύνη, καθώς και διασύνδεση με άλλα εργαλεία παραγωγής, αυξάνοντας τη δυναμική και την παραγωγικότητα των επαγγελματιών του ήχου.

AudioScout: Sound Data Collection in the Field

ABSTRACT

This paper introduces AudioScout, a sound management application designed to upgrade the work of sound designers. The application facilitates efficient recording, organization, editing, and playback of audio data. Sound designers face the challenge of storing and managing numerous recordings to create the appropriate audio backdrop for each production. AudioScout provides solutions through an intuitive interface that enables easy, high-quality recording, with capabilities for categorizing files based on metadata such as location, timestamp, and type of sound. The application will integrate more advanced technologies, such as automated processing and sound recognition based on artificial intelligence, as well as interconnectivity with other production tools, enhancing the dynamics and productivity of sound professionals.

1 Εισαγωγή

Στον σύγχρονο κόσμο της κινηματογραφικής παραγωγής αλλά και της παραγωγής οπτικοακουστικού περιεχομένου, γενικότερα, ο ήχος έχει καθιερωθεί ως ένας από τους πυλώνες που επηρεάζουν τη συνολική ποιότητα και την αίσθηση της τελικής παραγωγής. Ο ρόλος του sound designer είναι σημαντικός, καθώς είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία, τη σύλληψη και την επεξεργασία των ηχητικών στοιχείων που θα συμβάλλουν στην αφήγηση της ιστορίας. Παρά την καθοριστική συμβολή τους, οι sound designers συχνά αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη συλλογή και οργάνωση ηχητικού υλικού, ειδικά όταν απαιτείται να καταγράψουν ήχους στο πεδίο για χρήση σε συγκεκριμένα project στα οποία εργάζονται ή και για μελλοντική χρήση.

Η τεχνολογία έχει προχωρήσει αρκετά, προσφέροντας προηγμένες λύσεις υλικολογισμικού για την καταγραφή και επεξεργασία ήχου [1], ωστόσο, υπάρχει έλλειψη ενός εργαλείου που να επιτρέπει την εύκολη και αποτελεσματική συλλογή, καταγραφή και αναζήτηση ηχοτοπίων. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνεται η ανάπτυξη της εφαρμογής *AudioScout*, μιας προηγμένης, εύχρηστης και πλήρως ενσωματωμένης λύσης για τους επαγγελματίες του ήχου. Το *AudioScout* στοχεύει στην παροχή ενός αξιόπιστου και διαισθητικού εργαλείου που επιτρέπει την άμεση ηχογράφηση, την αποθήκευση με συνοδευτικά μεταδεδομένα (όπως τοποθεσία και χρονοσφραγίδα), και την εύκολη ανάκτηση ηχητικών αρχείων για χρήση σε μελλοντικές παραγωγές.

Η παρούσα εργασία θα παρουσιάσει τη σχεδίαση και τις δυνατότητες της εφαρμογής, εστιάζοντας στην προστιθέμενη αξία που προσφέρει στον τομέα του sound design.

2 Πλαίσιο

Το sound design αναφέρεται στην τέχνη και πρακτική της δημιουργίας ηχητικών τοπίων και ηχητικών εφέ για διάφορες εφαρμογές, όπως ταινίες, τηλεοπτικές εκπομπές, θεατρικές παραστάσεις και βιντεοπαιχνίδια. Ο ρόλος του sound designer είναι να επιλέγει, να επεξεργάζεται, και να συνθέτει τον ήχο με τρόπο που να υποστηρίζει και να εμπλουτίζει την οπτική αφήγηση. Η ηχογράφηση στον κινηματογράφο είναι κρίσιμη καθώς τα ηχητικά στοιχεία παίζουν έναν καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία της ατμόσφαιρας και την εμβάθυνση της εμπειρίας του θεατή. Ηχογραφήσεις υψηλής ποιότητας μπορούν να μεταφέρουν τον θεατή σε έναν άλλο κόσμο, να βελτιώσουν την αίσθηση της πραγματικότητας [2].

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία του συνόλου της ηχητικής εμπειρίας σε κάθε οπτικοακουστική παραγωγή, αποτελούν οι ατμόσφαιρες, γνωστές και ως περιβάλλοντα ή και φόντα (atmospheres, ambiances, backgrounds). Αυτό που ενισχύει τη σημαντικότητα των ήχων αυτών, είναι ακριβώς το γεγονός ότι περνούν - και πρέπει να περνούν- απαρατήρητοι, και οφείλουν να είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με το τοπίο/εικόνα/σύμπαν που παρουσιάζεται, ή αιτιολογημένοι από αυτό. Από την

άλλη βέβαια, είναι ακριβώς αυτοί οι ήχοι που συμβάλλουν και ενισχύουν την πειθώ των εικόνων και εξασφαλίζουν την απερίσπαστη θέαση ή και συμμετοχή. (δηλαδή εξαρτώνται από τις εικόνες, αλλά και οι εικόνες από αυτούς, καθώς τις ολοκληρώνουν). Η εφαρμογή τους και ο τρόπος χρήσης τους ποικίλει, με αποκορύφωμα τη χρήση τους στις κινηματογραφικές παραγωγές, όπου απαιτείται ένα πλήθος ατμοσφαιρών σε κάθε διαφορετική σκηνή, με σκοπό την ηχητικά αφηγηματική πληρότητα [3].

Στην κινηματογραφική αίθουσα, το ηχοσύστημα υποστηρίζει τον πολυκάναλο περιφερειακό ήχο (surround sound και atmos), που παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης της αφήγησης με πολλαπλούς τρόπους, με την τοποθέτηση των διαφορετικών ήχων στο χώρο, άλλοτε δημιουργώντας αληθοφάνεια, άλλοτε ενισχύοντας την εμβύθιση και τη συγκέντρωση στην παρακολούθηση, είτε ενισχύοντας ηχητικά την εξιστόρηση κ.ο.κ. Η τοποθέτηση των ήχων αυτών στο σύνολο του ηχητικού σύμπαντος της εκάστοτε παραγωγής, πραγματοποιείται κατά τη μεταπαραγωγή του ήχου (sound post production), στο στάδιο του ηχητικού σχεδιασμού [4]. Οι εικόνες είναι καθοδηγητικές για τους περισσότερους από τους ήχους αυτούς, αλλά και η φαντασία του κάθε επαγγελματία, συμβάλλει στη σύνθεσή τους. Για παράδειγμα, η εικόνα μιας παραλίας, οδηγεί άμεσα στη χρήση ήχων της θάλασσας, επιπρόσθετα όμως μπορεί να υπάρχει κι ο ήχος ενός μη ορατού αεροπλάνου, που διασχίζει τον ουρανό πάνω από την παραλία αυτή, ή κι ο ήχος ενός επίσης μη ορατού δρόμου, που διέρχεται κοντά από αυτή την παραλία [1]. Οι πηγές των ήχων αυτών είναι ποικίλες και η προέλευσή τους πολλαπλή: υπάρχει πλήθος βιβλιοθηκών ήχου, προς πώληση αλλά και δωρεάν, cloud libraries, αλλά και προσωπικές βιβλιοθήκες του κάθε sound designer. Κάποιες φορές επίσης, μπορεί κάποια παραγωγή να παραγγείλει χαρακτηριστικούς ήχους ατμοσφαιρών από συγκεκριμένο τόπο, ώστε να υπάρχει συνέπεια, κυρίως σε περιπτώσεις όπου ακούγονται και φωνές. Για παράδειγμα, μια παραγωγή που παρουσιάζει ένα εστιατόριο στην Ελλάδα, απαιτεί να ακούγεται και το πλήθος που παρευρίσκεται εκεί το οποίο και μιλάει ελληνικά. Αυτό που είναι σίγουρο είναι ότι όλοι όσοι ασχολούνται με τον ηχητικό σχεδιασμό, ηχογραφούν διαρκώς ήχους τους οποίους και διατηρούν σε προσωπικές τους βιβλιοθήκες.

Η οργάνωση αυτών των ήχων, όπως είναι αναμενόμενο, είναι αρκετά διαφορετική από επαγγελματία σε επαγγελματία, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετά πρωτόκολλα που κυκλοφορούν για τον ορθό τρόπο που πρέπει να ονομάζονται οι ήχοι. Βιβλιοθηκάριοι ήχων προτείνουν τρόπους ονοματοδοσίας, που εξασφαλίζουν την εύκολη προσπέλαση και εύρεση των απαιτούμενων ήχων. Επομένως, η δημιουργία εργαλείων που να εκμεταλλεύονται τις δυνατότητες της τεχνολογίας με στόχο να εξυπηρετούν τους επαγγελματίες προσπαθώντας να συστηματοποιήσουν και να τυποποιήσουν τις πολυποικίλες ροές εργασίας και να ενοποιήσουν τα πρωτόκολλα παρουσιάζει ενδιαφέρον. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και το concept της συγκεκριμένης εργασίας, όπου προσπαθεί να εκμεταλλευτεί σύγχρονες τεχνολογίες όπως τα smartphones, τα φορητά συστήματα ηχοκαταγραφής, την τεχνητή νοημοσύνη και τις υπηρεσίες cloud ώστε να προτείνει μια διαισθητική και εύχρηστη λύση λογισμικού που να αναβαθμίζει την εμπειρία

χρήσης όσον αφορά τη συλλογή, οργάνωση και αναζήτηση ηχητικών καταγραφών, και πιο συγκεκριμένα, περιβαλλόντων/φόντων.

3 Ανάπτυξη Εφαρμογής

3.1 Τεχνικές Προδιαγραφές

Η εφαρμογή AudioScout αναπτύσσεται ως Progressive Web App (PWA) για να εξασφαλίσει εύκολη πρόσβαση και ευελιξία στη χρήση, συμβατή τόσο με iOS όσο και με Android. Θα προσφέρει τοπική αποθήκευση δεδομένων, με την επιλογή για συγχρονισμό σε cloud για ασφαλή αποθήκευση και διαχείριση των αντιγράφων ασφαλείας. Τα δεδομένα αποθηκεύονται online, ενώ η διεπαφή χρήστη θα είναι απλή και καθαρή, σχεδιασμένη για να διευκολύνει τη χρήση σε φορητές υπολογιστικές συσκευές.

3.2 Απαιτήσεις

Η εφαρμογή σχεδιάζεται για να παρέχει εύκολη και διαισθητική ηχογράφηση με υψηλή ποιότητα και αποδοτικότητα. Οι βασικές αρχές σχεδίασης συνοψίζονται παρακάτω:

- **Εύκολη Ηχογράφηση:** Η εφαρμογή θα πρέπει να παρέχει έναν απλό και καθαρό τρόπο ηχογράφησης που να επιτρέπει στους χρήστες να ξεκινούν την ηχογράφηση με μόνο ένα κλικ, ακολουθώντας τη λογική της κάμερας ενός κινητού τηλεφώνου.
- **Μεταδεδομένα Ηχογραφήσεων:** Κάθε ηχογράφηση θα πρέπει να συλλέγει αυτόματα μεταδεδομένα όπως τοποθεσία, ημερομηνία, και ώρα της ηχογράφησης, καθώς και η δυνατότητα προσθήκης περιγραφών του περιβάλλοντος ήχου και άλλων σημειώσεων από τον χρήστη.
- **Οργάνωση και Αναζήτηση:** Θα πρέπει να προσφέρονται εκτεταμένες δυνατότητες οργάνωσης των ηχογραφήσεων ανά κατηγορία, τοποθεσία, ή ημερομηνία, με λειτουργία αναζήτησης για τη γρήγορη εύρεση συγκεκριμένων αρχείων.
- **Εξαγωγή και Κοινοποίηση:** Προσφορά δυνατοτήτων για εξαγωγή και κοινοποίηση ηχογραφήσεων σε διάφορες μορφές και μέσω διαφόρων πλατφορμών, ώστε οι χρήστες να μπορούν να τις χρησιμοποιούν σε άλλες εφαρμογές ή να τις αποστέλλουν σε συνεργάτες.

3.3 Σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός της εφαρμογής βασίζεται σε μια ευέλικτη αρχιτεκτονική που να καλύπτει τις ανάγκες του χρήστη. Ανώτερος στόχος είναι να ενσωματωθούν ολοένα και περισσότερες λειτουργίες, όπως η επεξεργασία και η αποθρομβοποίηση των ηχητικών δεδομένων. Η διεπαφή σχεδιάζεται με στόχο την ελαχιστοποίηση της περιπλοκότητας, επιτρέποντας στους χρήστες να προβαίνουν στην ηχογράφηση και τη διαχείριση του υλικού με λίγα μόνο βήματα. Η ανάπτυξη λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις για διασφάλιση της ποιότητας του ήχου και της γενικότερης εμπειρίας του χρήστη. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα πρώιμο mockup που της κεντρικής οθόνης ηχογράφησης της εφαρμογής.



Εικόνα 1: Πρωτότυπο χαμηλής πιστότητας της κεντρικής οθόνης ηχογράφησης της εφαρμογής

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού για το AudioScout αποτελούν τον θεμέλιο λίθο για την ανάπτυξη μιας αποδοτικής και ευχάριστης εμπειρίας χρήστη. Στοχεύουν στο να δημιουργήσουν ένα σύστημα που είναι εύχρηστο, αυτόματο και προσβάσιμο από παντού, εξυπηρετώντας τον χρήστη με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Οι τρεις βασικές αρχές είναι οι **Intuitive**, **Inputless**, και **Ubiquitous**.

Η αρχή **Intuitive** εξασφαλίζει ότι η εφαρμογή θα είναι εύχρηστη και διαισθητική. Ο απλός σχεδιασμός, η εύκολη πλοήγηση και η γρήγορη απόκριση στις ενέργειες του χρήστη επιτρέπουν μια φυσική αλληλεπίδραση με την εφαρμογή, χωρίς την ανάγκη περίπλοκων οδηγιών ή εκμάθησης. Η αρχή **Inputless** εστιάζει στην ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων από τον χρήστη για εισαγωγή δεδομένων. Μέσω της αυτοματοποιημένης επισημείωσης δεδομένων, της μετατροπής ομιλίας σε κείμενο (STT) και της χωροχρονικής επισήμανσης, η εφαρμογή προσφέρει μια πιο έξυπνη και αποδοτική εμπειρία, επιτρέποντας στο σύστημα να εντοπίζει και να καταγράφει πληροφορίες αυτόματα, με ελάχιστη παρέμβαση από τον χρήστη. Τέλος, η αρχή **Ubiquitous** εξασφαλίζει την καθολική διαθεσιμότητα της εφαρμογής σε όλες τις πλατφόρμες. Μέσω της χρήσης τεχνολογιών web, το AudioScout αποτελεί μία progressive web application (PWA), με αποτέλεσμα να είναι συμβατή με περιβάλλοντα iOS, Android και web, και καθώς υποστηρίζει την αποθήκευση στο cloud, επιτρέπει την άμεση πρόσβαση του χρήστη στα δεδομένα του από οπουδήποτε.

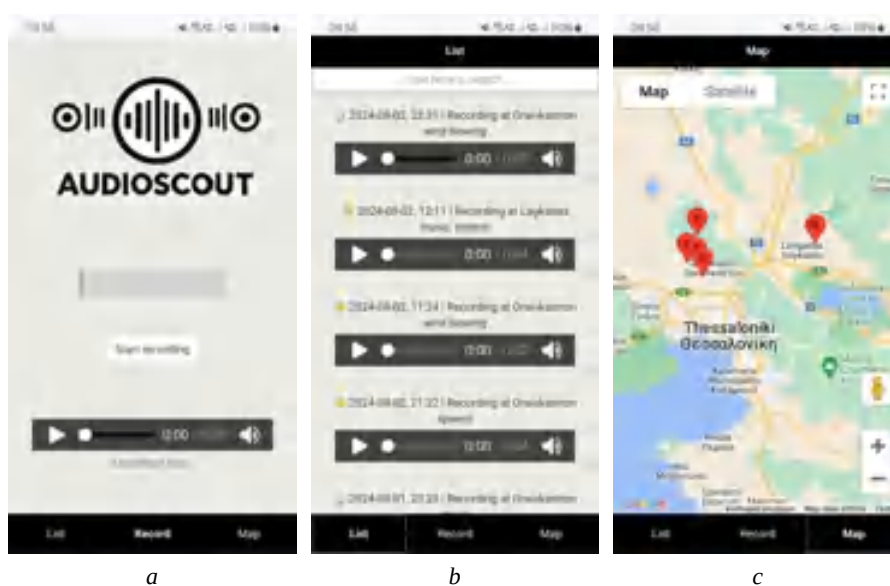
3.4 Τεχνολογίες και Εργαλεία Ανάπτυξης

Όπως προαναφέρθηκε, για την ανάπτυξη της εφαρμογής χρησιμοποιούνται σύγχρονες τεχνολογίες web ανάπτυξης, όπως HTML, CSS, και JavaScript. Η λογική επεξεργασίας της εφαρμογής βασίζεται στη JavaScript, αξιοποιώντας τη μεγάλη παρακαταθήκη αλγορίθμων που έχουν υλοποιηθεί στη συγκεκριμένη γλώσσα, αλλά και στη δυνατότητα αξιοποίησης μοντέλων μηχανικής μάθησης (και βαθιάς μάθησης), όπως και τη δυνατότητα επικοινωνίας με εξωτερικές υπηρεσίες web (web

services), στοιχεία που επιταχύνουν την ανάπτυξη. Για τη διαχείριση δεδομένων χρησιμοποιείται μια σχεσιακή βάση δεδομένων MySQL, διευκολύνοντας τη διαχείριση δεδομένων. Τέλος, όλα τα δεδομένα του χρήστη αποθηκεύονται στο cloud, ενώ η κρυπτογράφησή τους είναι υπό διερεύνηση, ώστε να αναβαθμιστεί η πτυχή της ασφάλειας.

3.5 Λειτουργικότητα και Χαρακτηριστικά

Η εφαρμογή AudioScout έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει μια σειρά από λειτουργίες που καθιστούν την ηχογράφιση, την αποθήκευση, την επεξεργασία και την ανάκτηση ηχητικών αρχείων αποτελεσματική και ιδιαίτερα εύχρηστη για sound designers.



Εικόνα 2: Screenshots από τις βασικές οθόνες της εφαρμογής AudioScout: a) Επιλογή ποιότητας και μορφής ήχου για άμεσες ηχογραφήσεις, b) κατηγοριοποίηση και ετικετοποίηση αρχείων για εύκολη αναζήτηση, c) γεωγραφική αναζήτηση και προβολή ηχογραφήσεων στον χάρτη.

i. Άμεση Ηχογράφιση

Οι χρήστες μπορούν να ξεκινήσουν ηχογραφήσεις αμέσως μόλις ανοίξουν την εφαρμογή, χωρίς να χρειάζεται να περιηγηθούν μέσα από περίπλοκες ρυθμίσεις ή επιλογές. Η εφαρμογή είναι σχεδιασμένη για να καταγράφει ηχοτοπία με ευκολία, χρησιμοποιώντας προεπιλεγμένες ρυθμίσεις ήχου που εξασφαλίζουν μικρό μέγεθος αρχείων, αλλά και επαρκή ποιότητα του ηχητικού υλικού.

ii. Οργάνωση και Ταξινόμηση Ηχητικών Αρχείων

Η εφαρμογή προσφέρει δυνατότητες οργάνωσης, επιτρέποντας στους χρήστες να καταχωρούν ηχητικά αρχεία σε κατηγορίες, να προσθέτουν ετικέτες και να

διαχειρίζονται τα μεταδεδομένα όπως τοποθεσία και χρονοσφραγίδα. Αυτό καθιστά την αναζήτηση και την ανάκτηση ηχητικών αρχείων γρήγορη και αποτελεσματική.

iii. Απεικόνιση Ηχογραφήσεων σε Χάρτη

Η εφαρμογή ενσωματώνει μια δυναμική λειτουργία απεικόνισης ηχογραφήσεων σε χάρτη, όπου κάθε ηχογράφιση συνοδεύεται από μια πινέζα στην ακριβή τοποθεσία που έγινε. Οι χρήστες μπορούν να πλοηγηθούν εύκολα στον χάρτη για να εξερευνήσουν ηχογραφήσεις σε διάφορες τοποθεσίες, προσφέροντας μια οπτική και διαδραστική εμπειρία αναζήτησης. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει επίσης την αναζήτηση ηχογραφήσεων μέσω της γεωγραφικής τους θέσης, καθιστώντας την επιλογή και ανάκτηση των αρχείων πιο άμεση και εύκολη.

4 Μελλοντικές εξελίξεις

Η ανάγκη για συνεχή βελτίωση και επέκταση των λειτουργιών είναι πάντα δεδομένη, ώστε μια εφαρμογή λογισμικού παραμένει στην κορυφή της τεχνολογίας και να ικανοποιεί τις ανάγκες των επαγγελματιών του ήχου. Όσον αφορά τη συγκεκριμένη περίπτωση, αρχικά, στο AudioScout μπορούν να ενσωματωθούν εφέ για την επεξεργασία του ήχου, όπως ισοστάθμιση, φιλτράρισμα θορύβου, και επεξεργασία δυναμικών για τη βελτιστοποίηση του ηχητικού σήματος. Έπειτα, χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, η εφαρμογή θα μπορεί να αναγνωρίζει και να καταγράφει ηχητικά περιβάλλοντα, προσφέροντας στους χρήστες μια πλούσια βιβλιοθήκη από επισημειωμένα ηχητικά στιγμιότυπα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναφορές ή άμεση χρήση σε παραγωγές. Τέλος, η εφαρμογή θα μπορεί να υποστηρίξει εκτεταμένες δυνατότητες συνεργασίας, επιτρέποντας σε πολλαπλούς χρήστες να συνεργάζονται σε ηχητικά πρότζεκτ, να μοιράζονται αρχεία και να συντονίζουν τις εργασίες τους εντός της πλατφόρμας, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και τη δημιουργική συνεργασία.

5 Αναφορές

2. Vrysis, L., Tsipas, N., Dimoulas, C., & Papanikolaou, G. (2015). Mobile audio intelligence: From real-time segmentation to crowdsourced semantics. In Audio Mostly 2015.
3. Gousios C. (2018), Sound & Music in Cinema [PowerPoint slides], School of Film, AUTh.
4. Schafer, R. M. (1993). The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world. Simon and Schuster.
5. Chion, M. (2010). Ο ήχος στον κινηματογράφο. Εκδόσεις Πατάκη, Paris France.



To Headphone Theatre Πριν, Κατά τη Διάρκεια και Μετά την Πανδημία του COVID-19

Έλενα Ιγνατιάδου*, Χρήστος Γούσιος

¹Πλατεία Ιπποδρομίου 6, Θεσσαλονίκη

²Ικονίου 1, Σταυρούπολη

*elenaigntd@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την εξέλιξη του ηχητικού σχεδιασμού στο θέατρο, επισημαίνοντας τις αλλαγές που επέφερε η πανδημία του COVID-19. Διερευνά τη μετάβαση από φυσικούς θεατρικούς χώρους στις ψηφιακές και υβριδικές παραστάσεις, και τάσεις όπως το headphone theatre, το binaural audio και οι εμβυθιστικές VR και το AR τεχνολογίες. Η εργασία αναφέρεται στο πώς αυτές οι καινοτομίες συνεχίζουν να επηρεάζουν το θέατρο, συνδυάζοντας παραδοσιακά και ψηφιακά στοιχεία, για να ανταποκριθούν στις νέες προσδοκίες του κοινού.

Headphone Theatre Before, During and After the COVID-19 Pandemic

ABSTRACT

This paper examines the evolution of sound design in theater, highlighting the shifts brought by the COVID-19 pandemic. It explores the transition from live, space-dependent soundscapes to virtual and hybrid formats, and the rise of trends like headphone theater, binaural audio, and immersive technologies such as VR and AR. The discussion addresses how these innovations continue to influence theater, blending traditional and digital elements to meet new audience expectations.

Εισαγωγή

Η εξέλιξη του ήχου στο θέατρο έχει υπάρξει καθοριστικής σημασίας στη διαμόρφωση της συνολικής εμπειρίας μίας παράστασης, μεταμορφώνοντας τον τρόπο με τον οποίο το κοινό αντιμετωπίζει και αντιλαμβάνεται μία θεατρική παραγωγή. Από την απλή μέριμνα για την βελτίωση της στάθμης της φωνής των ηθοποιών που λάμβανε χώρα παλαιότερα, αλλά και την αναπαραγωγή ήχων επί τόπου, έως τα σύγχρονα 3D ηχοτοπία, ο ηχητικός σχεδιασμός έχει εξελιχθεί σε μία εκλεπτυσμένη μορφή τέχνης, η οποία πλέον αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της αφήγησης και της δημιουργίας ατμόσφαιρας.

Αυτή η ερευνητική εργασία εξετάζει την εξέλιξη του ήχου στο θέατρο, εστιάζοντας συγκεκριμένα στις αλλαγές που άρχισαν να λαμβάνουν χώρα την προ-COVID εποχή, και συνέχισαν κατά τη διάρκεια της πανδημίας αλλά και στη συνέχεια αυτής. Επιπρόσθετα, διερευνά πώς η πανδημία επιτάχυνε την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών ήχου, οδήγησε σε καινοτόμες πρακτικές και έφερε στο προσκήνιο νέες θεατρικές τάσεις, όπως το headphone theatre, οι οποίες συνεχίζουν να επηρεάζουν τις θεατρικές παραγωγές ακόμη και σήμερα.

1. Πριν την Πανδημία του COVID-19

Πριν από τον COVID-19, ο θεατρικός ηχητικός σχεδιασμός έδινε έμφαση στη ζωντανή ακουστική και τον φυσικό ήχο, ενώ τεχνολογίες όπως το binaural audio και τα καθηλωτικά ηχοτοπία ενσωματώνονταν σταδιακά στις παραστάσεις, βελτιώνοντας την εμπειρία του κοινού.

1.1 Πώς ο σχεδιασμός ήχου βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό στον χώρο του θεάτρου

Πριν την ενσωμάτωση ψηφιακών καινοτομιών, ο σχεδιασμός θεατρικού ήχου ήταν εγγενώς συνδεδεμένος με την αρχιτεκτονική και την ακουστική του χώρου του θεάτρου. Η επιτυχία του ηχητικού σχεδιασμού εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από χαρακτηριστικά του χώρου, όπως το μέγεθος, το σχήμα, τα υλικά και το πώς ο ήχος ταξίδευε σε αυτόν. Οι σχεδιαστές εξέταζαν αυτές τις χωρικές ιδιότητες για να εξασφαλίσουν, ότι τα ηχητικά εφέ, οι διάλογοι και η μουσική ακούγονταν καθαρά και καθήλωναν το κοινό, δημιουργώντας μια ισορροπημένη ακουστική εμπειρία σε κάθε θέση του θεάτρου [1].

Ενώ η τεχνολογία ενίσχυσης ήχου και τα μικρόφωνα χρησιμοποιούνταν σε ορισμένους μεγαλύτερους χώρους, οι σχεδιαστές ήχου εστίαζαν στη διατήρηση της αυθεντικότητας και της οικειότητας των ζωντανών, μη ενισχυμένων παραστάσεων, ειδικά σε μικρότερα και μεσαίου μεγέθους θέατρα [1]. Ο φυσικός χώρος δεν είναι δευτερευούσης σημασίας, αλλά, αντίθετα, ένα ζωντανό συστατικό, που διαμορφώνει τον τρόπο παραγωγής και λήψης του ήχου [2].

1.2. Τεχνολογίες και μέθοδοι ηχητικού σχεδιασμού (3D soundscapes, immersive audio, surround sound)

Πριν από τον COVID-19, ο σχεδιασμός ήχου στο θέατρο είχε ήδη αρχίσει να αγκαλιάζει μία σειρά προηγμένων τεχνολογιών για τη δημιουργία πιο καθηλωτικών και δυναμικών ακουστικών εμπειριών. Μία από τις πιο αξιοσημείωτες εξελίξεις ήταν αυτή της χρήσης τρισδιάστατων ηχοτοπιών, τα οποία ενίσχυαν τον ρεαλισμό και το βάθος μίας παράστασης. Με τη χρήση τεχνικών χωρικού ήχου, τα 3D ηχοτοπία δημιουργούν μία πιο περιβάλλουσα εμπειρία που μιμείται τον περιβαλλοντικό ήχο του πραγματικού κόσμου [3].

Μια άλλη σημαντική εξέλιξη στον ηχητικό σχεδιασμό κατά την προ-COVID εποχή ήταν η άνοδος των εμβυθιστικών τεχνολογιών ήχου (immersive audio technologies). Αυτά τα συστήματα, όπως ο αμφιωτικός ήχος (binaural audio), επέτρεπαν τον ήχο υψηλής κατευθυντικότητας να δημιουργεί μία πιο προσωπική και

οικεία ακουστική εμπειρία, καθώς προσομοιώνουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι ακούν τον ήχο φυσικά [2].

Εκτός από τα τρισδιάστατα ηχοτοπία και το immersive audio, τα συστήματα surround ήχου έγιναν ένα σύνηθες εργαλείο για τα θέατρα που ήθελαν να δημιουργήσουν ένα πληρέστερο και καθολικό περιβάλλον ήχου. Τοποθετώντας ηχεία γύρω από το θέατρο, οι σχεδιαστές ήχου μπορούν να κατευθύνουν συγκεκριμένα ηχητικά στοιχεία σε διαφορετικά σημεία του χώρου, ενισχύοντας την αίσθηση αυτού μέσω του ήχου [1].

1.3 Πώς το headphone theatre είχε αρχίσει να εξελίσσεται χωρίς όμως να αποτελεί trend

Κατά την προ-COVID-19 εποχή, το headphone theatre ήταν απλώς μία θεατρική τάση, η οποία βασιζόταν στο binaural audio και στις προσωπικές συσκευές ακρόασης για τη δημιουργία εμβυθιστικών και πιο προσωπικών εμπειριών για το κοινό [3]. Παρά την καινοτομία του, θεωρούνταν εξειδικευμένο και δεν είχε ακόμη αποκτήσει ευρεία έλξη στο κοινό του θεάτρου. Πρωταρχικός λόγος για το γεγονός αυτό αποτέλεσε ότι το παραδοσιακό θέατρο εξακολουθούσε να δίνει προτεραιότητα στις ζωντανές, κοινοτικές εμπειρίες, όπου το κοινό μοιράζονταν αντιδράσεις και βίωσε τον ήχο συνολικά μέσα στον χώρο. Η χρήση ακουστικών θεωρούνταν ότι μειώνει αυτή την κοινή σύνδεση, καθώς απομονώνει τα μέλη του κοινού και δημιουργεί πιο ατομικές εμπειρίες [1]. Επιπρόσθετα, οι υλικοτεχνικές απαιτήσεις τέτοιων παραστάσεων, καθώς και η προτίμηση αρκετών σχεδιαστών ήχου για πιο συμβατικές θεατρικές παραγωγές περιόρισαν περαιτέρω την ανάπτυξή του [1]. Το headphone theatre παρέμενε στην περιφέρεια του ευρύτερου θεατρικού τοπίου, περιμένοντας τις κατάλληλες συνθήκες για να έρθει στο προσκήνιο.

2. Η επίδραση του COVID-19 στον θεατρικό ήχο

Κατά τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19, η διακοπή των ζωντανών παραστάσεων ανάγκασε τη βιομηχανία του θεάτρου να μεταβεί γρήγορα στις ψηφιακές πλατφόρμες. Η μετάβαση αυτή στο online streaming και στο digital theatre άλλαξε σημαντικά τόσο τον τρόπο παραγωγής, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο το κοινό παρακολουθεί μία παράσταση

2.1. Μεταφορά του θεάτρου σε ψηφιακές πλατφόρμες

Ο σχεδιασμός ήχου έπρεπε να προσαρμοστεί σε αυτές τις νέες συνθήκες. Οι σχεδιαστές, λοιπόν έπρεπε τώρα να εξετάζουν τους τεχνικούς περιορισμούς και τις ευκαιρίες που πρόσφεραν τα ψηφιακά μέσα, διασφαλίζοντας ότι ο ήχος της κάθε παραγωγής ήταν καθαρός, καθηλωτικός και ελκυστικός για το κοινό που την παρακολουθούσε από το σπίτι [4].

Μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις την περίοδο αυτή, ήταν η έλλειψη ελέγχου στο περιβάλλον ακρόασης του κοινού. Σε αντίθεση με ένα θέατρο, όπου ο ήχος μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα, έχοντας γνώση της ακουστικής του χώρου και της δυνατότητας τοποθέτησης ηχείων, το κοινό, κατά τη διάρκεια των lockdown, βίωσε τις παραστάσεις μέσω ποικίλων συσκευών. Το γεγονός αυτό απαιτούσε από

τους σχεδιαστές να δημιουργήσουν ήχο, ο οποίος μπορούσε να λειτουργήσει σε πολλές πλατφόρμες και να προσφέρει μία ισχυρή εμπειρία ανεξάρτητα από την συσκευή που χρησιμοποιούσε ο ακροατής [5].

Επιπρόσθετα, η μετάβαση στις ψηφιακές πλατφόρμες επέτρεψε στους σχεδιαστές να πειραματιστούν με νέες μορφές διαδραστικών και συμμετοχικών εμπειριών ήχου. Σε ορισμένες παραγωγές, το κοινό κλήθηκε να χρησιμοποιήσει ακουστικά, για να βιώσει τρισδιάστατα ηχοτοπία που δημιουργήθηκαν με σκοπό να δώσουν την αίσθηση της φυσικής παρουσίας στον χώρο της παράστασης.

2.2. *Trend που αναπτύχθηκαν αυτήν την περίοδο*

Την περίοδο αυτή αναπτύχθηκαν νέες θεατρικές τάσεις. Μία από αυτές ήταν η χρήση τεχνικών ASMR (Autonomous Sensory Meridian Response). Το ASMR, το οποίο συνδέεται με την παραγωγή πολύ ήσυχων, λεπτομερών ήχων που συναρπάζουν τις αισθήσεις, διείσδυσε στο θέατρο κατά τη διάρκεια της πανδημίας. Οι ASMR τεχνικές προσαρμόστηκαν, για να δημιουργήσουν προσωπικές, εμπυθιστικές ηχητικές εμπειρίες που «απορροφούσαν» τους ακροατές μέσα στην παράσταση. Ψιθυριστές φωνές, απαλά ηχητικά εφέ και πολύ κοντινές ηχογραφήσεις χρησιμοποιούνταν για να προκαλέσουν μια αισθητηριακή σύνδεση μεταξύ του ακροατή και παράστασης [1].

Ταυτόχρονα, οι τεχνικές binaural audio αποτέλεσαν άλλη μία αξιοσημείωτη τάση. Η χρήση αυτής της τεχνικής επέτρεψε στους σχεδιαστές ήχου να αναδημιουργήσουν την αίσθηση του χώρου και της παρουσίας σε αυτόν, κάτι που ήταν ιδιαίτερα πολύτιμο την περίοδο που οι χώροι του φυσικού θεάτρου ήταν απρόσιτοι [3].

2.3. *Πώς το headphone theatre που είχε αρχίσει να αναπτύσσεται, ξαφνικά γίνεται trend*

Πριν από την πανδημία του COVID-19, το headphone theatre ήταν μια αναδυόμενη, αλλά εξειδικευμένη μορφή παράστασης, που λάμβανε χώρα κυρίως σε πειραματικές παραγωγές. Ωστόσο, όταν οι ζωντανές παραστάσεις διακόπηκαν λόγω της πανδημίας, το headphone theatre γρήγορα μετατράπηκε από ένα πειραματικό θεατρικό είδος σε μια ευρέως διαδεδομένη τάση. Η ξαφνική στροφή στις ψηφιακές πλατφόρμες και τις «απομακρυσμένες» παραστάσεις δημιούργησε τις ιδανικές συνθήκες για να ευδοκιμήσει, καθώς επέτρεψε στο κοινό να βιώσει εμπυθιστικές, και υψηλής ποιότητας ηχητικές παραστάσεις από την ασφάλεια του σπιτιού του [4].

Με τους ανθρώπους περιορισμένους στα σπίτια τους, απομονωμένους από τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις, το θέατρο ακουστικών δημιουργούσε μία ατμόσφαιρα, όπου ο ακροατής ένιωθε άμεσα εμπλεκόμενος με την παράσταση [5]. Η χρήση ακουστικών έκανε την εμπειρία πιο καθηλωτική, καθώς οι σχεδιαστές ήχου μπορούσαν να δημιουργήσουν εξαιρετικά λεπτομερή ηχοτοπία και μέσω αυτών να καθοδηγήσουν τους ακροατές, εντείνοντας τη συναισθηματική δέσμευση [1]. Επιπλέον, στην περίπτωση του headphone theatre, οι ακροατές παρατηρείται να λάτρεψαν τη δυνατότητα να ακούν μία παράσταση από οπουδήποτε - είτε στο σπίτι, είτε σε κάποιον χώρο της επιλογής τους. Αυτή η ευελιξία έκανε το θέατρο πιο προσιτό, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των φυσικών θεάτρων, και επιτρέποντας στις παραγωγές να προσεγγίσουν ένα ευρύτερο κοινό [4]. Η ευκολία του να μπορείς

να βυθιστεί σε μια παράσταση με προσωπικούς όρους, χωρίς να χρειάζεται να είσαι σ' ένα θέατρο, συνέβαλε στην ταχεία άνοδο της δημοτικότητας του headphone theatre. Ως αποτέλεσμα, εξελίχθηκε γρήγορα από ένα εξειδικευμένο πείραμα σε μία κυρίαρχη τάση, που αγκαλιάστηκε τόσο από καλλιτέχνες όσο και από το κοινό σε διάφορες χώρες, με κυρίαρχες το Ηνωμένο Βασίλειο και τις Η.Π.Α.

3. Μέτα-COVID εποχή

Στη μέτα-covid εποχή, πολλές θεατρικές παραγωγές έχουν ενσωματώσει τις τάσεις που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της πανδημίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει σε πολλές περιπτώσεις ένα μείγμα κλασικού θεάτρου και ψηφιακών στοιχείων.

3.1. Μίξη του «κλασικού» με ψηφιακά στοιχεία

Τα θέατρα, έχοντας προσαρμοστεί πλέον επαρκώς στον ψηφιακό σχεδιασμό, συνδυάζουν τις συμβατικές παραστάσεις με ψηφιακές καινοτομίες. Αυτές οι θεατρικές τεχνολογίες, που αρχικά αναπτύχθηκαν ως «λύση ανάγκης», τώρα ενσωματώνονται σε ζωντανές παραστάσεις, για να δημιουργήσουν πιο πλούσιες και εμπυθιστικές εμπειρίες [4]. Η χρήση των τεχνικών του headphone theatre, για παράδειγμα, συμβάλλει στη δημιουργία πολυεπίπεδων περιβαλλόντων ήχου που ενισχύουν τη σύνδεση του κοινού με την αφήγηση [5];[1]. Έτσι, το θέατρο έχει εξελιχθεί, για να προσφέρει μία πιο προσωποποιημένη και ευέλικτη εμπειρία για το κοινό.

Επιπρόσθετα, το headphone theatre συνέχισε να αναπτύσσεται ως δημοφιλής και καινοτόμος μορφή, που δεν περιορίζεται πλέον σε πειραματικές ή εξειδικευμένες παραγωγές. Έχει καθιερωθεί ως αυτόνομο μέσο, που έχει κερδίσει ευρύτερη αποδοχή, επιτρέποντας στις παραγωγές να προσεγγίζουν κοινό πέρα από τους παραδοσιακούς χώρους του θεάτρου.

3.2. Πως οι απαιτήσεις του κοινού έχουν αλλάξει γύρω από τον σχεδιασμό ήχου

Μετά την πανδημία, οι προσδοκίες του κοινού όσον αφορά τον ήχο στο θέατρο έχουν αλλάξει σημαντικά. Οι εμπυθιστικές και πιο προσωπικές ηχητικές εμπειρίες που πρόσφεραν μορφές θεάτρου, όπως το headphone theatre, κατά τη διάρκεια της πανδημίας, έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερη ζήτηση εξελιγμένων τεχνικών ήχου και ηχοτοπίων σε όλους τους τύπους θεατρικών παραγωγών. Το κοινό πλέον αναμένει τώρα πιο λεπτομερή, εμπυθιστικά ηχητικά περιβάλλοντα, είτε παρακολουθεί ζωντανές, είτε ψηφιακές παραστάσεις. Η ακρίβεια και η οικειότητα του binaural audio και των τρισδιάστατων ηχοτοπίων που έγιναν δημοφιλή κατά τη διάρκεια της πανδημίας έθεσαν ένα νέο πρότυπο για το τι προσδοκά το κοινό από τον θεατρικό ηχητικό σχεδιασμό [5].

3.3. Μελλοντικές τάσεις όπως VR και AR στο θέατρο, και ο ρόλος του ήχου στις τάσεις αυτές

Καθώς η εικονική (VR) και η επανζημένη (AR) πραγματικότητα εξελίσσονται διαρκώς, έχουν αρχίσει να ενσωματώνονται και στον χώρο του θεάτρου, ωθώντας τα όρια των ζωντανών παραστάσεων και της συμμετοχής του κοινού σε αυτές. Οι VR και AR τεχνολογίες επιτρέπουν εμπυθιστικές, πολύ-αισθητηριακές εμπειρίες, που μπορούν να ταξιδέψουν τους θεατές σε εντελώς νέους κόσμους, πολύ πιο μακριά από την σκηνή του θεάτρου. Ο σχεδιασμός του ήχου, λοιπόν, είναι και θα συνεχίσει να είναι κρίσιμος σε αυτές τις εξελίξεις, καθώς είναι απαραίτητος για τη δημιουργία ενός αληθοφανή και συναρπαστικού εικονικού κόσμου [5].

Συμπεράσματα

Η εξέλιξη του ηχητικού σχεδιασμού, από τις καινοτομίες της προ-COVID εποχής έως την άνοδο του headphone theatre, και AR και VR στον χώρο του θεάτρου, έχει επαναπροσδιορίσει τον τρόπο με τον οποίο το κοινό αλληλεπιδρά με μία παράσταση. Ο ήχος έχει μετατραπεί από υποστηρικτικό στοιχείο σε κινητήρια δύναμη για τη δημιουργία εμπυθιστικών, διαδραστικών εμπειριών. Καθώς το θέατρο συνεχίζει να αγκαλιάζει τις νέες τεχνολογίες, η περαιτέρω έρευνα σχετικά με τον αντίκτυπο των καθηλωτικών ηχοτοπίων και το μέλλον του υβριδικού θεάτρου θα είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση και τη διαμόρφωση των προσδοκιών του κοινού.

Αναφορές

- [1] D. Kaye and J. LeBrecht, *Sound and Music for the Theatre*, Focal Press, New York, pp 150-158 (2015).
- [2] G. McAuley, *Space in Performance: Making Meaning in the Theatre*, University of Michigan Press, Ann Arbor, pp 120-135 (2000).
- [3] B. Blesser and L. Salter, *Spaces Speak, Are You Listening? Experiencing Aural Architecture*, MIT Press, Cambridge, MA, pp 50-75 (2007).
- [4] N. Chapple, and A. Kattenbelt, «Augmented Reality and the Future of Performance» in *Proceedings of the Digital Theatrical Soundscapes Conference*, Cambridge University Press, pp 56-62 (2020).
- [5] G. McAuley, «The Role of Immersive Audio in Digital Performance» *J. Acoust. Soc. Am.* 127, pp 120-126 (2020).



Ηχητική Αποτύπωση Μαγνητικών Καταιγίδων με Στοχαστικές Τεχνικές Σύνθεσης

Χριστίνα Γεωργίου^{1*}, Αρετή Ανδρεοπούλου¹, Φιόρη-Αναστασία Μεταλληνού²,
Τηλέμαχος Μούσσας¹, Αναστασία Γεωργάκη¹

¹Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT),

Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Φιλοσοφική Σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

²Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Λόφος Νυμφών, Αθήνα

*christin@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία περιγράφει τη χρήση στοχαστικών τεχνικών σε συνδυασμό με την μικροπολυφωνία για την ηχοποίηση μαγνητικών καταιγίδων. Λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες εργασίες και τη μέχρι τώρα έρευνα που συνδέει το ευχάριστο αισθητικά αποτέλεσμα και την οικειότητα του ακροατή με την αποτελεσματικότητα της ηχοποίησης, σχεδιάστηκε ηχοποίηση δεδομένων δύο επιπέδων που περιγράφει το μοτίβο των καταιγίδων, επιχειρώντας να μεταφέρει στον ακροατή έννοιες όπως η διαταραχή και ο κίνδυνος. Η συνδυαστική χρήση ανεξάρτητων στοιχείων όπως το εύρος της μελωδικής γραμμής και η ρυθμική επιτάχυνση, σε συνδυασμό με τον μικροπολυφωνικό κανόνα σε διαδοχικά διαστήματα δευτέρας μικρής, δημιουργεί μια πυκνή ηχητική μάζα που αντανακλά την πολύπλοκη και έντονη φύση των καταιγίδων.

Sonification of Magnetic Storms with Stochastic Compositional Techniques

ABSTRACT

This paper explores applying stochastic techniques combined with micropolyphony to sonify magnetic storms. Building on previous research, which links aesthetic appeal and listener familiarity with the effectiveness of sonification, we developed a two-layer approach that illustrates storm patterns while evoking concepts such as disturbance and danger. The method integrates independent musical elements, including the range of the melodic line and rhythmic acceleration, with micropolyphonic canon on successive minor second intervals. The resulting dense sonic texture reflects magnetic storms' complex and intense nature.

Εισαγωγή

Η ηχοποίηση δεδομένων, η χρήση δηλαδή μη λεκτικού ήχου για τη μεταφορά πληροφορίας [2], παρά τη σχετικά σύντομη ιστορία της, αποδεικνύεται ένα χρήσιμο

εργαλείο για την προώθηση της επιστημονικής γνώσης, την ευαισθητοποίηση του κοινού σε νέα επιστημονικά δεδομένα, καθώς και την παροχή ίσων ευκαιριών πρόσβασης σε αυτά. [13, 15], γεγονός που αναδεικνύεται από την ανοδική τάση στη χρήση της σε ένα ευρύ φάσμα γνωστικών πεδίων. Ο ήχος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα ως μέσο αναπαράστασης επιτρέποντας την ταυτόχρονη αναπαραγωγή διαφόρων μεταβλητών, την αναγνώριση μοτίβων και την συμπύκνωση μεγάλων σετ δεδομένων σε λίγα λεπτά [2], πλεονεκτήματα που ενισχύονται από την ακρίβεια που χαρακτηρίζει την ανθρώπινη ακοή σε σχέση με την όραση [3].

Η χρήση του ήχου για τη μετάδοση πληροφοριών ή την περιγραφή όψεων του κόσμου έχει μια πλούσια προϊστορία [16, 17]. Η επιστημονική εξέλιξη ωστόσο κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα και οι νέες προοπτικές έφερε αυτή στη μουσική ως προς την επεξεργασία του ήχου και τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, θα θέσουν τα θεμέλια πάνω στα οποία θα χτιστεί η ηχοποίηση. Ο Ιάννης Ξενάκης αναδεικνύεται ως μια από τις σημαντικότερες προσωπικότητες αυτής της πρώιμης ιστορίας, φυτεύοντας σύμφωνα με τον Wotral [19] τον σπόρο για την αναπαράσταση των σχέσεων αφηρημένων δεδομένων στον ήχο για ερευνητικούς σκοπούς.

Η παρούσα εργασία αξιοποιεί στοιχεία από την στοχαστική του τεχνική [11] και συγκεκριμένα τη χρήση κατανομών πιθανοτήτων σε συνδυασμό με την υπέρθεση πολλών ανεξάρτητων φωνών που απαντάται στην μικροπολυφωνία του Ligeti [4, 12], προκειμένου να αποτυπώσει ηχητικά το φαινόμενο των μαγνητικών (γεωμαγνητικών) καταιγίδων (διαταραχών) [8], των διαταραχών δηλαδή του μαγνητικού πεδίου της Γης εξαιτίας της απελευθέρωσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τον Ήλιο. Οι δύο παραπάνω τεχνικές στοχεύουν στη δημιουργία πυκνών ηχητικών μαζών, που σε συνδυασμό με στοιχεία όπως η κινητικότητα και η διαφωνία διευκολύνουν τη σύνδεση του ακροατή με έννοιες που συνδέονται με το φαινόμενο όπως η διαταραχή ή ο κίνδυνος, ενισχύοντας ταυτόχρονα το αισθητικό αποτέλεσμα. Και τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά, σύμφωνα με ψυχοακουστικές μελέτες [6, 9] διευκολύνουν τη σύνδεση της αντίληψης του ακροατή με το φαινόμενο που ηχοποιείται.

Η ηχητική υφή που δημιουργείται, λειτουργεί ως ένα ηχητικό υπόβαθρο μέσα στο οποίο οι τιμές του Dst, του δείκτη δηλαδή που περιγράφει τις ωριαίες διακυμάνσεις του γήινου μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του Ισημερινού, αποτυπώνονται ηχητικά μέσω των μεταβολών του τονικού ύψους. Με αυτόν τον τρόπο μία μοναδική σειρά δεδομένων μεταφέρεται στο πεδίο του ήχου σε μία ηχοποίηση δύο επιπέδων που έχει ως στόχο να αναδείξει τόσο τα ποσοτικά όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φαινομένου, μια προσέγγιση που θα μπορούσε να αποδειχθεί χρήσιμη στην ηχοποίηση φαινομένων και σωμάτων από το πεδίο των διαστημικών επιστημών.

1. Ιστορικό Υπόβαθρο

Οι διαστημικές επιστήμες αποτελούν ένα δημοφιλές επιστημονικό πεδίο για τη δημιουργία ηχοποιήσεων, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια [20]. Αυτό, έρχεται ως αποτέλεσμα της ανάγκης για εξωστρέφεια ενός επιστημονικού πεδίου, που περιλαμβάνει μεγάλο όγκο δεδομένων και πολυδιάστατα φαινόμενα, πολλές φορές έξω από τις ανθρώπινες αισθήσεις λόγω μεγέθους ή απόστασης.

1.1 Ηλιακή δραστηριότητα και μαγνητικές καταιγίδες

Η χρήση του ήχου για την αποτύπωση των επιπτώσεων της ηλιακής δραστηριότητας στη Γη, ξεκινάει τριάντα περίπου χρόνια από την πρώτη επίσημη διατύπωση του όρου ηχοποίηση από τον Kramer. Συγκεκριμένα, το 1970 ο Charles Dodge μετά από αίτημα της NASA θα συνεργαστεί με τους επιστήμονες Boller, Unger και Frederick μετατρέποντας τις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου της Γης σε ήχο, δημιουργώντας το κομμάτι Erths's Magnetic Field [18,].

Οι ηχοποιήσεις που θα ακολουθήσουν,, περιλαμβάνουν παραδείγματα που εξυπηρετούν διερευνητικούς, επικοινωνιακούς και καλλιτεχνικούς σκοπούς. Μπορούμε να βρούμε επιστημονικά εργαλεία όπως το xSonify των Diaz-Merced κ. α. [5], ηχοποιήσεις που εστιάζουν στον διαμοιρασμό της επιστημονικής γνώσης σε ένα ευρύτερο κοινό όπως τα Sounds of Stereo του Πανεπιστημίου του Berkley, η διαδραστική εφαρμογή Hearing the Magnetic Storm [14] και το Auroral Borealis από το ντοκυμαντέρ Rhythms of the Universe του Ballora [1] και η διαδραστική εγκατάσταση για άτομα με προβλήματα όρασης Walk on the Sun [13] του Quinn

Η πλειονότητα των παραπάνω παραδειγμάτων κάνει χρήση της χαρτογράφησης παραμέτρων (parameter mapping) για τη μεταφορά των δεδομένων στο πεδίο του ήχου, εστιάζοντας κατά βάση σε ένα ηχητικό αποτέλεσμα που παραπέμπει στον απόκοσμο χαρακτήρα των φαινομένων που ηχοποιούνται σε μια προσπάθεια σύνδεσης του ακροατή με αυτά. Για τον ίδιο λόγο παρατηρείται η χρήση μεταφορών (π.χ. κόκκοι ήχου και σωματίδια), ενώ υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στο φυσικό μέγεθος που περιγράφεται και στη μουσική παράμετρο στην οποία αυτό ανατίθεται (π.χ. πυκνότητα ηλιακού ανέμου και πυκνότητα ήχου).

Τα παραπάνω, υποδεικνύουν μια προσπάθεια εξισορρόπησης της απουσίας προηγούμενης σύνδεσης του ακροατή μέσω της δημιουργίας ηχητικών εικόνων που θα μπορούσαν να θεωρηθούν οικείες, κάτι που σύμφωνα με ψυχοακουστικές μελέτες [6 9 15] βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της ηχοποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σχεδιάσαμε ένα σύστημα ηχοποίησης που περιγράφει το μοτίβο των μαγνητικών καταιγίδων σε διάφορες εντάσεις, επιδιώκοντας να συμπεριλάβουμε στοιχεία όπως ο κίνδυνος και η αναταραχή. Ο συνδυασμός της μικροπολυφωνίας και της στοχαστικής τεχνικής, δημιουργεί ένα ηχητικό υπόβαθρο που μεταφέρει νοητικά την εικόνα μιας καταιγίδας.

1.2 Μικροπολυφωνία και Στοχαστική Μουσική

Ο Clendinning [4] ορίζει τη μικροπολυφωνία ως μια πλούσια πολυεπίπεδη μουσική υφή που δημιουργείται από την υπέρθεση πολλαπλών μελωδικών γραμμών είτε με τη μορφή κανόνα (μικροκανονικές), είτε με αλληλοκαλυπτόμενα ρυθμικά μοτίβα (pattern meccanico).. Μια τρίτη κατηγορία προκύπτει από συνδυασμούς των δύο πρώτων.

Αν και η μικροπολυφωνία εμφανίζει μικρές παραλλαγές, η επιστημονική βιβλιογραφία προσδιορίζει τα βασικά της στοιχεία. Πρώτον, περιλαμβάνει αντιστικτικές τεχνικές όπως ο κανόνας και η μίμηση [12]. Δεύτερον, έχει ως αποτέλεσμα μια πυκνή ηχητική μάζα μέσα στην οποία οι μεμονωμένες γραμμές χάνουν τη ιδιαιτερότητά τους. Τέλος, κάθε φωνή έχει συγκεκριμένη μελωδική και ρυθμική δομή που είναι σχολαστικά συντεθειμένη με κάθε λεπτομέρεια.

Παρόμοια με τη μικροπολυφωνία, σύνθετες δομές μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας στοχαστικές διαδικασίες. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη θεωρία των πιθανοτήτων, ιδιαίτερα στον νόμο των μεγάλων αριθμών και στην τάση προς μια

σταθερή τιμή, κάτι που συσχετίζεται με την ελληνική λέξη *στόχος* [11]. Ο έλεγχος των ηχητικών μαζών που δημιουργούνται, γίνεται μέσω στοχαστικών διεργασιών που χρησιμοποιούν κατανομές πιθανοτήτων.

Η προσέγγισή μας συγχωνεύει τις δύο παραπάνω τεχνικές κάνοντας χρήση του μικροπολυφωνικού κανόνα και της υπέρθεσης των μελωδικών γραμμών, οι οποίες ωστόσο δεν δημιουργούνται από τον συνθέτη αλλά συνδέονται με τα δεδομένα μέσω κατανομών πιθανοτήτων. Η πυκνότητα της υφής που δημιουργείται και ο ρυθμός και η μελωδία της φωνής που δημιουργεί τον κανόνα, ελέγχονται από ζώνες τιμών αντίστοιχες με τις εντάσεις του φαινομένου.

2. Ηχοποίηση Μαγνητικών Καταιγίδων

2.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων World Data Center for Geomagnetism. Επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικές χρονικές περίοδοι από τις οποίες οι τέσσερις αντιστοιχούν σε καταιγίδες διαφορετικών εντάσεων από μέτριες έως ισχυρές και στις οποίες συμπεριλαμβάνεται η χαμηλότερη καταγεγραμμένη τιμή του δείκτη Dst και η μία σε ήρεμο διαστημικό καιρό, όπου δηλαδή δεν παρατηρείται κάποια διαταραχή. Η διάρκεια των παραπάνω περιόδων ποικίλει ανάλογα με την ένταση του φαινομένου από τέσσερις σε δέκα ημέρες προκειμένου να καλύψει όλες τις φάσεις του.

2.2 Στρατηγικές Ηχοποίησης

Η επιλογή των στρατηγικών της συγκεκριμένης ηχοποίησης έγινε με βάση τους παρακάτω στόχους: α) το σύστημα περιγράφει το μοτίβο του φαινομένου σε όλο το εύρος των καταγεγραμμένων τιμών, β) το μοτίβο της καταιγίδας να μπορεί να γίνει αντιληπτό από ακροατές χωρίς εξειδικευμένες επιστημονικές ή μουσικές γνώσεις, γ) το ηχητικό αποτέλεσμα να είναι ελκυστικό και να συνδέει τον ακροατή με έννοιες όπως η διαταραχή, η ρευστότητα και ο κίνδυνος. Βασικός μας στόχος είναι η απεικόνιση της έντασης των καταιγίδων και όχι η περιγραφή των τιμών του δείκτη που συνδέεται με αυτές. Καθώς ο τελευταίος λαμβάνει αρνητικές τιμές (εξασθένιση του μαγνητικού πεδίου), μετατρέψαμε τις τιμές αυτές σε θετικές (αύξηση της έντασης).

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκε μία ηχοποίηση δύο στρωμάτων, όπου στο πρώτο περιγράφεται η (συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα) κίνηση του δείκτη Dst και στο δεύτερο ένα ηχητικό περιβάλλον που στοχεύει να αναδείξει ποιοτικά στοιχεία των καταιγίδων. Το τελευταίο, χωρίζεται σε δύο επιμέρους λειτουργίες. Η πρώτη σχετίζεται με τις μικρότερες εντάσεις του φαινομένου (ασθενείς και μέτριες καταιγίδες) και η δεύτερη αναφέρεται σε ισχυρά φαινόμενα. Τα τελευταία καταλαμβάνουν ένα συγκριτικά μεγάλο εύρος τιμών που χρειαζόταν διαφορετικό χειρισμό προκειμένου να αποτυπωθεί αποτελεσματικά.

Το πρώτο επίπεδο της ηχοποίησης έχει ως στόχο να δώσει μια ξεκάθαρη εικόνα της μεταβολής των τιμών του δείκτη, διακριτή μέσα στο περιβάλλον που δημιουργεί το δεύτερο στρώμα της ηχοποίησης. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκε ένα πολύ συχνό

αποτελεσματικό αντιληπτικά ζεύγος αναθέσεων, ο συνδυασμός του τονικού ύψους και της έντασης.

Το δεύτερο επίπεδο προσομοιάζει αυτό που θα μπορούσε να περιγραφεί ως μουσική αισθητική, με την έννοια του ευχάριστου και του ελκυστικού [7]. Το επίπεδο αυτό στοχεύει σε ένα ηχητικό αποτέλεσμα δυναμικό και ρευστό που συνδέει τον ακροατή με τη νοητική εικόνα της μαγνητικής καταιγίδας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της διαφωνίας (διαταραχή, κίνδυνος), της διεύρυνσης της μελωδικής και ρυθμικής κίνησης (αναταραχή, πολυπλοκότητα) και της αύξησης της πυκνότητας του ήχου (ένταση φαινομένου).

2.3 Χαρτογράφηση

Η παρούσα ηχοποίηση χρησιμοποιεί την τεχνική χαρτογράφησης παραμέτρων (parameter mapping sonification), με τη χαρτογράφηση να πραγματοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους: πρώτον, συνδέοντας απευθείας τις τιμές των δεδομένων με τη μουσική παράμετρο μέσω μιας συγκεκριμένης κλίμακας και δεύτερον, διαιρώντας το συνολικό εύρος τιμών των δεδομένων σε μικρότερα τμήματα και συσχετίζοντας τα με συγκεκριμένες τιμές ή ζώνες τιμών των παραμέτρων του ήχου. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται στο πρώτο στρώμα της ηχοποίησης και η δεύτερη κατά κύριο λόγο στο δεύτερο.

Στο πρώτο επίπεδο οι 600 περίπου μονάδες Dst καλύπτουν ένα εύρος τριών οκτάβων και περίπου 15 dB. Το δεύτερο επίπεδο χωρίζεται σε δύο βασικές ζώνες που αντιστοιχούν στις δύο βασικές λειτουργίες με όριο την τιμή -100nT (ισχυρές καταιγίδες). Και οι δύο ζώνες χωρίζονται σε μικρότερες, που για την πρώτη λειτουργία οριοθετούνται από τις τιμές που διαχωρίζουν τα επίπεδα έντασης των καταιγίδων (-30nT, -50nT, -100nT) και για την δεύτερη σε ίσα κομμάτια με εύρος πενήντα μονάδων η καθεμία.

Κάθε μία από τις παραπάνω ζώνες τιμών, ενεργοποιεί λειτουργίες που σχετίζονται με τα διαθέσιμα προς επιλογή δείγματα ήχου, τη ρυθμική αξία που καθορίζει την εναλλαγή των παραπάνω δειγμάτων και του τονικού ύψους, το εύρος μέσα στο οποίο κινείται η μελωδική γραμμή και τη δημιουργία και εναλλαγή των διάφωνων συνηχήσεων όπως δείχνει ο Πίνακας 1 και περιγράφεται παρακάτω.

Πίνακας 1 Χαρτογράφηση με βάση τις ζώνες τιμών.

Ζώνες Τιμών	Ηχητικά Δείγματα	Κεντρική Αξία (ms)	Διακύμανση Τονικού ύψους (cents)	Διάστημα
> 0	2	9600	0	Ταυτοφωνία
[0,-30)	3	6400	75/ [-25,25]	3 ^η Μεγάλη
[-30, -50)	4	4800	125/ [-50,50]	3 ^η Μικρή
[-50, -100)	5	3600	225/ [-100,100]	2 ^η Μεγάλη

Ζώνες Τιμών	Ηχητικά Δείγματα	Κεντρική Αξία (ms)	Διακύμανση Τονικού ύψους (cents)	Διάστημα
[-100, -150)	6	2400	425/ [-200,200]	2 ^α Μικρή
[-150, -200)	6	1800	625/ [-300,300]	Κανόνας 1 φωνή
[-200, -250)	7	1200	825/ [-400,400]	Κανόνας 2 φωνές
[-250, -300)	7	900	1025/ [-500,500]	Κανόνας 3 φωνές
[-300, -350)	8	800	1225 [-600,600]	Κανόνας 4 φωνές
[-350, -400)	8	600	1425/ [-700,700]	Κανόνας 5 φωνές
[-400, -450)	9	400	1625/ [-800,800]	Κανόνας 6 φωνές
[-450, -500)	9	300	1825/ [-900, 900]	Κανόνας 7 φωνές
[500, 550)	9	200	2025/ [-1000,1000]	Κανόνας 8 φωνές
<= -550	9	150	2225/ [-1100,1100]	Κανόνας 8 φωνές

Η επιλογή ανάμεσα στα διαθέσιμα δείγματα ήχου είναι τυχαία. Υπάρχει ένα μέγιστο εννέα επιλογών κατανομημένων από το απλούστερο στο πιο σύνθετο δείγμα. Κάθε ζώνη τιμών μέχρι τα -400nT ενεργοποιεί μία επιπλέον επιλογή μέχρι το μέγιστο. Ο ρυθμός εναλλαγής καθορίζεται από μία κεντρική ρυθμική αξία που γίνεται μικρότερη (πιο γρήγορη εναλλαγή) για κάθε ζώνη τιμών που αντιστοιχεί σε υψηλότερο επίπεδο έντασης. Πιθανές επιλογές που αντιστοιχούν σε διπλάσια και μισή από την κεντρική αξία, όπως επίσης και σε αξίες τρίηχου και παρεστιγμένου, Το εύρος του τονικού ύψους κινείται σε 88 βήματα που αντιστοιχούν σε 11 ημιτόνια (1100 cent) προς τα πάνω και προς τα κάτω. Τέλος για κάθε ζώνη τιμών πάνω από τα -100nT, η μελωδική γραμμή διπλασιάζεται σε διαδοχικά αρμονικά διαστήματα αυξημένης διαφωνίας (από τρίτη μεγάλη έως δευτέρα μικρή). Για χαμηλότερες τιμές μια νέα φωνή σε διάστημα δευτέρας μικρής προστίθεται σε μορφή κανόνα αυξάνοντας την πυκνότητα του ήχου.

Ηχητικά παραδείγματα είναι διαθέσιμα στον παρακάτω σύνδεσμο.

<https://drive.google.com/drive/folders/1VA3Q0xPir99CHHglKiYme3Fo2AKIVd7A?usp=sharing>

3. Συμπεράσματα

Το σύστημα που περιεγράφηκε παραπάνω δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από καταγίδες διαφορετικών εντάσεων και λειτουργεί αποτελεσματικά για

όλες τις καταγεγραμμένες τιμές του Dst. Οι επιμέρους επιλογές δρουν συνεργατικά και φαίνεται να ενισχύουν ακουστικά την περιγραφή της έντασης των συμβάντων καθώς και το αισθητικό αποτέλεσμα της ηχοποίησης. Για τις καταιγίδες μικρότερης έντασης (ασθενείς και μέτριες), το δεύτερο επίπεδο δημιουργεί ένα ρευστό υπόβαθρο που αυξάνει σε κινητικότητα όσο το φαινόμενο εντείνεται, αφήνοντας ακουστικό περιθώριο για να γίνει αντιληπτή η κίνηση του δείκτη μέσω της μεταβολής του τονικού ύψους. Για τις ισχυρές καταιγίδες, η πύκνωση του ηχητικού υλικού που προκαλεί ο μικροπολυφωνικός κανόνας ενισχύει την αναταραχή μέσω ασύμφωνων διαστημάτων και της διαδοχικής εισόδου φωνών, με μειωμένα χρονικά διαστήματα δημιουργώντας μια αίσθηση που μπορεί να γίνει αντιληπτή ως επιτάχυνση, με την μελωδική κίνηση του δείκτη να είναι ξεκάθαρη εξαιτίας της απότομης πτώσης του. Η συγκεκριμένη επιλογή φαίνεται ότι θα μπορούσε υπό προϋποθέσεις να λειτουργήσει και ως ανεξάρτητη πηγή πληροφορίας.

Η αξιολόγηση των παραπάνω επιλογών στο πλαίσιο της περαιτέρω έρευνας, θα πρόσφερε χρήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητά τους σε σχέση με τον ακροατή. Και οι δύο τεχνικές παρέχουν αρκετές δυνατότητες, όπως το συχνотικό εύρος της ηχητικής μάζας ή τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις εισόδους των φωνών που θα μπορούσαν να διερευνηθούν για τη δημιουργία ηχοποιήσεων που αποσκοπούν στην πληροφόρηση ή τη μουσική δημιουργία.

4. Αναφορές

- [1] Ballora M., «Sonification Strategies for the Film Rhythms of the Universe». *Presented at the 20th International Conference on Auditory Display (ICAD2014)*, (2014)
- [2] Barrass S. & Kramer G., «Using sonification», *Multimedia Systems* 7, 23–31 (1999)
- [3] Chion, M., *Audio-Vision : Sound on Screen*. New York: Columbia University Press, (1994).
- [4] Clendinning J. P. «Contrapuntal techniques in the music of Gyorgy Ligeti», PhD Thesis, Yale University (1989)
- [5] Diaz-Merced W. L. et al. «Sonification of Astronomical Data» *Proceedings of the International Astronomical Union* 7, 133–136. (2011)
- [6] Ferguson J. & Brewster S. A., «Investigating Perceptual Congruence between Data and Display Dimensions in Sonification» In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 611, 1–9. (2018)
- [7] Godt I., «Music: A Practical Definition. » *The Musical Times* 146, no. 1890 (2005)
- [8] Gonzalez W. D. et al. «What is a geomagnetic storm?» *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 99, A4 5771–5792, (1994),
- [9] Lăpușteanu A. et al. «A review of Sonification Solutions in Assistive Systems for visually impaired people». *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* 1–16. (2024)
- [10] Lindborg P., Lenzi S., & Chen M., «Climate data sonification and visualization: An analysis of topics, aesthetics, and characteristics in 32 recent projects» *Frontiers in Psychology* 13 (2023).

- [11] Luque S., «The stochastic synthesis of Iannis Xenakis» *Leonardo Music Journal* **19**, 77–84 (2009)
- [12] Mayville S., «The Compositional Techniques and Influences behind Ligeti's Atmosphères» *Intermezzo* **1**, 30-38 (2014)
- [13] Quinn M., «Walk on the Sun: An interactive image sonification exhibit» *AI & SOCIETY* **27**, 2 303–305. (2011)
- [14] Rovithis E., «Hearing the Magnetic Storm». *SOUNDCLOUD* (2019)
- [15] Ronnberg N., «Musical Elements in Sonification Support Visual Perception». *In Proceedings of the 31st European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 114–117 (2019)
- [16] Straebel V., «The Sonification Metaphor in Instrumental Music and Sonification's Romantic Implications». *Proceedings of the 16th International Conference on Auditory Display (ICAD2010)*, Ed. Eoin Brazil. International Community for Auditory Display, (2010).
- [17] Taylor S., «From Program Music to Sonification: Representation and the Evolution of Music and Language» *Presented at the 23rd International Conference on Auditory Display (ICAD2017)*, (2017)
- [18] Thieberger Ed M. & Dodge C., «An interview with Charles Dodge». *Computer Music Journal* **19**, 1 (1995),
- [19] David Worrall, «Sonification: A Prehistory». *Presented at the 24th International Conference on Auditory Display (ICAD2018)* (2018)
- [20] Zanella A. et al. «Sonification and Sound Design for Astronomy Research, education and public engagement» *Nature Astronomy* **6**, **11** (1241–1248 (2022)



Πρώιμες ενδείξεις συνειδητής διαχείρισης της ηχητικής χωρικότητας στην αρχαιοελληνική τραγωδία και κωμωδία

Στέφανος Ζάγκος, Αρετή Ανδρεοπούλου*
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT),
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*a.andreopoulou@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τις απαρχές της χωρικής διαχείρισης του ήχου ως καλλιτεχνικό εργαλείο στην αρχαία ελληνική τραγωδία και κωμωδία, αντλώντας πληροφορίες από «κρυμμένες σκηνικές οδηγίες» και ενδείξεις που απορρέουν από τον λόγο των ηρώων στα πρωτότυπα κείμενα. Στόχος της είναι να εντοπίσει τη στιγμή που ο ήχος απέκτησε χωρική διάσταση και χρησιμοποιήθηκε συνειδητά από τους δημιουργούς της εποχής για την ενίσχυση της δραματικής έκφρασης. Η ανάλυση οργανώνεται σε τρεις άξονες: α) κίνηση του Χορού στη σκηνή και διάλογος με έναν ή δύο υποκριτές, β) χρήση μηχανών και θεϊκή επιφάνεια, και γ) χρήση βοηθητικού Χορού και χωρισμός του Χορού σε ημιχόρια. Η ανάλυση βασίζεται σε παραδείγματα από τα έργα «Νεφέλες» του Αριστοφάνη, «Ευμενίδες» του Αισχύλου και «Εκάβη» του Ευριπίδη, τα οποία επιλέχθηκαν για την ικανότητά τους να καλύπτουν τα κριτήρια αυτών των αξόνων, αποτελώντας ισχυρή ένδειξη ότι ήδη από εκείνη την εποχή η ηχητική χωρικότητα αποτελούσε στοιχείο συνειδητής καλλιτεχνικής επιλογής στα χέρια των δημιουργών.

Early evidence of the intentional use of sound spatiality in ancient Greek tragedies and comedies

ABSTRACT

This paper explores the origins of the use of sound spatialization as an artistic tool in ancient Greek tragedies and comedies, extracting information from "hidden stage directions" and clues derived directly from the original texts. Its aim is to identify the moment when sound spatialization became a conscious choice of the creators as a means of enhancing dramatic expression. The analysis is organized along three axes: a) movement of the Chorus on stage and dialogue with one or two actors, b) use of machines and divine surface, and c) use of an auxiliary Chorus and division of the Chorus into semi-choruses. The analysis is based on Aristophanes' "Nephelai" (the Clouds), Aeschylus' "Eumenides" and Euripides' "Hecuba", which were chosen for their ability to meet the criteria of the above axes, providing strong evidence that even at that time sound spatialization was an element of conscious artistic choice in the hands of the creators.

Εισαγωγή

Ο ήχος είναι από τη φύση του χωρικός και τρισδιάστατος. Κάθε πηγή έπειτα από διέγερσή εκπέμπει ηχητική ενέργεια δημιουργώντας χαρακτηριστικά μοτίβα τα οποία εξαρτώνται από τις κατευθυντικές της ιδιότητες. Η ηχητική ενέργεια διαδίδεται στον χώρο αλληλεπιδρώντας ποικιλοτρόπως με τις επιφάνειες που θα συναντήσει, και φτάνει στον εκάστοτε δέκτη φέροντας πληροφορίες χωρικότητας [20]. Η ικανότητα του ανθρώπου να αντιλαμβάνεται την ηχητική πληροφορία χωρικά αξιοποιείται καλλιτεχνικά εδώ και αιώνες. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία ο πρώτος χωρικός διαχωρισμός ηχητικών πηγών τοποθετείται είτε στα παλαιοχριστιανικά χρόνια με τη χρήση αντιφωνιών στη λατρευτική μουσική, είτε, συχνότερα, στην Αναγέννηση, με την εμφάνιση των πρώτων φωνητικών έργων για διπλή χορωδία [11]. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να τοποθετήσει τις απαρχές της χωρικής διαχείρισης του ήχου ως καλλιτεχνικό εργαλείο αρκετούς αιώνες νωρίτερα, ξεκινώντας από τους ραψωδούς, τον διθύραμβο και λοιπές παραστάσεις πρωτόγονου θεατρικού χαρακτήρα που εκτελούνταν από σατύρους και καταλήγοντας στην αρχαιοελληνική τραγωδία και κωμωδία. Στόχος είναι να διερευνηθεί η στιγμή που αυτή η φυσική ιδιότητα του ήχου μετατράπηκε σε συνειδητή καλλιτεχνική επιλογή και εργαλείο στα χέρια του δημιουργού, αναζητώντας ενδείξεις και μαρτυρίες για την ύπαρξή της σε κρυμμένες “σκηνικές οδηγίες” όπως υπάρχουν στα πρωτότυπα κείμενα των αρχαίων έργων.

1. Ιστορική Αναδρομή

1.2 Αοιδοί και Ραψωδοί

Ο προβληματισμός για τη διαχείριση του ήχου στην αρχαία δραματουργία ξεκινά ήδη από τα χρόνια των αοιδών και των ραψωδών. Οι δημιουργοί αυτοί ήταν αφηγητές ηρωικών ιστοριών σε ακροατήριο. Οι αοιδοί τραγουδούσαν τα έπη με τη συνοδεία της φόρμιγγας ενώ οι ραψωδοί μόνο απήγγειλαν, χωρίς την ύπαρξη μουσικής συνοδείας. Η τέχνη των αοιδών κρινόταν με βάση την ικανότητά τους να διαμορφώνουν οι ίδιοι τη ροή των επεισοδίων και των γεγονότων στην αφήγησή τους, αξιοποιώντας τυποποιημένα μοτίβα (η υποδοχή και φιλοξενία ξένων, η προετοιμασία ενός γεύματος, οι ετοιμασίες για μάχη) [16, 19]. Μπορούσαν επίσης να διαλέξουν ποια μέρη της ιστορίας θα παραληφθούν, ποια θα τονιστούν ιδιαίτερω, ή ακόμη και με ποια σειρά θα τα διηγηθούν ή αν θα κάνουν επαναλήψεις. Σε αντίθεση με τους αοιδούς, οι ραψωδοί έπρεπε να μεταφέρουν στο κοινό την ιστορία από μνήμης, όπως είχε καθιερωθεί καιρό πριν από αυτούς, με πολύ μικρότερο περιθώριο ελευθερίας στη διαμόρφωση της ροής της ιστορίας. Για τους ραψωδούς υπήρχαν συντεχνίες (οργανωμένα καλλιτεχνικά σωματεία) και αγώνες και συχνά ταξίδευα στη χώρα για να διηγηθούν τις ιστορίες τους. Δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι κατά την αφήγησή τους τόσο οι αοιδοί όσο και οι ραψωδοί κινούνταν στον χώρο. Η παρουσίασή τους ήταν πιθανώς αρκετά στατική.

1.2 Διθύραμβος

Η διαλεκτική της μουσικής με την παράμετρο του χώρου μαρτυρείται για πρώτη φορά στον διθύραμβο, το παλαιότερο λατρευτικό άσμα του Διονύσου. Συνήθως, οι διθύραμβοι ψάλλονταν το απόγευμα της 1^{ης} ημέρας των διαγωνισμών, στο πλαίσιο του εορτασμού των Μεγάλων Διονυσίων. Ο καθηγητής Ανδρέας Μαρκαντωνάτος, στο μελέτημα του με θέμα τη θέση της θρησκείας στην τραγωδία και πόσο αυτή την καθορίζει ή όχι συνδέει και συσχετίζει το διθύραμβικό ύμνο με την πομπή κατά την τελετή του ξενισμού όταν οι Αθηναίοι υποδέχθηκαν για πρώτη φορά το άγαλμα του Διονύσου Ελευθερέα [17]. Ως μορφή διαδόθηκε από τους λαούς της Θράκης και της Φρυγίας, μέσω της Κορίνθου. Επομένως, η προέλευσή του είναι μάλλον ασιατική. Οι επιστήμονες διαφωνούν, όσον αφορά την ετυμολογία του όρου. Η πλειοψηφία βλέπει τη συγγένεια του διθύραμβου προς άλλες λέξεις ως προς το πρόσφυμα – αμβ, που σημαίνει, το βήμα, το ρυθμό, τη ρυθμική κίνηση, όπως: θρίαμβος, ίαμβος, χορίαμβος, άμβωνας, αμβλεία, άμβλωση. Κατά τα άλλα η ρίζα του ονόματος παραμένει άγνωστη [2, 9]. Υπάρχει ωστόσο μια δόκιμη θεωρία που ερμηνεύει ως δις-θύρα –αμβ –ος, δηλαδή, “ο βαίνων από δύο πόρτες”. Έτσι, ο διθύραμβος παραπέμπει στον Διόνυσο, ο οποίος κατά μια σειρά μυθικών παραδόσεων γεννήθηκε δύο φορές: α) από το μηρό του Δία και β) από την Σεμέλη [2].

Τον Χορό πιστεύεται ότι συγκροτούσαν πενήντα άνδρες που ορχούνταν και τραγουδούσαν κυκλικά [6]. Ο Αρχίλοχος ο Πάριος χρονολογεί τον διθύραμβο ήδη από το πρώτο μισό του 7ου π.Χ. αιώνα αναφωνώντας: “ὡς Διονύσου ἄνακτος καλὸν ἐξάρξαι μέλος οἶδα διθύραμβον οἶνῳ συγκεραυνωθείς φρένας”. Κατά τον Richard Schechner τα άσματα προς τιμήν του Διονύσου είναι μια μορφή επιτέλεσης στην οποία τα όρια μεταξύ θεατή και τέλεσης υπάρχουν επειδή ο διθύραμβος συνδυάζει το processional mode (πομπική κατάσταση) με το narrative mode (αφηγηματική λειτουργία) [14]. Στην αριστοτελική Ποιητική βρίσκει κανείς τη φράση “ἀπὸ τῶν ἐξαρχόντων τὸν διθύραμβον”, η οποία αναφέρεται στη δραματική αντιπαράθεση μεταξύ του χορού και του πρώτου τραγουδιστή. Αυτή η αντιπαράθεση εκφράζεται και μέσω του διαχωρισμού στον χώρο. Δεν είναι απολύτως ξεκάθαρο πότε απομακρύνθηκε και διαχωρίστηκε ο πρώτος τραγουδιστής από την ομάδα του χορού. Η χρονολογία 534 π.Χ. είναι κατά τον Lesky ανακριβής. Πρόκειται για τη χρονολογία που συνήθως εμφανίζεται ως ο χρόνος έναρξης της προκλασικής τραγωδίας, στην οποία ο Θέσπης φέροντας στο προσκήνιο ένα μέλος του χορού σε ρόλο υποκριτή θέτει τις βάσεις της τραγωδίας των κλασικών χρόνων. Ο “άρχοντας του Χορού” απαγγέλει μεγαλύτερο μέρος του κειμένου και ανάγεται σε πρωταγωνιστή [7, 3, 10].

2. Μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ευρύτερης έρευνας η οποία αναζητά παραδείγματα συνειδητής καλλιτεχνικής αξιοποίησης και διαχείρισης των χωρικών ιδιοτήτων του ήχου στα σωζόμενα κείμενα των αρχαιοελληνικών τραγωδιών και κωμωδιών. Η ανάλυση πραγματοποιείται με βάση τρεις άξονες, σε μια προσπάθεια να αναδειχθούν δυναμικά παραδείγματα χωρικότητας είτε ως “κρυμμένες σκηνικές οδηγίες” του ποιητή, είτε ως παραθέματα από τον λόγο των ηρώων. Οι άξονες αυτοί, οι οποίοι εκφράζουν διαφορετικές σχέσεις μεταξύ της κίνησης των

υποκριτών στον χώρο και της κατεύθυνσης του ήχου σε συγχρονία, είναι οι ακόλουθοι:

1. *Κίνηση του Χορού στη σκηνή - διάλογος με έναν ή δύο υποκριτές*: ο άξονας αφορά ηχητικές πηγές που πλησιάζουν, απομακρύνονται και αλλάζουν κατεύθυνση, όταν ο ηθοποιός αποκόπτεται από το σύνολο και κινείται στον χώρο. Η εφαρμογή του εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στις Παρόδους και τις Εξόδους του Χορού, κατά τις οποίες συχνά φεύγει χωρισμένος, από διαφορετικά σημεία. Περιλαμβάνει επίσης παραδείγματα όπου δύο πρόσωπα διαλέγονται στίχο προς στίχο ή σε ημιστίχια (*στιχομωθία* ή *αντιλαβή*, *αντίστοιχα*), καθώς και θρηνητικές ή μη εναλλαγές μεταξύ του Χορού και ενός ή δύο το πολύ προσώπων (*κομμός* ή *αμοιβαία*, *αντίστοιχα*) [15]. Ειδική αναφορά γίνεται επίσης στις *παρακαταλογές*, οι οποίες εμφανίζονται στην τραγωδία. Πρόκειται για σημεία όπου ο αυλός συνοδεύει μη αδόμενα και μη λυρικά μέρη [6].
2. *Χρήση μηχανών και θεϊκή επιφάνεια*: ο άξονας αυτός εξετάζει την εμφάνιση θεϊκών προσώπων με τη χρήση “μηχανής”, δηλαδή ενός γερανού πρώιμου τύπου, η οποία επέτρεπε στους ηθοποιούς που ερμήνευαν τον ρόλο θεότητας να ανυψώνονται στον χώρο. Στην αρχαία δραματουργία οι θεοί στέκονταν σε σχετική απόσταση από αυτούς στους οποίους απευθύνονταν. Με τον τρόπο αυτόν εξασφάλιζαν συνολική εποπτεία των γεγονότων παραμένοντας, παράλληλα, αποστασιοποιημένοι από τη δράση.
3. *Χρήση βοηθητικού Χορού - χωρισμός του Χορού σε ημιχόρια*: ο άξονας αυτός εξετάζει τις καταγεγραμμένες περιπτώσεις κατά τις οποίες η δραματική λειτουργία του Χορού ενισχύεται με την παρουσία ενός δεύτερου συνόλου (*παραχορήγημα*). Ειδική περίπτωση αποτελούν είτε η διάσπαση του κύριου Χορού σε δύο ομάδες (*ημιχόρια*) είτε οι *μεταστάσεις* του, κατά τις οποίες έφευγε όλη η ομάδα από τη σκηνή και ξαναγύρισε μετά από αρκετούς στίχους με *αναπαίστους*. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις μελετάται η συνύπαρξη και η αλληλεπίδραση δύο αυτοδύναμων/αυτόνομων ηχητικών πηγών επί σκηνής.

Η παρούσα εργασία θα περιοριστεί στην άντληση παραδειγμάτων από τα παρακάτω έργα τρία προκειμένου να αναδείξει με ευσύνοπτο τρόπο το αντικείμενο μελέτης: *Νεφέλες*, *Ευμενίδες* και *Εκάβη*. Τα πρώτα δύο κείμενα επιλέχθηκαν καθώς ανταποκρίνονται στα κριτήρια και των τριών αξόνων, ενώ η *Εκάβη* πληροί ικανοποιητικά τον πρώτο και τον δεύτερο από αυτούς.

3. Σύντομη παρουσίαση των έργων

3.1 Νεφέλες

Η κωμωδία *Νεφέλες* διδάχτηκε το 423 π.Χ. από τον Αριστοφάνη. Πρόκειται για το 3^ο κατά σειρά σωζόμενο έργο του ποιητή. Όταν ο Αριστοφάνης αγωνίστηκε στα Εν Άστει Διόνυσια με το εν λόγω έργο κέρδισε το τρίτο βραβείο. Την χρονιά εκείνη νίκησαν ο Κρατίνος με την *Πυτίνη* και ο Αμειψίας με τον *Κώννο*. Από την 5^η και την 6^η ΥΠΟΘΕΣΙ προκύπτει ότι η κωμωδία που σώζεται σήμερα είναι αναθεώρηση του πρώτου έργου. Ο ποιητής την έδωσε ως κείμενο (επί άρχοντος Αμεινία) χωρίς να παρασταθεί [1, 4].

Στην κωμωδία αυτή (423 π.Χ.), ένας λαϊκός αγρότης, ο Στρεψιάδης προσπαθεί μάταια να απομακρύνει τον γιο του Φειδιππίδη από τον ιππόδρομο. Αποφασίζει να τον στείλει στη σχολή του Σωκράτη. Εκεί θα διδαχθεί τον άδικο λόγο απαλλάσσοντάς τον από τους δανειστές που ζητούν επίμονα τα χρήματά τους. Ο Φειδιππίδης πράγματι πετυχαίνει. Σύντομα όμως, ο Στρεψιάδης δεν αναγνωρίζει το γιο του, αφού με τα επιχειρήματα που έμαθε φτάνει να πει ότι δεν είναι άσχημο να τιμωρεί το παιδί τον γονιό του. Στο εξής θα χτυπά και τη μητέρα του! Απελπισμένος ζητά βοήθεια από τον Ερμή και τις Νεφέλες αλλά είναι ήδη αργά! Ο Χορός κλείνει το έργο με παραινέσεις στους θεατές.

3.2 *Ευμενίδες*

Πρόκειται για το τελευταίο έργο της τριλογίας της *Ορέστειας* του Αισχύλου. Η τριλογία διδάχθηκε το 458 π.Χ. [7]. Δηγείται ιστορίες του Οίκου των Ατρείδων. Αποτελείται επίσης από τις τραγωδίες *Αγαμέμνων* και *Χοηφόροι* (γυναίκες που φέρουν χοές για την τιμή των νεκρών). Ως προς τη διήγησή τους είναι συμπληρωματικές. Η πρώτη τραγωδία αφηγείται την επιστροφή του βασιλιά, νικητή από την εκστρατεία στην Τροία. Ο Αγαμέμνων έφερε ως βραβείο την Κασσάνδρα. Αυτό το γεγονός εξαγρίωσε την Κλυταιμνήστρα, η οποία τον σκοτώνει για να εκδικηθεί τον φόνο της Πολυξένης. Στη συνέχεια δολοφονεί και την παλλακίδα. Ο Χορός προειδοποιεί ότι ο Ορέστης μπορεί να επιχειρήσει να φέρει τη δικαιοσύνη. Στη δεύτερη τραγωδία εμφανίζεται ο Ορέστης. Η υπόθεση περιστρέφεται γύρω από τη σύλληψη και την υλοποίηση της ιδέας να δολοφονήσει τον Αίγισθο και την Κλυταιμνήστρα. Με την πράξη του αυτή γίνεται πλέον ένας κοινός φονιάς που του πρέπει η τιμωρία.

Στις *Ευμενίδες*, ο Ορέστης έχει σκοτώσει τη μητέρα του με εντολή του Λοξία. Το πνεύμα της Κλυταιμνήστρας νιώθοντας ότι ο Ορέστης μένει ατιμώρητος για τη δολοφονία της και ζητώντας εκδίκηση καλεί τις θεές του σκότους, τις Ερινύες, να τον καταδιώκουν για πάντα, κατηγορώντας τις ότι παραμένουν αμέτοχες στην αδικία. Ο Ορέστης καταφεύγει ικέτης στο ναό του Απόλλωνα, ο οποίος στέλνει τον Ερμή για να τον προστατεύει. Όμως η Ερινύες είναι ατρόμητες και συνεχίζουν να τον κυνηγούν. Αναζητά άσυλο στο άγαλμα της Αθηνάς, όπου βρίσκει την κάθαρση για τη μητροκτονία και τον φόνο του Αίγισθου [7].

3.3 *Εκάβη*

Η τραγωδία παρουσιάστηκε το 427 π.Χ. Έχει σαφή διάρθρωση σε δύο τμήματα. Το πρώτο μέρος καλύπτει η απόφαση να θυσιαστεί η θυγατέρα της Εκάβης, Πολυξένη, κατ' απαίτηση του Αχιλλέα. Κυριαρχούν, η εναγώνια προετοιμασία για τη θυσία από τη μια και η ελπίδα μιας δικαιότερης τύχης για τη νέα από την άλλη [8]. Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στην εκδίκηση της Εκάβης προς τον Πολυμήστορα. Ο άρχοντας της Θράκης σκότωσε τον γιο της, Πολύδωρο θέλοντας να αρπάξει το χρυσάφι που κληρονόμησε από τον πατέρα του – τον Πρίαμο. Το δράμα ολοκληρώνεται προβάλλοντας το αβέβαιο μέλλον της ηρώιδας.

4. Ανάλυση

Όπως ορίζεται στη μεθοδολογία, ο πρώτος άξονας χαρακτηρίζεται από την κίνηση της δωδεκαμελούς ομάδας του Χορού στον σκηνικό χώρο. Συνεπώς, ο παραγόμενος ήχος στο πλαίσιο αυτό μπορεί να ερμηνευθεί με όρους χωρικότητας, καθώς μαζί με τη σωματική κίνηση του Χορού πραγματοποιείται επίσης μετακίνηση της πηγής του ήχου στον χώρο. Άλλοτε ο ήχος εναλλάσσεται ανάμεσα στον Κορυφαίο και τα μέλη του Χορού και άλλοτε αντιπαράτίθεται προς μια δεύτερη (εν μέρει μεταβλητή) ηχητική πηγή: τους υποκριτές, με τους οποίους συνδιαλέγεται η ομάδα του Χορού. Ένα παράδειγμα υλοποίησης του πρώτου άξονα εκφράζεται στις *Νεφέλες* κατά την είσοδο του Χορού, όταν ο Σωκράτης ρωτά: “*Ἡσθον φωνῆς ἄμα καὶ βροντῆς μυκησαμένης θεοσέπτου*”; Στο σημείο αυτό καθίσταται φανερό ότι οι *Νεφέλες* εισέρχονται στη σκηνή με θεική βροντή. Ο δεύτερος άξονας, ο οποίος μεταξύ άλλων μελετά τη χρήση των σκηνικών μηχανών εντοπίζεται επίσης στο έργο αυτό. Ωστόσο, η μηχανή δεν χρησιμοποιείται για να εμφανίσει κάποιον θεό αλλά τον φιλόσοφο Σωκράτη, ο οποίος πλησιάζει αιωρούμενος στο κάλεσμα του Στρεψιάδη (στ. 235). Ο τελευταίος άξονας, που αφορά στη χρήση παράλληλου (βοηθητικού) Χορού καλύπτεται από τους μαθητές του Σωκράτη. Μια ομάδα εμφανώς διακριτή στην κωμωδία, με σαφώς ορισμένο το πότε και το ποιος από αυτούς ομιλεί κάθε φορά.

Στις *Ευμενίδες*, οι άξονες έχουν ως εξής: ο πρώτος εφαρμόζεται στον άτακτο χορό των Ερινύων καθώς κατατρέχουν τον Ορέστη. Το “ξύπνημα” του ειδώλου της Κλυταιμνήστρας χαρακτηρίζει τον δεύτερο άξονα ενώ ο τρίτος αναγνωρίζεται πέρα από την πομπή των θεραπεινίδων της Πυθίας και από τη *μετάσταση* του Χορού των στίχων 179-197 και 213-234. Στο μεσοδιάστημα, ο Χορός εγκαταλείπει τη σκηνή και επιστρέφει (έχοντας κατά σύμβαση διανύσει μεγάλη γεωγραφική απόσταση). Είναι σημαντικό ότι πριν από το επεισόδιο της δίκης, διακρίνεται «πολυφωνία» ηχητικών πηγών [12]: Στην έναρξη του Τρίτου Επεισοδίου (στίχοι 397-435) δεσπόζουν οι φωνές της Αθηνάς και του Χορού. Στους στίχους 436-488 της Αθηνάς και του κατάδικου. Κατά τη διάρκεια του Τέταρτου Επεισοδίου (στίχοι 566-613) συνυπάρχουν η Αθηνά, ο Απόλλων, ο Χορός και ο Ορέστης. Οι στίχοι 614-643 δείχνουν την πορεία προς τη σύγκρουση του Απόλλωνα με τις Ερινύες. Στο χωρίο 644-673 αγγίζει την ακρόατη όξυνση ενώ η θεά της σοφίας επεμβαίνει από τον στίχο 674 ως τον στίχο 710. Από τον στίχο 711 μέχρι τον στίχο 733 υπάρχει η διένεξη ανάμεσα στην Αθηνά, τον Απόλλωνα και τον Χορό. Ο Ορέστης ακούγεται και πάλι στους στίχους 734-777. Η οριστική κατάπαυση της έχθρας με τους Θεούς, που επισφραγίζεται μέσω της φιλίας με την Παλλάδα φτάνει επιτέλους στην Έξοδο του δράματος (στίχοι 1021-1047) [12, 13].

Στην *Εκάβη*, ο κομμός καθώς η μητέρα βλέπει σαστισμένη το πτώμα του παιδιού της στην αρχή του Τρίτου Επεισοδίου εντάσσεται στον πρώτο άξονα. Αντίθετα, ο πρόλογος, που απαγγέλλεται από τον Πολύδωρο νεκρό αποτελεί καίρια έκφραση του δεύτερου άξονα έρευνας.

5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η αναζήτηση των αρχών της χωρικής διαχείρισης του ήχου στην αρχαιοελληνική τραγωδία και κωμωδία., εξετάζοντας τη

στιγμή που η ηχητική χωρικότητα έγινε συνειδητή καλλιτεχνική επιλογή και εργαλείο στα χέρια των δημιουργών της εποχής. Πηγή γι αυτή τη μελέτη αποτέλεσαν οι “κρυμμένες σκηνικές οδηγίες” του εκάστοτε ποιητή στα πρωτότυπα κείμενα των κωμωδιών και των τραγωδιών καθώς και ενδείξεις που προκύπτουν από παραθέματα από τον λόγο των ηρώων.

Η ανάλυση των αποσπασμάτων και των έργων που προτιμήθηκαν έγινε επί τη βάση τριών αξόνων. Η παραδοχή των αξόνων αυτών οδήγησε όντως στην ανάδειξη των πιο «ισχυρών» παραδειγμάτων. Έτσι, φτάνοντας στο τέλος της σύντομης πραγματείας είναι δυνατή η καταγραφή έργων και παραδειγμάτων, τα οποία καλύπτουν ταυτόχρονα διαφορετικά χαρακτηριστικά του ίδιου άξονα ή δραμάτων, όπου πληρούνται περισσότεροι του ενός άξονες σύμφωνα με την ειδική περιγραφή που δίνεται στην Ενότητα 2.

Ο πρώτος αφορούσε στην κίνηση του Χορού στη σκηνή, καθώς επίσης έννοιες όπως το αμοιβαίον, οι αντιλαβές, οι στιχομυθίες, οι ωδές, οι Πάροδοι και Έξοδοι των μελών του Χορού. Στη συνέχεια, ο δεύτερος μελετούσε τη θεϊκή επιφάνεια και τη χρήση ή όχι μηχανικών βοηθημάτων για τον ερχομό τους. Δόθηκε η αφορμή να εξεταστεί η διάσταση του βάθους και του ύψους. Ο τελευταίος πραγματεύεται αρχικά την παρουσία ή την απουσία παραχορού και σε δεύτερη φάση τις περιπτώσεις, που ο Χορός εξακολουθεί να είναι ένας αλλά διασπάται σε δύο ημιχόρια. Εδώ υπάρχει η ευκαιρία να αναφερθεί κανείς στην συνύπαρξη δύο αυτόνομων και ισοδύναμων ηχητικών πηγών, στην πολυφωνία και αντιφωνία. Αυτά τα τελευταία γνωρίσματα (μονοφωνία - διφωνία - αντίστιξη - πολυφωνία) θα μπορούσαν να ισχύουν και για τον πρώτο άξονα.

Η παρούσα εργασία είναι μόνο μια αρχική τοποθέτηση και διερεύνηση στο ερώτημα κατά πόσο είναι ουσιαστικό κανείς να αναζητήσει όψεις τρισδιάστατης ηχητικής πληροφορίας σε τόσο παλιά κείμενα. Χρειάζεται εντατική μελέτη κάθε αναφοράς στον ήχο ή τη μουσική, κατ’ αρχάς στα δράματα που προτιμήθηκαν κι έπειτα σε όσες τραγωδίες παραλείφθηκαν. Ειδικότερα, για τον Αριστοφάνη και τον Ευριπίδη απαιτείται αυστηρή αποδελτίωση των μαρτυριών για τον «γλυκύ λωτό» ή τις αυλητρίδες αντιστοίχως. Αναγκαία είναι, επίσης, η παράθεση αποσπασμάτων από όλη τη δραματουργία συνοδευόμενη από μια συγκριτική θεώρηση.

6. Αναφορές

[1] Aristophanes, Comediae: Recognoverunt Brevique Adnotatione Critica Instruxerunt I. Scriptorum Classicorum Bibliotheca Oxoniensis. Hall, F. W. & Geldart, W. M. (Eds.) Καρδαμήτσας, 1967.

[2] Blume, H. D., Εισαγωγή στο αρχαίο θέατρο. Αθήνα, Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης, 1989

[3] Csapo, Eric. The origins of Theater in ancient Greece and beyond: from ritual to drama. Csapo, Eric & Miller, Margaret C. (edit). Cambridge New York: Cambridge University Press, c2007.

[4] Dover, K. J. Η Κωμωδία του Αριστοφάνη. Κακριδής, Φάνης Ι. (μετάφραση) Αθήνα, Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης. 8η ανατύπωση, 2010.

[5] Easterling, P. E., Οδηγός για την Αρχαία Ελληνική Τραγωδία: Από το Πανεπιστήμιο Του Καίμπριτζ. Ρόζη, Λία-Βαλάκας (μετάφραση-επιμέλεια). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2010.

- [6] Gregory, Justina. Όψεις και Θέματα της Αρχαίας Ελληνικής Τραγωδίας: 31 Εισαγωγικά Δοκίμια. Ιακώβ, Δανιήλ Ι. (επιμέλεια). Καίσαρ, Μαρία, Μπεζαντάκου, Όλγα, Φιλίππου, Γαρυφαλλιά (μετάφραση). Αθήνα: Παπαδήμας, 2010.
- [7] Lesky, Albin. Η Τραγική Ποίηση Των Αρχαίων Ελλήνων. Χουρμουζιάδης, Νίκος Χ. (μτφ.) Α' Από τη γένεση του είδους, ως τον Σοφοκλή. Αθήνα, Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης. 4η Έκδοση, 2007.
- [8] Lesky, Albin. Η Τραγική Ποίηση Των Αρχαίων Ελλήνων. Χουρμουζιάδης, Νίκος Χ. (μτφ.) Β' Ο Ευριπίδης και το τέλος του είδους. Αθήνα, Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης. 4η Έκδοση, 2007.
- [9] Moretti, Jean – Charles. Θέατρο και κοινωνία στην αρχαία Ελλάδα. Μετάφραση: Ελένη Δημητρακοπούλου. Επιμέλεια: Κωνσταντίνος Μπούρας. Αθήνα: Πατάκης, 1992, σειρά: Ιστορία του Αρχαίου Κόσμου.
- [10] Pickard-Cambridge, A. Dithyramb, Tragedy and Comedy. Oxford, Clarendon Press, 1927.
- [11] Roginska, A., & Geluso, P. (Eds.). Immersive Sound: The Art and Science of Binaural and Multi-Channel Audio (1st ed.). Routledge, 2017. <https://doi.org/10.4324/9781315707525>
- [12] Taplin, Oliver. Η Αρχαία Ελληνική Τραγωδία σε Σκηνική Παρουσίαση. Ασημομύτης, Βασίλης, Δ. (μετάφραση-σχόλια-βιβλιογραφία). Αθήνα: Παπαδήμας, 2η Έκδοση, 2003.
- [13] Γρυπάρης, Ι. Ν., Οι Τραγωδίες του Αισχύλου: Ίκετιδες-Πέρσες-Έπτά επί Θήβας, Προμηθέας Δεσμώτης. Όρέστεια: Άγαμέμνων-Χοηφόρες-Εὐμενίδες. Αθήνα: Βιβλιοπωλείο της Εστίας, 2004.
- [14] Ευαγγελίδου, Μ. Η γένεση του θεατρικού χώρου (αδημοσίευτη διπλωματική διατριβή). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.
- [15] Ευριπίδη, Ελένη. Δραματική Ποίηση: Αθήνα: ΟΕΔΒ 2015.
- [16] Κακριδής, Φ. Ι., Αρχαία ελληνική γραμματολογία. Θεσσαλονίκη: Ινστιτούτο Νεοελληνικών Σπουδών, Ίδρυμα Μανόλη Τριανταφυλλίδη, 2005.
- [17] Μαρκαντωνάτος, Α. Γ., Αρχαία ελληνική τραγωδία: Θεωρία και Πράξη. Ανδρέας Μαρκαντωνάτος, Χρήστος Τσαγγάλης (επιμ.), Αθήνα: GUTENBERG, 2008.
- [18] Μαρωνίτης, Δ. Ν., «Αοιδός, αφηγητής, ποιητής. Εσωτερική ποιητική της Οδύσσειας», στον τόμο Ομηρικά μεγαθέματα. Πόλεμος -ομιλία -νόστος, Κέδρος: Αθήνα 1999.
- [19] Μυσirlή, Α., Ο Όμηρος και η Εποχή του. (Διπλωματική Εργασία). Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Κομοτηνή: 2018.
- [20] Σκαρλάτος, Δημήτρης. Εφαρμοσμένη Ακουστική - Ηχοπροστασία. Gotsis, 2018.



Πειραματική Αξιολόγηση Συστήματος Ενεργητικής Ακύρωσης Θορύβου για Χαμηλόσυχνες Ακουστικές Διαταραχές

Δημήτριος Μυλωνάς^{1,*}, Χρήστος Γιακόπουλος¹, Ιωάννης Αντωνιάδης¹

¹ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ,

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15772, Ζωγράφου

*dimimyl579@mail.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει την πειραματική αξιολόγηση ενός τοπικού συστήματος Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου που προορίζεται να εγκατασταθεί στο προσκέφαλο της θέσης του επιβάτη σε μέσα μεταφοράς. Η πειραματική αξιολόγηση, η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της μείωσης της ακουστικής πίεσης κατά την ενεργοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε μια κλειστή καμπίνα χρησιμοποιώντας ακουστικές διαταραχές από το εσωτερικό ενός σκάφους αναψυχής. Το εν λόγω σύστημα που αποτελείται από 2 woofers, 4 μικρόφωνα καθώς και ένα σύστημα head tracking κατάφερε να μειώσει το πλάτος των αρμονικών που σχετίζονται με τη λειτουργία των μηχανών και των ηλεκτρογεννητριών του σκάφους περισσότερο από 10 dB. Επιπλέον, η συνολική ηχοστάθμη παρουσίασε σημαντική μείωση στα αυτιά του επιβάτη. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη επιβάτη δεν επηρεάζει την απόδοση του συστήματος, όταν η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού γίνεται χωρίς καθημένο επιβάτη.

Experimental Evaluation of an Active Noise Cancellation System for Low Frequency Acoustic Disturbances

ABSTRACT

This paper presents the experimental evaluation of a local Active Noise Control system intended to be installed at the headrest of the passenger's seat in vehicles. The experimental evaluation, which includes the determination of acoustic pressure attenuation during system activation, was carried out in an enclosure using acoustic disturbances from a yacht interior. This system consisting of 2 woofers, 4 microphones and a head tracking system managed to reduce the amplitude of harmonics associated with the engines and generators of the yacht by more than 10 dB. In addition, the SPL was reduced significantly at the passenger ears. Finally, it was found that the presence of a passenger does not affect the performance of the system when modelling the secondary path without a seated passenger.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια πολλά μοντέλα εμπορικών ακουστικών (headsets) εφοδιάζονται με συστήματα ενεργητικής ακύρωσης θορύβου (ΣΕΑΘ), αποτέλεσμα της ενεργής επιστημονικής έρευνας που έγινε στον συγκεκριμένο τομέα την τελευταία δεκαετία. Σήμερα, η έρευνα πάνω στα ΣΕΑΘ έχει μετατοπιστεί στην εφαρμογή τους σε καμπίνες οχημάτων και κυρίως σε αυτοκίνητα και αεροσκάφη. Τα συστήματα αυτά εστιάζουν είτε στον τοπικό έλεγχο (local ANC) του θορύβου γύρω από τα αυτιά του επιβάτη [1], είτε στο συνολικό έλεγχο (global ANC) του ακουστικού πεδίου της καμπίνας [2]. Με τη σειρά τους τα τοπικά ΣΕΑΘ, διαχωρίζονται σε αυτά που προσαρμόζονται στο προσκέφαλο της θέσης του επιβάτη και εστιάζουν στη συγκεκριμένη θέση και σε αυτά που βασίζονται σε διεσπαρμένα ηχεία και μικρόφωνα μέσα στο χώρο, τα οποία έχουν σκοπό να δημιουργήσουν ζώνες ησυχίας σε όλες τις θέσεις. Τα συστήματα που ανήκουν στη πρώτη κατηγορία ονομάζονται ενεργά προσκέφαλα (active headrests) και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αύξηση της ακουστικής άνεσης των επιβατών σε μέσα μεταφοράς, χωρίς την εισαγωγή της πιθανής ενόχλησης που προκαλούν τα ακουστικά.

Βασικό χαρακτηριστικό των ενεργών προσκεφάλων που συνήθως αποτελούνται από δυο ηχεία και δυο μικρόφωνα, είναι ο ελεγκτής που παράγει το ακυρωτικό ακουστικό σήμα. Ένα σημείο αναφοράς όσο αφορά τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους ελεγκτές, είναι ο πολυκαναλικός αλγόριθμος FxLMS [3], που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές ερευνητικές εργασίες, λόγω της αποδοτικότητας και της χαμηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Σε αυτόν τον αλγόριθμο συνήθως ενσωματώνονται τεχνικές υπολογισμού της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη [4], επειδή η τοποθέτηση μικροφώνων στα εν λόγω σημεία δεν είναι εφικτή χωροταξικά. Βασικό μειονέκτημα της πλειοψηφίας αυτών των τεχνικών είναι η αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας που δυσχεραίνει την υλοποίηση σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ο υπολογισμός των ηλεκτροακουστικών συστημάτων που συμμετέχουν στην εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη. Τα συστήματα αυτά που στη βιβλιογραφία αναφέρονται σαν δευτερογενή μονοπάτια (secondary paths), μεταβάλλονται από διάφορους παράγοντες, όπως η ύπαρξη επιβάτη ή ακόμα και η θερμοκρασία του αέρα με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακρίβεια υπολογισμού της ακουστικής πίεσης και συνεπώς η απόδοση του ΣΕΑΘ.

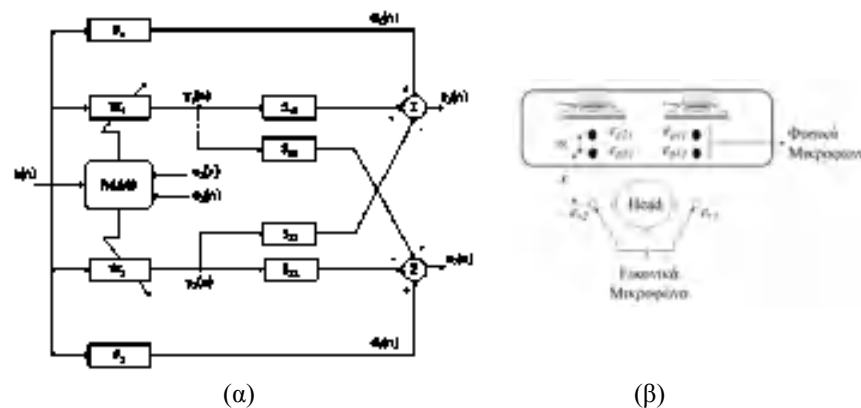
Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε ένα ενεργό προσκέφαλο που χρησιμοποιεί μια υπολογιστικά αποδοτική τεχνική για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη. Επιπλέον εξετάζουμε για πρώτη φορά την επίδραση της ύπαρξης επιβάτη στην μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού και στην απόδοση του ΣΕΑΘ, όσο αφορά στην μείωση της ακουστικής πίεσης γύρω από το προσκέφαλο. Τέλος, οι ακουστικές διαταραχές που χρησιμοποιούνται για την πειραματική αξιολόγηση του εν λόγω συστήματος προέρχονται από την καμπίνα ενός σκάφους αναψυχής, διότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου συστήματος ταιριάζουν περισσότερο σε μια τέτοια εφαρμογή. Έτσι αξιολογείται η εφαρμογή τοπικών ΣΕΑΘ σε πλωτά μέσα, ένα πεδίο στο οποίο δεν υπάρχουν πολλές βιβλιογραφικές αναφορές παρόλο που η χωροταξία των μέσων αυτών ενδείκνυται για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων.

1. Μέθοδος

Οι βασικές τεχνικές πάνω στις οποίες βασίζεται το προτεινόμενο σύστημα τοπικού ελέγχου θορύβου είναι: α) ο πολυκαναλικός αλγόριθμος FxLMS για την εξαγωγή των συντελεστών του προσαρμοστικού FIR φίλτρου που υλοποιεί τον υπολογισμό του ακυρωτικού ακουστικού σήματος, β) η γραμμική παρέκταση για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, γ) ο αλγόριθμος υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού του επιβάτη από το προσκέφαλο με τη βοήθεια ενός αισθητήρα υπερήχων. Στις παρακάτω παραγράφους δίνονται λεπτομέρειες για την υλοποίηση των εν λόγω τεχνικών.

1.1 Πολυκαναλικός FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων

Το ενεργό προσκέφαλο βασίζεται στον αλγόριθμο FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων, με 1 σήμα αναφοράς (Σχήμα 1.1α). Τα δύο σήματα σφάλματος $e_1(n)$ και $e_2(n)$ χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών δυο προσαρμοστικών φίλτρων $w_1(n)$ και $w_2(n)$, όπου με bold γράμματα συμβολίζονται τα διανύσματα. Έπειτα υπολογίζονται τα ακυρωτικά σήματα $y_1(n)$ και $y_2(n)$ για κάθε χρονική στιγμή n .



Σχήμα 1.1: (α) Μπλοκ διάγραμμα αλγορίθμου FxLMS 2 εισόδων-2 εξόδων, (β) Τεχνική υπολογισμού της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, με γραμμική παρέκταση.

Καθένα από τα δυο σήματα χρησιμοποιείται για την οδήγηση των δύο πηγών εξόδου (δευτερογενείς πηγές). Η εξίσωση υπολογισμού των συντελεστών των προσαρμοστικών φίλτρων (Εξίσωση (1.1)) περιλαμβάνει ακόμα το σήμα αναφοράς $x(n)$ φιλτραρισμένο από τα μοντέλα των δευτερογενών μονοπατιών $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$. Τα μοντέλα αυτά, τα οποία υπολογίζονται σε μια προγενέστερη φάση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο LMS, αντιστοιχούν στα ηλεκτρακουστικά συστήματα που ξεκινούν από την πηγή εξόδου και καταλήγουν είτε στο μικρόφωνο που βρίσκεται μπροστά της, είτε στο μικρόφωνο που βρίσκεται μπροστά στη γειτονική πηγή. Έτσι προκύπτουν τέσσερα δευτερογενή μονοπάτια. Κατά συνέπεια η εξίσωση υπολογισμού των συντελεστών των φίλτρων είναι:

$$w_k(n+1) = w_k(n) - \mu(x'_{1k}(n)e_1(n) + x'_{2k}(n)e_2(n)), k = 1,2 \quad (1.1)$$

Στην Εξίσωση (1.1) με x'_{1k} και x'_{2k} συμβολίζεται το σήμα αναφοράς φιλτραρισμένο από τα δευτερογενή μονοπάτια που αντιστοιχούν στην πρώτη και την δεύτερη πηγή εξόδου αντίστοιχα. Επιπλέον, ο αριθμός των φίλτρων είναι k , όσες και οι δευτερογενείς πηγές, ενώ με μ συμβολίζεται η παράμετρος που καθορίζει το ρυθμό σύγκλισης (step size). Τέλος, το ακυρωτικό σήμα για κάθε δευτερογενή πηγή, προκύπτει από την Εξίσωση (1.2):

$$y_k(n) = x^T(n) * w_k(n) \quad (1.2)$$

Είναι γνωστό ότι ο εν λόγω αλγόριθμος πετυχαίνει τη μεγαλύτερη μείωση της ακουστικής πίεσης σε κοντινή απόσταση από τα μικρόφωνα σφάλματος. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η τεχνική γραμμικής παρέκτασης (Σχήμα 1.1β), η οποία μεγεθύνει τη ζώνη ησυχίας και τη μετακινεί κοντά στα αυτιά του επιβάτη.

1.2 Γραμμική παρέκταση της ακουστικής πίεσης

Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη χρησιμοποιείται η τεχνική της γραμμικής παρέκτασης [6], η οποία είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για χαμηλόσυχνες ακουστικές διαταραχές, όπου το μήκος κύματος είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις αποστάσεις a και x (Σχήμα 1.1β). Με a συμβολίζεται η απόσταση ανάμεσα στα δυο φυσικά μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται για την γραμμική παρέκταση και με x συμβολίζεται η απόσταση ανάμεσα στο δεύτερο μικρόφωνο του κάθε ζεύγους και το αντίστοιχο εικονικό μικρόφωνο. Η θέση των εικονικών μικροφώνων, ιδανικά πρέπει να ταυτίζεται με τη θέση των αυτιών του επιβάτη. Έτσι η ακουστική πίεση στα σημεία των εικονικών μικροφώνων υπολογίζεται από την Εξίσωση 1.3:

$$e_{vk}(n) = \frac{e_{pk2}(n) - e_{pk1}(n)}{a} x + e_{pk2}(n), k = 1,2 \quad (1.3)$$

Όπου e_{vk} είναι οι εκτιμώμενες ακουστικές πιέσεις στα αυτιά του επιβάτη και e_{pk1} και e_{pk2} είναι οι ακουστικές πιέσεις που καταγράφουν τα φυσικά μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ενεργητικού προσκέφαλου.

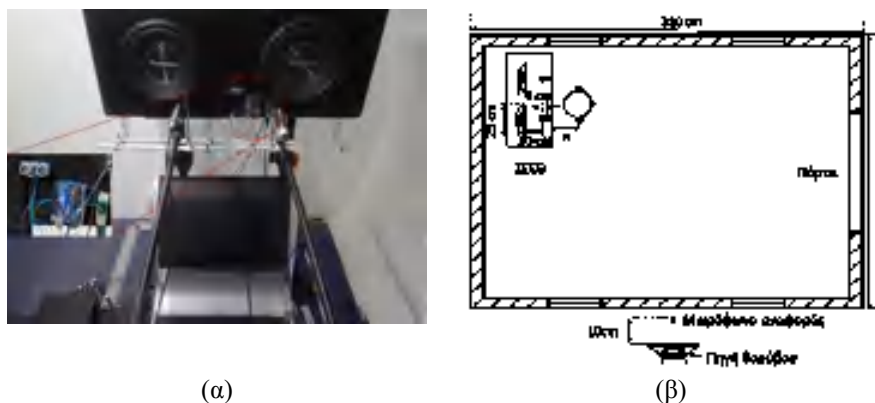
1.3 Υπολογισμός της απόστασης κεφαλιού-προσκέφαλου

Προκειμένου να υπολογίζεται η απόσταση x ανάμεσα στα ηχεία του τοπικού ΣΕΑΘ και του κεφαλιού του επιβάτη, η οποία εισάγεται στην Εξίσωση (1.3), χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας απόστασης HC-SR04, που συνδέθηκε σε ένα

Arduino Uno (Σχήμα (2.2^α)). Έπειτα δημιουργήθηκε ένας παλμός PWM που το Duty Cycle άλλαζε ανάλογα με την έξοδο του αισθητήρα. Έτσι οι διάφορες τιμές Duty Cycle αντιστοιχίστηκαν σε τρεις προκαθορισμένες αποστάσεις 5 cm, 10 cm και 15 cm, οι οποίες εισάγονται σε πραγματικό χρόνο στην Εξίσωση (1.3) ανανεώνοντας έτσι τις τιμές e_1 και e_2 . Με αυτόν τον τρόπο η κίνηση του επιβάτη επιφέρει μετακίνηση της ζώνης ησυχίας (Head Tracking) [7].

2. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από 2 woofers (Pioneer TS-A250S4) τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξουδετέρωση χαμηλόσυχνων ακουστικών διαταραχών, 4 μικρόφωνα σφάλματος (Shure MX 183) που συμμετέχουν στην εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη (Σχήμα (2.1β)), καθώς και ένα μικρόφωνο αναφοράς που βρίσκονταν τοποθετημένο 10 cm μακριά από την πηγή του θορύβου. Ακόμα η ανάπτυξη του αλγορίθμου ελέγχου έγινε στο FPGA ενός επεξεργαστή CRIO-9030, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Labview. Η απόσταση α ανάμεσα στα μικρόφωνα σφάλματος κάθε ζεύγους ήταν 4 cm, ενώ η απόσταση του πρώτου μικροφώνου από το διάφραγμα των ηχείων ήταν 10 cm. Τέλος η απόσταση ανάμεσα στα δύο ζεύγη μικροφώνων ήταν 25 cm (Σχήμα 2.2β). Σαν πηγή θορύβου χρησιμοποιήθηκε ένα woofer το οποίο τοποθετήθηκε 3 m μακριά από το ΣΕΑΘ, ακριβώς έξω από την κλειστή καμπίνα που βρίσκεται εγκατεστημένο το εν λόγω σύστημα. Σαν ακουστικές διαταραχές χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά σήματα που καταγράφηκαν σε μια καμπίνα σκάφους αναψυχής, ώστε να υπάρχει μια κατά το δυνατό πιο πιστή αναπαραγωγή των πραγματικών ακουστικών συνθηκών. Τέλος, τα φάσματα συχνοτήτων πριν και μετά τη λειτουργία του ΣΕΑΘ μετρήθηκαν στα 10 cm από την επιφάνεια των woofers, χρησιμοποιώντας δύο μετρητικά μικρόφωνα και μια κάρτα καταγραφής ακουστικών σημάτων.



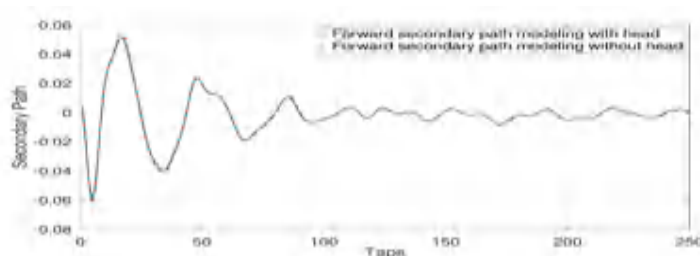
Σχήμα 2.2: (α) ΣΕΑΘ εγκατεστημένο σε κλειστή καμπίνα (σε μεγένθυση το σύστημα υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού από το τελευταίο μικρόφωνο), (β) Γεωμετρικές λεπτομέρειες ΣΕΑΘ και καμπίνας.

3. Πειραματικά αποτελέσματα

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου ΣΕΑΘ χρησιμοποιήθηκαν δύο ακουστικές διαταραχές, οι οποίες ηχογραφήθηκαν σε καμπίνα σκάφους αναψυχής, όταν το σκάφος ήταν σταθμευμένο και λειτουργούσαν μόνο οι γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και όταν το σκάφος έπλεε χρησιμοποιώντας τις μηχανές του.

Έπειτα μετρήθηκε η ακουστική πίεση 10 cm μακριά από τα μακρινά μικρόφωνα (e_{p22} , e_{p12}) σε δύο σημεία τα οποία απέχουν 20 cm μεταξύ τους και αντιστοιχούν στα αυτιά του πιθανού επιβάτη. Επιπλέον προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση που έχει η ύπαρξη επιβάτη στην μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού και ακολούθως στην απόδοση του συστήματος, υπολογίστηκαν δυο δευτερογενή μονοπάτια. Το πρώτο αντιστοιχεί στην περίπτωση, όπου ένας επιβάτης κάθεται μπροστά από το ΣΕΑΘ, ενώ το δεύτερο στην περίπτωση όπου η θέση μπροστά από τον επιβάτη είναι κενή.

Στο Σχήμα (3.1) φαίνονται τα μοντέλα (FIR φίλτρα) των δευτερογενών μονοπατιών στις δύο περιπτώσεις. Ο συνολικός αριθμός των συντελεστών των φίλτρων είναι 250 και η μοντελοποίηση έγινε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο LMS. Παρατηρούμε ότι οι διαφορές των δυο μοντέλων είναι μικρές μιας και η μοντελοποίηση έγινε με λευκό θόρυβο που περιέχει συχνότητες έως 2 kHz. Σε αυτές τις χαμηλές συχνότητες φαίνεται ότι η ύπαρξη του κεφαλιού μπροστά από τα μικρόφωνα δεν επηρεάζει τόσο το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για την μοντελοποίηση των δευτερογενών μονοπατιών χρησιμοποιήθηκαν τα πιο απομακρυσμένα μικρόφωνα από το διάφραγμα των ηχείων, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη μας εργασία [8].

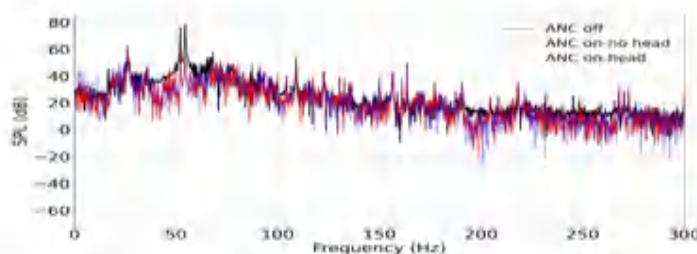


Σχήμα 3.1: Μοντέλα των δευτερογενών μονοπατιών που αντιστοιχούν στα μακρινά μικρόφωνα e_{p22} και e_{p12} με και χωρίς την ύπαρξη επιβάτη μπροστά από τον επιβάτη.

Αναφορικά με την μείωση της ακουστικής πίεσης που επιτυγχάνεται στα αυτιά του επιβάτη, παρατηρούμε ότι όταν η ακουστική διαταραχή περιλαμβάνει τις συχνότητες που προέρχονται από την λειτουργία των δύο ηλεκτρογεννητριών (55 και 52 Hz), η συνολική ηχοστάθμη μεταβάλλεται από τα 82.11 στα 69 dB στο αριστερό αυτί και από τα 80.9 στα 67.7 dB στο δεξί αυτί. Συνεπώς η διαφορά της ηχοστάθμης πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ είναι περίπου 13 dB και στα δύο αυτιά. Επιπλέον το πλάτος της συχνότητας στα 55 Hz μειώνεται από τα 78.51 στα 56.28 dB (μείωση κατά 22 dB) και το πλάτος της συχνότητας στα 52 Hz από τα 76 στα 58 dB

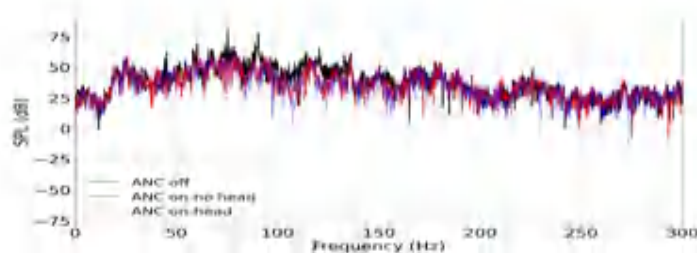
(μείωση κατά 18 dB), στο αριστερό αυτί του επιβάτη (Σχήμα (3.2)). Παρόμοιες μειώσεις παρατηρήθηκαν και στο δεξί αυτί.

Επιπλέον, όταν το σκάφος βρίσκεται εν πλω, η ακουστική διαταραχή στην καμπίνα αποτελείται κυρίως από αρμονικές της συχνότητας περιστροφής της μηχανής του σκάφους που βρίσκεται στα 15 Hz και από θόρυβο που σχετίζεται με τα κύματα και τον αέρα. Η ηχοστάθμη πριν τη λειτουργία του ΣΕΑΘ ήταν 86.93 και 85.1 dB στο αριστερό και το δεξί αυτί του επιβάτη αντίστοιχα. Μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ οι αντίστοιχες ηχοστάθμες ήταν 77.55 και 76.53 dB, δηλαδή παρατηρήθηκε μείωση κατά 9.38 και 8.57 dB. Βέβαια οι επιμέρους αρμονικές στα 45, 60, 75 και 90 Hz παρουσιάζουν μείωση του πλάτους τους από 10 έως 20 dB (Σχήμα (3.3)). Συνεπώς το ΣΕΑΘ επιτυγχάνει αξιόλογη μείωση των αρμονικών στοιχείων της ακουστικής διαταραχής, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται και μεγάλη μείωση του χαμηλόσυχνου ευρυζωνικού θορύβου. Η αδυναμία αξιόλογης μείωσης του θορύβου αυτού συντελεί στην περιορισμένη μείωση της συνολικής ηχοστάθμης.



Σχήμα 3.2: Φάσματα συχνότητων στα αυτιά του επιβάτη πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ (ηλεκτρογεννήτριες).

Παρόλα αυτά τα ποσά μείωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι κοντά στο όριο των 10 dB και θεωρούνται ικανοποιητικά. Επιπλέον, το ανθρώπινο αυτί μπορεί εύκολα να αντιληφθεί τη διαφορά της ηχοστάθμης πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ.



Σχήμα 3.3: Φάσματα συχνότητων στα αυτιά του επιβάτη πριν και μετά την ενεργοποίηση του ΣΕΑΘ (εν πλω)

Τέλος, παρόλο που μέσω της τεχνικής Head Tracking η μέγιστη μείωση της ακουστικής πίεσης παρατηρείται στις θέσεις των αυτιών, παράλληλα δημιουργούνται δυο μεγάλες ζώνες ησυχίας γύρω από αυτές τις θέσεις, οι οποίες σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες έχουν διάμετρο ίση περίπου με το 1/10 του μήκους κύματος της αντίστοιχης συχνότητας [3]. Παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση μιας ακουστικής διαταραχής στα 55 Hz, η διάμετρος της ζώνης ησυχίας είναι 60 cm,

γεγονός που επιτρέπει την άνετη κίνηση του κεφαλιού του επιβάτη ακόμα και αν δεν υπήρχε σύστημα Head Tracking. Παρόλα αυτά το εν λόγω σύστημα οδηγεί σε μια περαιτέρω μείωση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη μεταφέροντας το κέντρο της ζώνης ησυχίας ανάλογα με τη θέση του κεφαλιού.

4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, που προορίζεται για εγκατάσταση στο προσκέφαλο θέσεων οχημάτων. Το σύστημα αυτό που αποτελείται από δυο woofer και τέσσερα μικρόφωνα αξιολογήθηκε πειραματικά ως προς τη δυνατότητα του να μειώσει την ακουστική πίεση γύρω από τα αυτιά του επιβάτη, όταν η ακουστική διαταραχή προέρχεται από την καμπίνα ενός σκάφους αναψυχής. Μάλιστα, ενσωματώθηκε και ένα σύστημα υπολογισμού της απόστασης του κεφαλιού από το προσκέφαλο, με σκοπό την μέγιστη μείωση της ηχοστάθμης γύρω από τα αυτιά. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε μια κλειστή καμπίνα στο εργαστήριο έδειξαν ότι το εν λόγω σύστημα μπορεί να μειώσει το πλάτος των αρμονικών που σχετίζονται είτε με τις ηλεκτρογεννήτριες, είτε με τις μηχανές του σκάφους αρκετά παραπάνω από 10 dB συντελλώντας στην βελτίωση της ακουστικής άνεσης του επιβάτη. Μελλοντική έρευνα πάνω στο προτεινόμενο σύστημα θα περιλαμβάνει την βελτίωση της απόδοσης μέσω χρήσης αλγορίθμων που μπορούν να μειώσουν και την ακουστική πίεση που οφείλεται σε ευρυζωνικό θόρυβο και την βελτίωση της φορητότητας με την ενσωμάτωση του μικροφώνου αναφοράς στο προσκέφαλο και τη χρήση μικρότερου ψηφιακού επεξεργαστή σήματος.

5. Αναφορές

- [1] C.Y. Chang, C.T. Chuang, S.M. Kuo, C.H. Lin «Multi-functional active noise control system on headrest of airplane seat», *Mechanical Systems and Signal Processing* **167**, 108552 (2022).
- [2] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis «Global control of propeller-induced aircraft cabin noise using active sound absorbers», *Journal of Sound and Vibration* **573**, 118213 (2024).
- [3] P.A. Nelson, S.J. *Elliot Active Control of Sound* Academic Press (1993).
- [4] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander, C. Petersen «A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control» *Algorithms* **1**, 69-99 (2008).
- [5] J.Y. Oh, H.W. Jung, M.H. Lee, K. H. Lee, Y. J. Kang «Enhancing active noise control of road noise using deep neural network to update secondary path estimate in real time», *Mechanical Systems and Signal Processing* **206**, 110940 (2024).
- [6] C.D. Kestell, B.S. Cazzolato, C.H. Hansen «Active noise control in a free field with virtual sensors» *Journal of Acoustic Society of America* **109**, 232–243 (2001).
- [7] S.J. Elliott, W. Jung, J. Cheer «Head tracking extends local active control of broadband sound to higher frequencies» *Scientific reports* **8**, 5403 (2018).
- [8] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis, «An extrapolation-based virtual sensing technique of improving the control performance of the FxLMS algorithm in a maritime environment» *Applied Acoustics* **193**, (2022).



Εφαρμογή συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου σε βιομηχανικό χειριστήριο ελέγχου

Σπυρίδων Μουζακίτης^{1,*}, Γεώργιος Χαραλαμπίδης¹

¹Group Science, Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι

*smouzak@groupscience.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη διερεύνηση, την ανάπτυξη και την πειραματική εφαρμογή ενός συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου σε μία κλειστή κοιλότητα βιομηχανικού χειριστηρίου. Στην εξεταζόμενη εφαρμογή ο πρωτεύων θόρυβος προέρχεται από γραμμική επιφανειακής επεξεργασίας αλουμινίου που παράγει ακουστική διέγερση χαμηλών συχνοτήτων υψηλού πλάτους, φαινόμενο που απαντάται πολύ συχνά σε προβλήματα βιομηχανικού θορύβου. Η περιοχή προστασίας βρίσκεται σε ένα κλειστό χειριστήριο ελέγχου που είχε ηχομονωθεί σημαντικά με παθητικές μεθόδους, οι οποίες όμως δεν είχαν αντιμετωπίσει το θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων. Η εργασία δείχνει τη θεωρητική ανάλυση σχετικά με την πρόβλεψη των ακουστικών συναρτήσεων μεταφοράς και στη συνέχεια εξετάζει τον αλγόριθμο ψηφιακού ενεργού ελέγχου θορύβου που εφαρμόζεται βέλτιστα στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η διάταξη εφαρμόζεται πειραματικά, όπου και αποτυπώνεται η αποδοτικότητα του προτεινόμενου συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν τη σημαντική μείωση της ηχοστάθμης στις προβληματικές χαμηλές συχνότητες, στην περιοχή ενδιαφέροντος του χειριστηρίου ελέγχου.

Application of an active noise control system in an industrial control room

ABSTRACT

This work presents the investigation, development and application of an active noise control system in an industrial control room. In this application the primary noise source is a line of aluminum surface treatment that produces a low frequency excitation of large magnitude, which is common in cases of industrial noise. The protection area lies within a control room that had been significantly insulated in the past using passive means that had not solved the low frequency problem. This work presents the theoretical background concerning the acoustic transfer functions and then examines the digital control algorithm that is applied optimally in this case. The solution is tested experimentally and its efficiency is measured. The results show the important reduction of low frequency components at the control room area of interest.

Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την εφαρμογή ενός συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου (Active Noise Control – ANC) στο χειριστήριο μιας βιομηχανικής γραμμής κατεργασίας αλουμινίου, δηλαδή σε έναν κλειστό χώρο που βάλλεται από ισχυρό θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων. Μέσα από την εργασία φαίνεται η διερεύνηση του προβλήματος, οι σχεδιαστικές επιλογές στα δομικά στοιχεία και τον αλγόριθμο του ελεγκτή και τελικά η πραγματική εφαρμογή με τα αποτελέσματά της. Το πρόβλημα του θορύβου χαμηλών συχνοτήτων σε χειριστήρια ελέγχου μικρών διαστάσεων είναι αρκετά παρόμοιο με αυτό που απαντάται σε καμπίνες οχημάτων και είναι πολύ συχνό στη βιομηχανία. Η δυσκολία στην αντιμετώπισή του με συμβατικές μεθόδους οφείλεται στην αδυναμία της παθητικής ηχομόνωσης να μειώσουν θορύβους χαμηλών συχνοτήτων με οικονομικό τρόπο. Επιπλέον, σε αυτές τις συχνοτικές περιοχές παρουσιάζονται συχνά φαινόμενα συντονισμού των παθητικών δομών ηχομόνωσης και της ίδιας της ακουστικής κοιλότητας, της οποίας διεγείρονται κάποιες πρώτες ακουστικές ιδιομορφές [1].

Στη βιβλιογραφία έχει γίνει γνωστή η δυνατότητα εφαρμογής ANC σε κλειστές κοιλότητες σε συχνοτικές περιοχές κοντά στις πρώτες ιδιομορφές με μεγάλη επιτυχία, τόσο θεωρητικά [1] όσο και πρακτικά [2]. Σε αυτές τις έρευνες έχουν επισημανθεί οι δυσκολίες του προβλήματος που αφορούν την υπολογιστική προσομοίωση, τη βέλτιστη θέση αισθητηρίων και επενεργητών ελέγχου αλλά και την καταλληλότητα των αλγορίθμων ελέγχου σε σχέση με το είδους του θορύβου, τη γεωμετρική διάταξή τους, τη γεωμετρία της κοιλότητας και το χωρίο επιθυμητού ελέγχου. Οι ιδιαιτερότητες του συστήματος ελέγχου χρησιμοποιώντας αλγορίθμους ψηφιακού ελέγχου προσαρμοστικών φίλτρων έχουν επίσης διερευνηθεί στη βιβλιογραφία [3] και έχουν δοκιμαστεί πειραματικά σε απλές εφαρμογές [2]. Σε αυτές γίνεται μνεία στη χρήση ψηφιακών προσαρμοστικών φίλτρων FIR και IIR για την προσέγγιση των ακουστικών συναρτήσεων μεταφοράς του φυσικού επιπέδου του φαινομένου, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

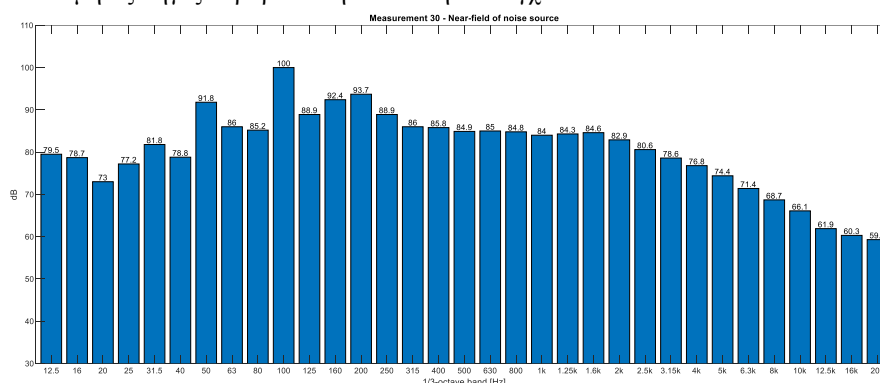
Στην παρούσα εργασία, δεδομένων των περιορισμών που απαντώνται σε βιομηχανικές εφαρμογές ηχομείωσης, δηλαδή του μειωμένου κόστους και του μειωμένου διαθέσιμου χώρου, εξετάζεται η εφαρμογή ενός αλγορίθμου Feedforward FULMS, δηλαδή μιας παραλλαγής του Feedforward FXLMS [3] που χρησιμοποιεί προσαρμοστικό φίλτρο IIR αντί του FIR για τη συνάρτηση μεταφοράς ελέγχου. Στόχος της εργασίας είναι η προσέγγιση των ακουστικών ιδιαιτεροτήτων της εφαρμογής με λίγους αισθητήρες και επενεργητές, καθώς και μικρό αριθμητικό σφάλμα. Αυτό επιτρέπει την πρακτική υλοποίηση του συστήματος ANC με οικονομικά υποσυστήματα και μεγάλη απόδοση.

1. Περιγραφή προβλήματος και παραμέτρων σχεδιασμού

Η εφαρμογή ενός συστήματος ANC για την αντιμετώπιση θορύβου είναι ένα έργο στο οποίο πρέπει σχεδιαστικά και πρακτικά να αποφασιστούν αρκετές παράμετροι, με πιο σημαντικές α) την επιλογή του αριθμού των αισθητήρων, β) την επιλογή του αριθμού των πηγών, γ) την επιλογή της θέσης των αισθητήρων και των πηγών, δ) την επιλογή του ψηφιακού αλγορίθμου ελέγχου και ε) την επιλογή των βασικών παραμέτρων ψηφιακού ελέγχου (συχνότητα δειγματοληψίας/ελέγχου και

τάξεις φίλτρων). Πρακτικά οι επιλογές αυτές καθορίζουν τελικά την πολυπλοκότητα, το κόστος και την απόδοση του συστήματος και σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται από το είδος του πρωτεύοντος θορύβου και τη γεωμετρία του προβλήματος (πηγή - δέκτες - πεδίο ελέγχου και σχετικές θέσεις αυτών).

Στην εξεταζόμενη εφαρμογή το δωμάτιο ελέγχου στο οποίο βρίσκονται οι χειριστές της μηχανής έχει διαστάσεις 4,1m×3,0m και ύψος 2,5m και είναι υπερυψωμένο σε πλατφόρμα (περίπου +3,0m) σε σχέση με τη γραμμή παραγωγής. Εντός αυτού, οι χειριστές βρίσκονται σχεδόν συνέχεια καθιστοί μπροστά σε μία κονσόλα ελέγχου, περιορίζοντας έτσι πρακτικά την επιθυμητή περιοχή ηχομείωσης σε ένα χωρίο περίπου 1,0m×1,0m σε ύψος μεταξύ +1,0m και +1,5m από τα δάπεδο. Η πρωτεύουσα πηγή βρίσκεται εκτός του χειριστηρίου και, παρά την πολυπλοκότητά της, αποτελείται πρακτικά από δύο βασικές συνιστώσες: α) Το σημείο της επιφανειακής κατεργασίας αλουμινίου πλησίον του εδάφους και β) το σύστημα κινητήρα-μετάδοσης κίνησης που βρίσκεται άνωθεν του χειριστηρίου. Η πρώτη πηγή εκπέμπει σημαντικά σχεδόν σε όλο το ακουστικό φάσμα ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται σε χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, παρουσιάζοντας τονική συμπεριφορά στα 50Hz και 100Hz, όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.1*. Αυτές οι πηγές θορύβου διεγείρουν τα τοιχώματα της κοιλότητας καθιστώντας αυτά ως ανεπιθύμητες πηγές θορύβου στην κοιλότητα ελέγχου.



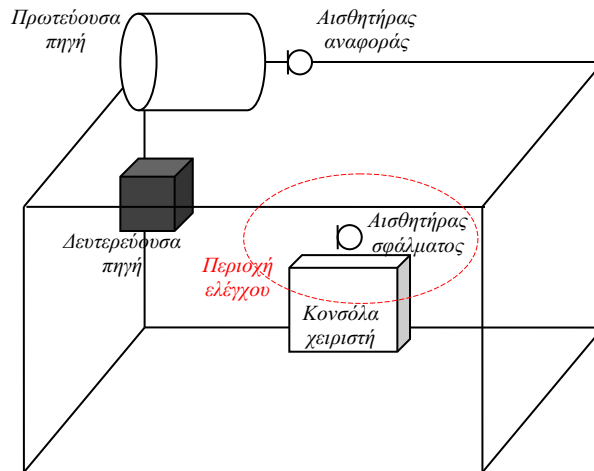
Σχήμα 1.1 Φασματική ανάλυση πρωτεύοντος θορύβου

Με βάση τα ανωτέρω, τεκμηριώνονται οι εξής επιλογές αναφορικά με τη δομή του συστήματος ANC, όπως φαίνεται και στο *Σχήμα 1.2*:

1. Χρησιμοποίηση ενός αισθητήρα σφάλματος, δεδομένης της μικρής υποπεριοχής ενδιαφέροντος μπροστά στην κονσόλα,
2. Χρησιμοποίηση μίας δευτερεύουσας πηγής, δεδομένου του περιορισμού χώρου,
3. Η θέση του αισθητήρα σφάλματος βρίσκεται στην περιοχή της κονσόλας ενώ η θέση της δευτερεύουσας πηγής βρίσκεται στη γωνία του χώρου πλησιέστερα στον εξωτερικό κινητήρα με βάση τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας για τις βέλτιστες θέσεις [1], [2],
4. Ο αλγόριθμος ψηφιακού ελέγχου είναι ο Feedforward FULMS [2], όπως προαναφέρθηκε, ώστε να γίνει εκμετάλλευση των φίλτρων IIR για τη μοντελοποίηση των πολύπλοκων συναρτήσεων μεταφοράς του ακουστικού πεδίου της κοιλότητας με τα τοιχώματά της, ενώ ο

αισθητήρας αναφοράς (του πρωτεύοντος θορύβου) τοποθετείται πλησίον του κινητήρα που παράγει τις τονικές συνιστώσες χαμηλών συχνοτήτων,

5. Το ψηφιακό σύστημα δειγματοληψίας και ελέγχου έχει συχνότητα $f_s=4000\text{Hz}$ και τα ψηφιακά φίλτρα έχουν τάξη 1200, με βάση τις συχνότητες ενδιαφέροντος του πρωτεύοντος θορύβου.



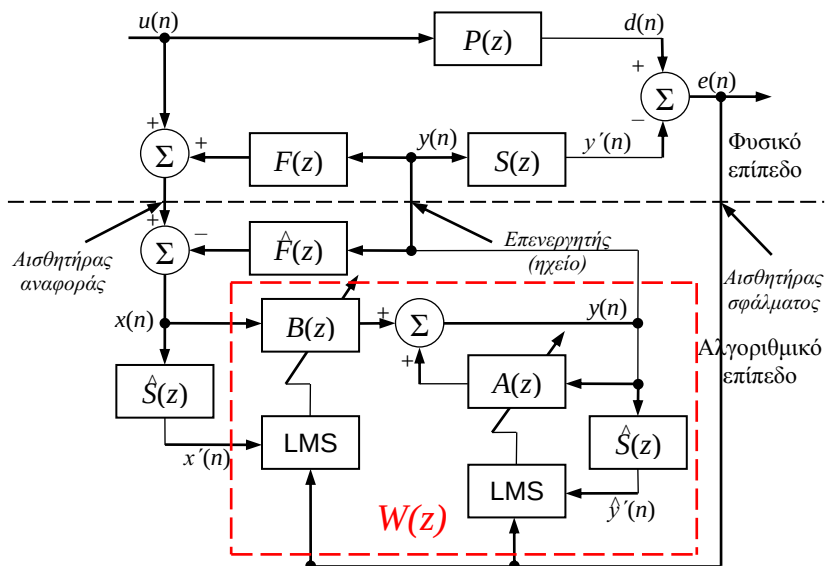
Σχήμα 1.2 Διάταξη ελεγχόμενης κοιλότητας και υποσυστημάτων ελεγκτή

2. Περιγραφή αλγορίθμου ψηφιακού ελέγχου

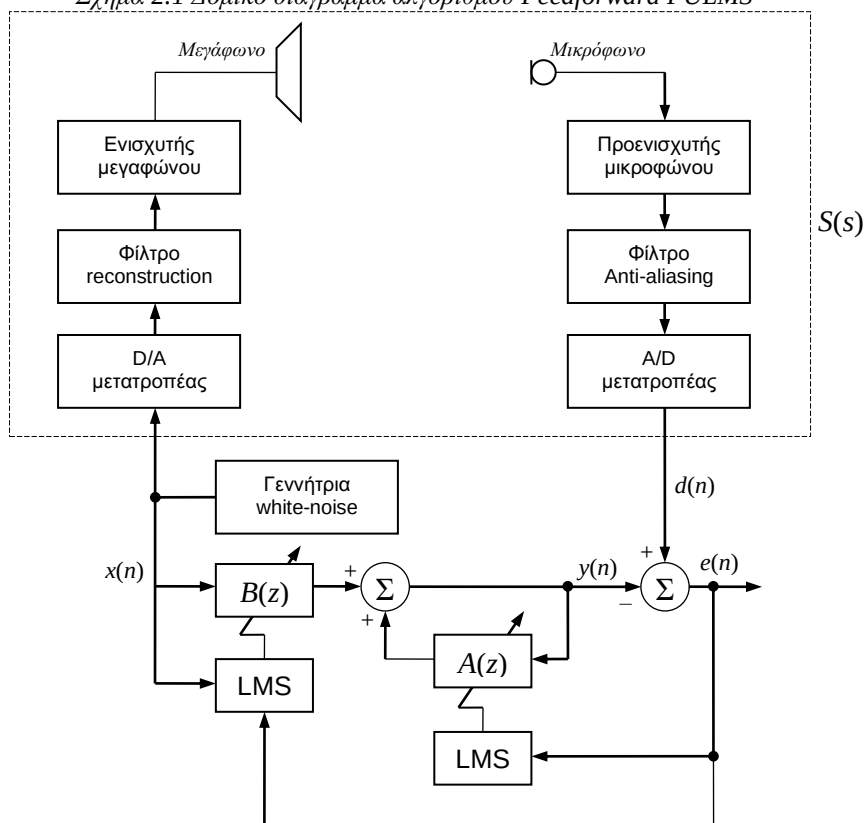
Ο αλγόριθμος Feedforward FULMS που προτείνεται για την εξεταζόμενη εφαρμογή έχει ως βασικά χαρακτηριστικά την ύπαρξη αισθητήρα αναφοράς και τη χρήση φίλτρων IIR. Ο αισθητήρας αναφοράς, που είναι ουσιαστικά ένα μικρόφωνο τοποθετημένο κοντά στην πρωτεύουσα πηγή, χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει τον πρωτεύοντα θόρυβο αρκετά πριν αυτός μεταδοθεί μέχρι την περιοχή ελέγχου, δηλαδή τον αισθητήρα - μικρόφωνο σφάλματος. Έτσι το σύστημα εκμεταλλεύεται το ότι η ταχύτητα μετάδοσης του ηλεκτρικού σήματος του αισθητήρα είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου. Τα φίλτρα IIR είναι πηλίκιο πολυωνυμικών συναρτήσεων μεταφοράς στο ψηφιακό πεδίο z , όπως φαίνεται στη γενική μορφή της εξίσωσης (2.1), όπου a_i , b_j είναι οι συντελεστές του φίλτρου και z^n είναι ο Z -μετασχηματισμός του σήματος τη n -στή χρονική στιγμή του παρελθόντος.

$$f_i(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{N-1} z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}} \quad (2.1)$$

Η δομή του αλγορίθμου σε διάγραμμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, όπου ως $P(z)$ συμβολίζεται η συνάρτηση μεταφοράς από την πρωτεύουσα πηγή έως τον αισθητήρα σφάλματος, $F(z)$ από τον επενεργητή (ηχείο - δευτερεύουσα πηγή) έως τον αισθητήρα αναφοράς και $S(z)$ από τον επενεργητή έως τον αισθητήρα σφάλματος. Αυτές οι συναρτήσεις μεταφοράς αφορούν το φυσικό επίπεδο και συμβολίζονται ως συναρτήσεις του z μόνο για λόγους απεικόνισης.



Σχήμα 2.1 Δομικό διάγραμμα αλγορίθμου Feedforward FULMS



Σχήμα 2.2 Μέτρηση ηλεκτροακουστικής συνάρτησης μεταφοράς με φίλτρο IIR

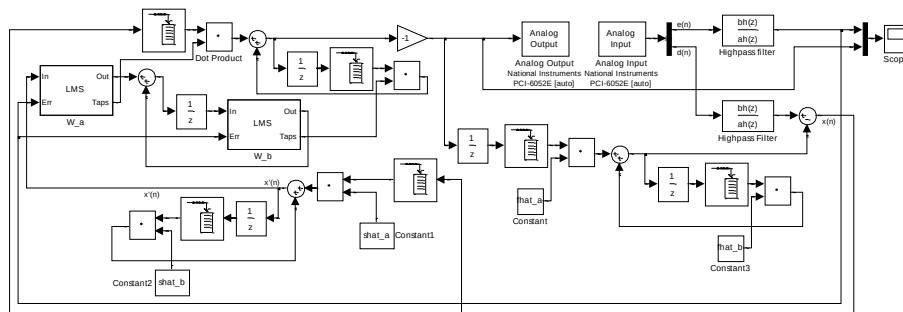
Οι προσεγγίσεις των $F(z)$ και $S(z)$ στον αλγόριθμο (ψηφιακό επίπεδο) συμβολίζονται $\hat{F}(z), \hat{S}(z)$ και, εφ' όσον αφορούν μόνο το σύστημα ANC, μπορούν να μετρηθούν. Πρακτικά η μέτρησή τους γίνεται μέσω γεννήτριας λευκού θορύβου και προσαρμοστικά φίλτρα, όπως π.χ. απεικονίζεται στο *Σχήμα 2.2* (περίπτωση χρήσης IIR προσαρμοστικού φίλτρου). Το βασικό προσαρμοστικό φίλτρο του ελεγκτή συμβολίζεται ως $W(z)$ και υλοποιείται ως IIR μέσω του πηλίκου δύο πολυωνυμικών φίλτρων $A(z)$ και $B(z)$.

3. Υλοποίηση ελεγκτή

Ο ψηφιακός ελεγκτής στην παρούσα εφαρμογή πραγματοποιήθηκε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και λογισμικού που επιτρέπει υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο (real-time). Ο *Πίνακας 3.1* δείχνει τα υποσυστήματα του ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν ενώ το *Σχήμα 3.1* δείχνει το δομικό διάγραμμα που προγραμματίστηκε στο λογισμικό πραγματικού χρόνου. Στο σχήμα φαίνεται η υλοποίηση του αλγορίθμου Feedforward FULMS, όπου δηλαδή το προσαρμοστικό φίλτρο ελέγχου $W(z)$ είναι IIR. Ταυτόχρονα, τα φίλτρα που μοντελοποιούν τις συναρτήσεις μεταφοράς υλοποιούνται και αυτά ως IIR. Οι μετρήσεις τους εισάγονται στον αλγόριθμο ως σταθερές (shat_a, shat_b και fhat_a, fhat_b) που πολλαπλασιάζονται εσωτερικά με τα αντίστοιχα buffered σήματα. Αυτή η υλοποίηση ήταν αναπόφευκτη λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φόρτου που προκύπτει από την χρήση ενός προσαρμοστικού και δύο στατικών IIR φίλτρων.

Πίνακας 3.1 Υποσυστήματα ελεγκτή ANC

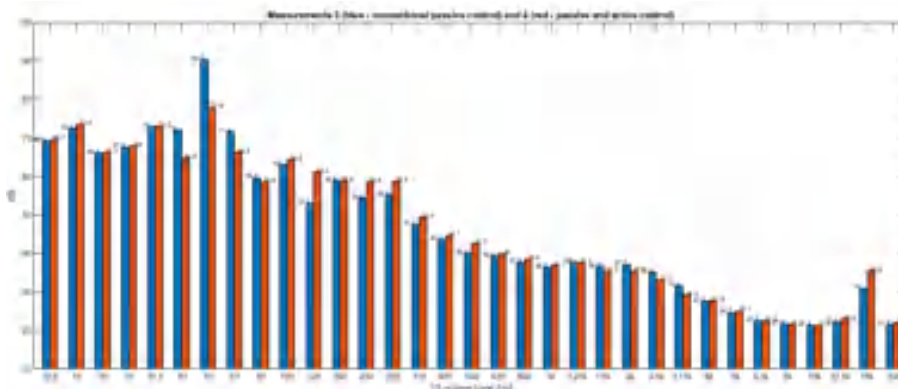
Αισθητήρες	Μικρόφωνα	Larson Davis 2541
	Προενισχυτές μικροφώνων	Larson Davis PRM900C
	Τροφοδοτικά μικροφώνων	Larson Davis 2200C
Δευτερεύουσα πηγή	Κώνος χαμηλών συχνοτήτων	Tonsil GDN 30/100/1
	Custom ενισχυτής	
Πρωτεύουσες πηγές	Ενεργά monitor ηχεία	M-Audio StudioPro 3
	Ενεργά monitor ηχεία	ESI nEAR06
Βαθυπερατά φίλτρα	Custom φίλτρα	Αναλογικά Butterworth 4 ^{ης} τάξης, με συχνότητα αποκοπής 1000Hz
A/D και D/A conv.	DAQ κάρτα	NI PCI-6052, 16-bit/222kHz, 16×2
	Πολυπλέκτης	NI BNC-2090
Υψιπερατά φίλτρα	Software υλοποίηση	Ψηφιακά Butterworth 4 ^{ης} τάξης, με συχνότητα αποκοπής 5Hz



Σχήμα 3.1 Προγραμματισμένος αλγόριθμος ελέγχου σε λογισμικό πραγματικού χρόνου

4. Αποτελέσματα εφαρμογής ελεγκτή

Το περιγραφόμενο σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου εφαρμόστηκε στο προβληματικό χειριστήριο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το γράφημα στο Σχήμα 4.1 δείχνει τη φασματική ανάλυση 1/3-οκτάβας από ηχομέτρο που τοποθετήθηκε σε πολύ μικρή απόσταση (~10cm) από τον αισθητήρα σφάλματος. Περιλαμβάνει δύο ηχομετρήσεις: α) Ηχομέτρηση χωρίς τη λειτουργία του συστήματος (conventional passive control) όπου αποτυπώνεται η ηχοστάθμη μόνο με την επίδραση της παθητικής ηχομόνωσης του χειριστηρίου και β) ηχομέτρηση με τη λειτουργία το ANC συστήματος (passive and active control) όπου αποτυπώνεται η πρόσθετη επίδραση του ενεργού ελέγχου.



Σχήμα 4.1 Ηχομετρήσεις χωρίς και με τη λειτουργία του συστήματος ANC

Από το γράφημα φαίνεται η αντιμετώπιση του τονικού θορύβου στα 50Hz που αποτελούσε το βασικό πρόβλημα. Το σύστημα ANC επιτυγχάνει πρόσθετη ηχομείωση $\Delta L=12,4\text{dB}$ στο σημείο ηχομέτρησης που εξαλείφει την τονικότητα και την ακουστική επιβάρυνση των χειριστών. Σημειώνεται πως η συνιστώσα των 100Hz που ήταν σημαντική στο κοντινό πεδίο της πηγής θορύβου (εξωτερικά του χειριστηρίου) είχε μειωθεί ήδη από την παθητική ηχομείωση και δεν επηρεάζεται από το σύστημα ANC. Οι υπόλοιπες φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται ελάχιστα από το σύστημα, εντός της αβεβαιότητας των ηχομετρήσεων.

5. Σύνοψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εφαρμογή ενός συστήματος ενεργού ελέγχου θορύβου σε μια κλειστή κοιλότητα βιομηχανικού χειριστηρίου ενώ η κύρια πρωτεύουσα πηγή θορύβου βρίσκεται εξωτερικά αυτού. Συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση κατάλληλου συστήματος ANC με ελαχιστοποίηση των υποσυστημάτων αισθητήρων και επενεργητών, αλλά και ψηφιακού αλγορίθμου ελέγχου με προσαρμοστικό φίλτρο IIR. Αυτός ο σχεδιασμός εξασφαλίζει ελαχιστοποιημένο κόστος και υψηλή απόδοση παρά την πολυπλοκότητα των συναρτήσεων μεταφοράς του φυσικού συστήματος που συμμετέχουν στο πρόβλημα.

Το προτεινόμενο σύστημα εφαρμόστηκε στο χειριστήριο ελέγχου μηχανής επιφανειακής κατεργασίας αλουμινίου που διαθέτει σύστημα κίνησης ισχυρών χαμηλών συχνοτήτων θορύβου. Το χειριστήριο είχε ηχομονωθεί στο παρελθόν με παθητικές μεθόδους που δεν είχαν καταφέρει να επιλύσουν το πρόβλημα της τονικής συνιστώσας των 50Hz. Αντίθετα, τεκμηριώθηκε μετρητικά ότι το σύστημα ANC επιτυγχάνει υψηλή ηχομείωση σε αυτή την προβληματική συνιστώσα εξαλείφοντας το πρόβλημα.

Η απλότητα των αισθητήρων και των επενεργητών (δύο μικρόφωνα και ένα ηχείο), το χαμηλό κόστος και η υψηλή απόδοση, όπως τεκμηριώθηκε με ηχομετρήσεις, καθιστούν τη λύση του προτεινόμενου συστήματος ιδανική για περιπτώσεις κλειστών κοιλοτήτων με θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων, κοντά στις πρώτες ακουστικές ιδιομορφές τους.

6. Αναφορές

- [1] P. A. Nelson and S. J. Elliott, *Active Control of Sound*, Academic Press, London, 1992
- [2] Σ. Τ. Μουζακίτης, *Διδακτορική Διατριβή Προσομοίωση Συστημάτων Μείωσης Θορύβου*, Αθήνα, 2006.
- [3] S. M. Kuo, D. R. Morgan, *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*, John Wiley & Sons, Canada, 1996



**Περιπτωσιολογική μελέτη (case study)
εντοπισμού ηχοδιαφυγών με
ακουστική απεικόνιση**

Θεόδωρος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός
Σύμβουλος Ακουστικής
στην ΑΛΦΑ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ Α.Ε.
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
teo@vibro.gr

Νικόλαος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός
M.Sc. Sound and Vibration
Studies
University of Southampton
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
tech@alphacoustic.com

Αντώνιος Αργουδέλης
B. Eng Industrial
Engineering
M. Sc. Environmental and
Architectural Acoustics
M. Sc. Project Management
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
antonios@alphacoustic.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά περιπτωσιολογική μελέτη (case study) εντοπισμού ηχοδιαφυγής σε σύνθετα διαχωριστικά ξύλου και γυάλινων πλαισίων εντός κτιρίου γραφείων με την μέθοδο της ακουστικής απεικόνισης. Η επιλογή αυτής της μεθόδου έναντι συμβατικής ηχομέτρησης έγινε με κριτήριο την ανάγκη για αυξημένη ακρίβεια εντοπισμού των σημείων ηχοδιαφυγής. Αξιοποιήθηκαν δύο (2) διαφορετικοί αισθητήρες ηχητικών κυμάτων με ξεχωριστά εύρη συχνοτήτων, έτσι ώστε να αξιολογηθεί παράλληλα η αποτελεσματικότητά τους στο κύριο φάσμα ακουστικού ενδιαφέροντος για παρόμοιου τύπου εφαρμογές ($f < 2\text{kHz}$). Στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη και αξιοποίηση της μεθόδου ακουστικής απεικόνισης. Με βάση την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε, καταγράφηκαν ορισμένα γενικά συμπεράσματα όπως η απλούστευση της διαδικασίας εντοπισμού ηχοδιαφυγών σε σύνθετες περιπτώσεις, η ακρίβεια της μεθόδου ακουστικής απεικόνισης, η μείωση του απαιτούμενου χρόνου ηχομετρήσεων, η αποφυγή καταστροφικών μεθόδων (NDT) για τον εντοπισμό τυχόν κατασκευαστικών αστοχιών, αλλά και η ταυτόχρονη ανίχνευση και ιεράρχηση σε εφαρμογές πολλαπλών εστιών ηχοδιαφυγών με διενέργεια μίας μόνο μέτρησης.

**Case study of sound leak detection with
acoustic imaging method**

ABSTRACT

This paper presents a case study of sound leakage detection in composite office partitions of wood and glass frames using the method of acoustic imaging. The use of this method over conventional sound measurement was based on the need for increased accuracy in locating sound leakage points. Two (2) different sound wave sensors with separate frequency ranges were used, in order to simultaneously evaluate their effectiveness in the main acoustic spectrum of interest for similar applications ($f < 2\text{kHz}$). The aim of the paper is to highlight and utilize the acoustic imaging method. Based on the processing of the results and the evaluation of the

methodology used, some general conclusions were recorded. Some of them are the simplification of the sound leak detection process in complex cases, the accuracy of the acoustic imaging method, the reduction of the required time of sound measurements, the avoidance of destructive methods (NDT) to detect any construction failures, but also the simultaneous detection and classification of multiple sources of sound leakage with a single measurement.

Εισαγωγή

Η εργασία αυτή αφορά περιπτωσιολογική μελέτη (case study) εντοπισμού ηχοδιαφυγής σε σύνθετα διαχωριστικά ξύλου και γυάλινων πλαισίων εντός κτιρίου γραφείων με την μέθοδο της ακουστικής απεικόνισης.

Στον χώρο που εξετάστηκε, υπήρχε ζήτημα ηχο-εμπιστευτικότητας μεταξύ του meeting room και των παρακείμενων γραφειακών χώρων. Λόγω του σύνθετου διαχωριστικού τοίχου (στοιχεία από ξύλο & γυάλινο πλαίσιο), ο εντοπισμός του κύριου σημείου ηχοδιαφυγής δεν ήταν εύκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Με την χρήση κατάλληλου οργάνου ακουστικής απεικόνισης, εντοπίστηκαν τα κύρια σημεία ηχοδιαφυγής. Κατά την διαδικασία των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί αισθητήρες, με σκοπό να ποσοτικοποιηθεί η αποτελεσματικότητά τους κυρίως στο φάσμα των χαμηλότερων συχνοτήτων (< 2 kHz).

Στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη και αξιοποίηση της ακουστικής απεικόνισης με την χρήση του κατάλληλου αισθητήρα μικροφώνων για την απλούστευση της διαδικασίας εντοπισμού ηχοδιαφυγών σε σύνθετες περιπτώσεις, με ταυτόχρονα πλεονεκτήματα την ακρίβεια, την μείωση του χρόνου ηχομετρήσεων και χωρίς τη διενέργεια καταστροφικών μεθόδων (NDT).

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του πίνακα 2 του Ελληνικού Κτιριοδομικού Κανονισμού (ΦΕΚ 3985 Β/2023).

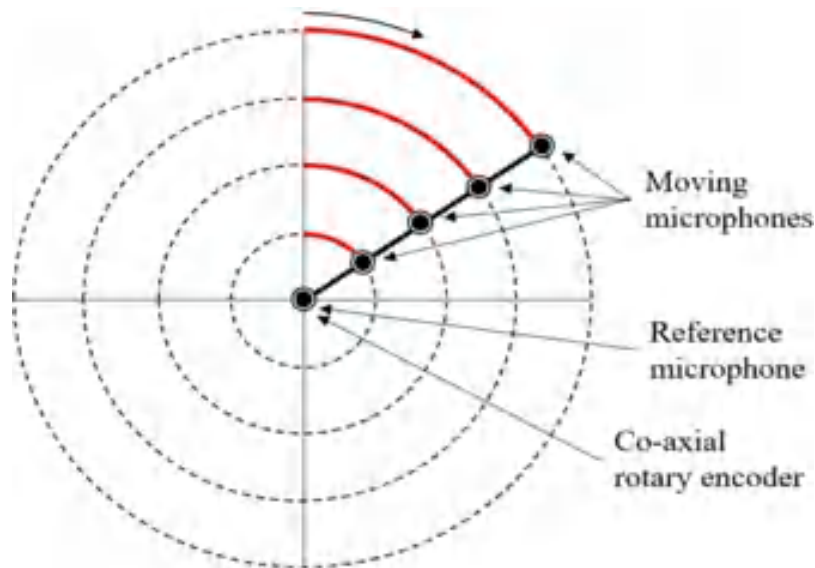
1. Ακουστική Απεικόνιση

Η ακουστική απεικόνιση είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για τον εντοπισμό και την ανάλυση πηγών ήχου σε συγκεκριμένο περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας μια κάμερα και μια διάταξη μικροφώνων συνδεδεμένων σε ένα σύστημα επεξεργασίας σήματος, είναι δυνατή η δημιουργία ενός «οπτικοακουστικού χάρτη» που απεικονίζει την ένταση και την ακριβή θέση των ηχητικών πηγών. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως η βιομηχανία και η ακουστική, με μια από τις πιο διαδεδομένες χρήσεις της να είναι ο αποτελεσματικός εντοπισμός ηχοδιαφυγών, δηλαδή ανεπιθύμητων διαρροών ήχου από ένα χώρο ή μια συσκευή εν λειτουργία [2].

Η αρχή λειτουργίας των μεθόδων ακουστικής απεικόνισης βασίζεται στην καταγραφή από κάθε μικρόφωνο της διαφοράς φάσης και του πλάτους του ηχητικού κύματος, τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται για να δημιουργήσουν έναν χάρτη έντασης ήχου σε μια δεδομένη επιφάνεια. Η επεξεργασία πραγματοποιείται συνήθως μέσω αντιστροφής της μεθόδου «δέσμης εκπομπής» (beamforming). Στη «δέσμη εκπομπής» μια συσκευή πομπός εκπέμπει καθορισμένες μορφές κυμάτων και το σήμα που μεταφέρουν κατευθύνεται προς μία συσκευή λήψης. Το σήμα αυτό συγκρίνεται με άλλα που διαχέονται προς κάθε κατεύθυνση. Στην ακουστική

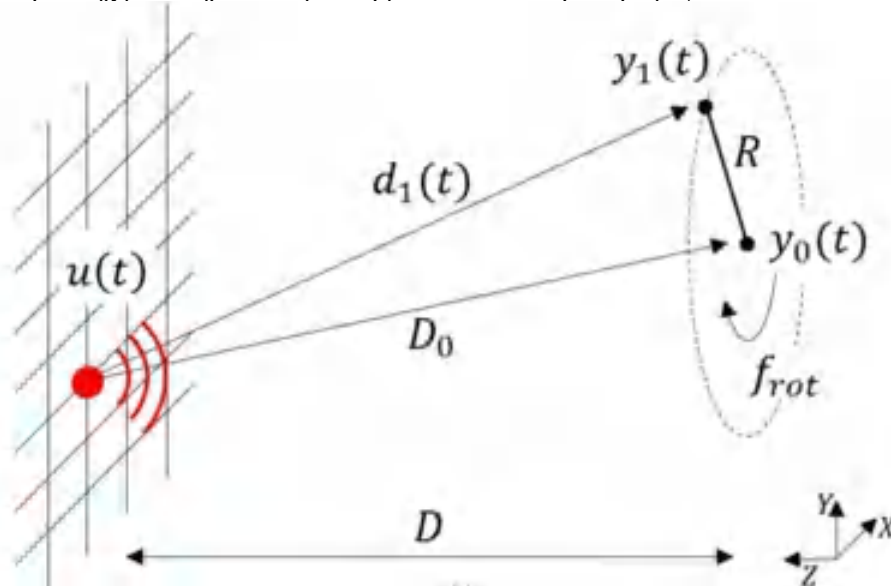
απεικόνιση η τεχνική αυτή αντιστρέφεται. Ενισχύονται τα ηχητικά σήματα που φτάνουν στα μικρόφωνα λήψης από μια επιθυμητή κατεύθυνση και ελαττώνονται τα ηχητικά κύματα από διαφορετικές κατευθύνσεις που θεωρούνται θόρυβος περιβάλλοντος. Έτσι επιτρέπεται η ανάδειξη των ισχυρότερων ηχητικών πηγών σε σχέση με το θόρυβο του περιβάλλοντος. Στην μέθοδο «δέσμης εκπομπής» (beamforming) χρησιμοποιούνται πολλαπλά μικρόφωνα τοποθετημένα σε σταθερές θέσεις για να εστιάζουν σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, δημιουργώντας έτσι τις "δέσμες" που επιτρέπουν την ανίχνευση ηχητικών πηγών με βάση τη γωνία πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων [3]. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό και τη διάταξη των μικροφώνων, καθώς και από την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου επεξεργασίας των σημάτων [4].

Μια νέα εδραιωμένη μέθοδος ακουστικής απεικόνισης είναι η Coherence Scanning Holography (CSH) που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Seven Bel. Σε αντίθεση με τις σταθερές θέσεις των μικροφώνων που αξιοποιούνται στην μέθοδο beamforming, εδώ προκρίνεται η χρήση κινούμενων μικροφώνων για τη συλλογή ακουστικών δεδομένων. Η καταγραφή του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος γίνεται κατά μήκος μιας κυκλικής τροχιάς. Λόγω της κίνησης των μικροφώνων σε σχέση με την σταθερή πηγή ήχου, τα δεδομένα του ήχου που λαμβάνονται σε μια πλήρη περιστροφή περιέχουν μια μετατόπιση των συχνοτήτων λόγω του φαινομένου Doppler. Ένα σταθερό μικρόφωνο στο κέντρο της περιοχής σάρωσης χρησιμοποιείται ως μικρόφωνο αναφοράς χωρίς την επίδραση της μετατόπισης Doppler. Τέλος, ένας μαγνητικός περιστροφικός κωδικοποιητής που είναι ομοαξονικά ευθυγραμμισμένος με τον άξονα περιστροφής της γραμμικής διάταξης, μετρά τη γωνιακή θέση σε σχέση με τον προκαθορισμένο άξονα περιστροφής. [1]



Εικόνα 1.1. Σκίτσο περιστρεφόμενης διάταξης σάρωσή ήχου με μικρόφωνο αναφοράς και κινούμενα μικρόφωνα [1]

Για την επεξεργασία, τον υπολογισμό και την δημιουργία ακουστικών εικόνων από τα δεδομένα ήχου που λαμβάνονται, δημιουργείται ένα κατάλληλο θεωρητικό «επίπεδο ανακατασκευής» (μητρώο) το οποίο είναι παράλληλο με το επίπεδο της μέτρησης, σε απόσταση όπου εντοπίζεται η εκάστοτε ηχητική πηγή. Ως πρώτο βήμα, το ηχητικό σήμα του κινούμενου μικροφώνου μεταφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο του «επιπέδου ανακατασκευής» στον κατάλληλο χρόνο. Το ηχητικό σήμα που έχει προσληφθεί από το κινούμενο μικρόφωνο επεξεργάζεται έτσι ώστε να φαίνεται ότι εκπέμπεται από το συγκεκριμένο σημείο. Σημειώνεται ότι η μετατόπιση Doppler αντισταθμίζεται πλήρως για το εκάστοτε σημείο όπου βρίσκεται πραγματικά μια ηχητική πηγή. Για τα υπόλοιπα σημεία μακριά από τη σημειακή πηγή, συνυπολογίζεται μια πρόσθετη μετατόπιση Doppler στο διαδιδόμενο ηχητικό σήμα που προσλαμβάνουν τα κινούμενα μικρόφωνα.



Εικόνα 1.2. Σκίτσο με μικρόφωνο αναφοράς και κινούμενα μικρόφωνα συμπεριλαμβανομένου του επιπέδου μέτρησης και ανακατασκευής [1]

Αξιοποιώντας την συσχέτιση μεταξύ των δύο προσλαμβανόμενων σημάτων που προέρχονται από τα κινούμενα μικρόφωνα και το μικρόφωνο αναφοράς, υπολογίζεται αλγοριθμικά μια ισχυρή τιμή για το σημείο όπου βρίσκεται στην πραγματικότητα μια πηγή ήχου και μια ασθενής τιμή για σημεία όπου δεν υπάρχει καθόλου ή υπάρχει μικρή εκπομπή ήχου. Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός χρωματικού χάρτη που αντιπροσωπεύει την κατανομή των πηγών ήχου σε ολόκληρο το επίπεδο ανακατασκευής με τις αντίστοιχες τιμές ηχητικής πίεσης. Τέλος, ο χάρτης επικαλύπτεται με μια ληφθήσα εικόνα του πεδίου της μέτρησης για να δώσει στον χρήστη μια σαφή ένδειξη της χωρικής θέσης των ηχητικών πηγών [1].

Η μέθοδος CSH ξεχωρίζει λόγω της βασικής αρχής λειτουργίας της, απαιτώντας πολύ λιγότερα μικρόφωνα-δέκτες των ηχητικών κυμάτων. Λόγω του κυκλικού επιπέδου το οποίο σαρώνουν η καταγραφή ακουστικών δεδομένων από κάθε

κατεύθυνση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αναγνώριση πηγών ήχου σε περίπλοκα περιβάλλοντα. Επιπρόσθετα αυτό οδηγεί σε μικρότερες διατάξεις καταγραφής. Η μέθοδος CSH είναι προτιμητέα για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια συνδυαστικά με ταχύτητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων [2].

2. Εξοπλισμός & Μεθοδολογία Μετρήσεων

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν με τους αισθητήρες P132 (Frequency range: 250Hz – 10,5 kHz) & P50 (Frequency range: 700 Hz – 10,5 kHz) της εταιρείας Seven Bel GmbH οι οποίοι διαθέτουν 14 και 6 μικρόφωνα MEMS αντίστοιχα. Τόσο η επί τόπου, όσο και η μετέπειτα αλγοριθμική επεξεργασία τους έγινε με την χρήση του λογισμικού Acoutect της ίδιας εταιρείας.

Οι μετρήσεις έγιναν σε κλειστό χώρο γραφείων και συγκεκριμένα στο meeting room. Εντός του meeting room τοποθετήθηκε σε κατάλληλη απόσταση (2-3m) από το υπό εξέταση χώρισμα και $\geq 1.5\text{m}$ από ανακλαστικές επιφάνειες, ο εξοπλισμός λήψης και καταγραφής των ηχητικών κυμάτων (αισθητήρας – δέκτης). Εκτός του χώρου, τοποθετήθηκε σε απόσταση μεγαλύτερη των τριών (3) μέτρων σύστημα ενισχυτή-ηχείου με σήμα λευκού θορύβου σε ζώνες του 1/3 οκτάβας (σύστημα εκπομπού) σε στάθμη ηχητικής πίεσης 60dB(A).

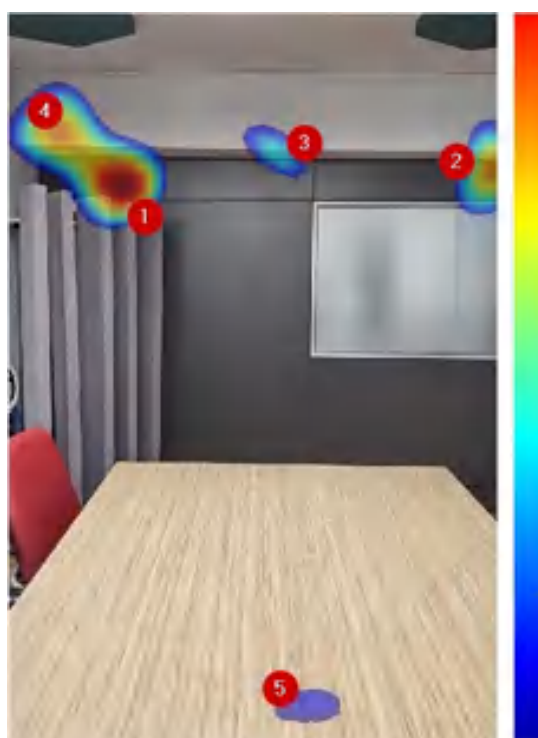
Μετά το πέρας της μέτρησης πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με χρήση κατάλληλου λογισμικού, ώστε να αναδειχθούν επί τόπου τα κυριότερα σημεία ηχητικών διαφυγών. Ακόμα, με σκοπό την ποιοτική αξιολόγηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι δύο αισθητήρες που αναφέρθηκαν, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με την χρήση λογισμικού κυρίως στις χαμηλότερες συχνότητες ($< 2\text{kHz}$) σε επόμενο στάδιο.

3. Αποτελέσματα μετρήσεων

Με βάση την μεθοδολογία που περιγράφηκε πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων για την επιβεβαίωση του αποτελέσματος με κύριο στόχο τον εντοπισμό των ηχοδιαφυγών μεταξύ του meeting room και παρακείμενου γραφειακού περιβάλλοντος. Επιπλέον στόχος ήταν η ποιοτική αξιολόγηση των διαφορετικών διατάξεων αισθητήρων μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίπτωση του συχνοτικού εύρους του αισθητήρα στην ακουστική αποτύπωση που παράγεται αλγοριθμικά και κατ' επέκταση στην δυνατότητα εντοπισμού των κύριων ηχητικών πηγών στο εξεταζόμενο πεδίο.

Στην παρακάτω εικόνα η ανάλυση των δεδομένων που λήφθηκαν από τον αισθητήρα P132 έδωσε σαν αποτέλεσμα τα κύρια σημεία ηχοδιαφυγής που αποτυπώνονται χρωματικά ανάλογα με την έντασή τους. Πιο συγκεκριμένα, το κυριότερο σημείο διαφυγής του ήχου παρουσιάζεται στο αριστερό πάνω μέρος του τοίχου (σημείο 1), στο σημείο συναρμογής της εξωτερικής ξύλινης επένδυσης του διαχωριστικού (SPL=39.1dB). Το δεύτερο σημείο ενδιαφέροντος χαμηλότερης έντασης είναι στην άνω δεξιά πλευρά του διαχωριστικού (σημείο 2) και συγκεκριμένα στο σημείο που εφάπτεται με το δομικό στοιχείο του κτιρίου (δοκάρι). Τέλος μια αρκετά μικρότερης έντασης εστία ηχοδιαφυγής (SPL=35.7dB), παρατηρήθηκε πάλι στο σημείο συναρμογής του διαχωριστικού με το δομικό στοιχείο αλλά στο κέντρο περίπου της τοιχοποιίας (σημείο 3).

Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ακόμα, ότι με την μέθοδο της ακουστικής απεικόνισης καταγράφονται και οι κυριότερες ηχητικές ανακλάσεις στο υπό εξέταση πεδίο. Στην προκειμένη περίπτωση παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στο σημείο 4, δίπλα στο σημείο της πρωτεύουσας ηχητικής διαφυγής αλλά και στην επιφάνεια του τραπεζιού (σημείο 5). Από τον χρωματισμό είναι εμφανές ότι η ανάκλαση στο σημείο του δομικού στοιχείου, είναι αρκετά πιο έντονη λόγω της εγγύτητας αλλά και της έντασης της κύριας ηχοδιαφυγής.



Εικόνα 3.2 Ακουστική Απεικόνιση με την πηγή σε παρακείμενο χώρο γραφείων – Αισθητήρας P132

Και στα τρία σημεία που αναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε αυτοψία κατά την οποία εντοπίστηκαν κατασκευαστικές ατέλειες όπως ελλιπής σφράγιση μεταξύ δομικού στοιχείου και σύνθετου διαχωριστικού αλλά και μη σωστή εφαρμογή της ξύλινης επένδυσης με αποτέλεσμα την ύπαρξη διακένου και επομένως διαφυγή του θορύβου. Επίσης επιβεβαιώθηκαν και οπτικά τα αποτελέσματα της ακουστικής απεικόνισης, δεδομένου ότι η συναρμογή της μεταλλικής κάσας του κουφώματος με την υπόλοιπη τοιχοποιία και το υαλοστάσιο δεν παρουσιάζουν κάποιο ορατό διάκενο ή μη ενδεδειγμένη από ακουστικής σκοπιάς κατασκευή.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των καταγραφών που λήφθηκαν με τον αισθητήρα P50. Όπως είναι εμφανές, η εικόνα που σχηματίστηκε δεν παρουσιάζει ομοιότητες ή κοινά σημεία με την προηγούμενη ανάλυση. Η κύρια αιτία αυτού, είναι το εύρος των συχνοτήτων που είναι ικανός να καταγράψει ο συγκεκριμένος αισθητήρας (700 Hz – 10,5 kHz). Αποδεικνύεται πως

το κατώφλι των 700Hz για εφαρμογές παρόμοιου τύπου είναι αρκετά υψηλό δεδομένου ότι ο αισθητήρας δεν μπορεί να καταγράψει πληροφορία κάτω από αυτή την συχνότητα. Με βάση την ανάλυση της προηγούμενης μέτρησης, η κύρια ηχητική στάθμη που εντοπίστηκε εντός του δωματίου, ήταν στις συχνότητες 250-900Hz. Λόγω του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα στην παρούσα μέτρηση, μεγάλο μέρος της των ηχητικών κυμάτων στις συχνότητες αυτές δεν κατέστη δυνατό να καταγραφεί.



Εικόνα 3.2 Ακουστική Απεικόνιση με την πηγή σε παρακείμενο χώρο γραφείων – Αισθητήρας P50

Τέλος, αξιολογώντας τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων με τον P50 αισθητήρα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η θύρα που βρίσκεται δεξιά της υπό εξέταση τοιχοποιίας αποτελεί την αιτία που όλες οι ηχοστάθμες καταγράφονται στην δεξιά πλευρά της εικόνας. Παρότι η θύρα ήταν κλειστή κατά την διάρκεια των μετρήσεων, ηχητικά κύματα στις υψηλές συχνότητες μέσω διαφυγών εντοπίστηκαν από τον αισθητήρα και αποτυπώθηκαν κυρίως ως ανάκλαση στον υαλοπίνακα του meeting room, αλλά και δευτερευόντως στο τραπέζι και το ξύλινο στοιχείο της τοιχοποιίας. Η στάθμη της ηχητικής πίεσης που καταγράφηκε από τα μικρόφωνα του αισθητήρα ήταν στο μέγιστο (σημείο με κόκκινο χρώμα) SPL=37.7dB, ίδιας περίπου έντασης με την προηγούμενη μέτρηση.

4. Συμπεράσματα

Μετά την φασματική και χρονική επεξεργασία των καταγραφών-απεικονίσεων και την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, μπορούν να εξαχθούν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- (1) Αξιοποιώντας την μέθοδο της ακουστικής απεικόνισης, εντοπίστηκαν τα κύρια σημεία ηχοδιαφυγής του σύνθετου χωρίσματος. Η σύγκριση των τιμών της ηχοστάθμης που καταγράφηκαν σε διαφορετικά σημεία του διαχωριστικού ανέδειξε τον βαθμό σημαντικότητας των σημείων ηχοδιαφυγής, γεγονός που οδήγησε στην ιεράρχησή τους. Με τον τρόπο αυτό οι ηχομονωτικές ενέργειες πραγματοποιήθηκαν εστιάζοντας στην σειρά σημαντικότητας.
- (2) Στην υπό εξέταση εφαρμογή, η σύγκριση των δεδομένων που κατέγραψαν οι δύο διαφορετικοί αισθητήρες P132 & P50 φαίνεται να παρουσιάζουν αξιόλογες διαφορές. Συγκεκριμένα εντοπίζονται σωστά οι ηχητικές πηγές λόγω διαφυγών από την διάταξη μικροφώνων που έχει ευρύτερο συχνοτικό πεδίο λειτουργίας (P132), καθώς η ηχητική ενέργεια των χαμηλών συχνοτήτων είναι ευκολότερο να διαπερνά δομικά στοιχεία του χώρου. Επιπρόσθετα ο αισθητήρας με χαμηλότερο συχνοτικό εύρος, παρουσιάζει αρκετά εστιασμένα τα σημεία των πηγών διαφυγής του ήχου. Αντίθετα η διάταξη μικροφώνων με εύρος λειτουργίας άνω των 700Hz παρουσιάζει πιο «ανοιγμένο» προφίλ των πηγών θορύβου που εντοπίζονται. Ακόμη, λόγω των ηχητικών δεδομένων από τις υψηλότερες συχνότητες που καταγράφει, ουσιαστικά «αποκλείει» στην συγκεκριμένη εφαρμογή τον εντοπισμό των κύριων ηχητικών διαφυγών οδηγώντας σε εσφαλμένη εκτίμηση της κατάστασης. Γίνεται επομένως σαφές, ότι η χρήση της κατάλληλης διάταξης μικροφώνων θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.
- (3) Η μέθοδος της ακουστικής απεικόνισης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Μεγαλύτερη ακρίβεια, εντοπισμό και οπτική αναπαράσταση πηγών θορύβου σε πραγματικό χρόνο, κάλυψη μεγάλων περιοχών και ταυτόχρονη ανίχνευση πολλαπλών πηγών θορύβου. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται χρόνος και πόροι που απαιτούνται για την διενέργεια των ηχομετρήσεων. Παράλληλα βελτιώνεται το τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας των ακουστικών δεδομένων. Επίσης, ανιχνεύει ηχομονωτικές κατασκευαστικές ατέλειες χωρίς φυσική επέμβαση (μη καταστροφικός έλεγχος).

5. Βιβλιογραφία

- [1] Seven Bel. "What is Coherence Scanning Holography?" Seven Bel Website.
- [2] Gan W.S. "Acoustical Imaging: Techniques and Applications for Engineers." Wiley (2012).
- [3] Hald, J. "Basic theory and advanced methods for acoustic holography and beamforming." Technical University of Denmark (2009).
- [4] Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. "Array signal processing: concepts and techniques." PTR Prentice Hall (1993).



Διερεύνηση δονητικής συμπεριφοράς παραδοσιακού ξύλινου και εκτυπωμένου τζουρά

Μάρκος Κατσίπης¹, Ορέστης Μιχαηλίδης¹, Αθανάσιος Σκουτέλης¹, Γεώργιος
Σκουτέλης¹, Σπύρος Μπρέζας¹, Ιωάννης Ορφανός¹, Νεκτάριος Παπαδογιάννης¹,
Μάκης Μπακαρέζος¹, Βασίλης Δημητρίου¹, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,*}

¹Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133
Περιβόλια, Ρέθυμνο

*vagfem@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιείται τη μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς παραδοσιακού και 3d-εκτυπωμένου τζουρά μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων και πειραματικών μετρήσεων. Το τρισδιάστατο μοντέλο ενός παραδοσιακά κατασκευασμένου έγχορδου τζουρά δημιουργείται με τη χρήση λογισμικού τρισδιάστατης υπολογιστικής σχεδίασης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου, που αποτελείται από το καπάκι, τον καβαλάρη, τα καμάρια και το σκάφος. Υλοποιούνται επίσης προσομοιώσεις ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων, μόνο στο καπάκι του οργάνου, με οριακές συνθήκες που ανταποκρίνονται στις πειραματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις εκτελούμενες με τη μέθοδο της χρονικά ολοκληρωμένης ψηφιακής ολογραφίας κοκκίδων – ESPI, τόσο στο καπάκι αλλά και σε ολόκληρο το συναρμολόγημα του τζουρά. Ακολούθως, πραγματοποιούνται υπολογιστικές προσομοιώσεις, με αντικατάσταση των ξύλινων τμημάτων από πολυμερή (PETG) που ενδείκνυνται για τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της δονητικής ανάλυσης που λήφθηκαν για το παραδοσιακό ξύλινο όργανο. Αυτή η μελέτη είναι κρίσιμη στη θεμελίωση της κατασκευής μουσικών οργάνων από εναλλακτικά υλικά, με υψηλή βιωσιμότητα, ανθεκτικότητα και προδιαγεγραμμένες ακουστικές ιδιότητες, λιγότερο επηρεαζόμενες από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία.

Study of the vibrational behavior of traditional – wooden and 3d printed tzouras

Markos Katsipis¹, Orestis Michaelides¹, Athanasios Skoutelis¹, Georgios Skoutelis¹,
Spyros Brezas¹, Ioannis Orphanos¹, Nektarios Papadogiannis¹, Makis Bakarezos¹,
Vasilis Dimitriou¹, Evaggelos Kaselouris^{1,*}

¹Laboratory of Acoustics and Optoacoustics, Department of music technology and
Acoustics, Hellenic Mediterranean University, 74133 Perivolias, Rethymno

*vagfem@hmu.gr

ABSTRACT

The present study deals with the study of the vibrational behavior of traditional and 3d-printed Tzouras by means of computer simulations and experimental measurements. The 3D model of the traditional stringed instrument is created using 3D computer aided design software. The finite element method is used to model and simulate the vibrational behavior of the instrument, which consists of the top plate, the bridge, the bars and the main body. Simulations of modal analysis are also performed, only on the top plate of the instrument, with boundary conditions corresponding to the experimental measurements. The results are compared with experimental measurements performed with the electro-speckle interferometry – ESPI method, both on the top plate and on the whole assembly of tzouras. Next, finite element simulations are carried out, with the replacement of the wooden parts by polymers (PETG), suitable for 3D printing. The results are compared with those of the vibrational analysis obtained from the traditional wooden instrument. This study is essential in the foundation of the construction of musical instruments from alternative materials, with high sustainability, durability and prescribed acoustic properties, less affected by environmental factors such as temperature and humidity.

Εισαγωγή

Η μουσική και τα μουσικά όργανα είναι μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς του ανθρώπου για χιλιάδες χρόνια. Η παραδοσιακή κατασκευή των οργάνων γίνεται από υλικά όπως δέρμα, μέταλλο και ξύλο. Το σώμα των έγχορδων μουσικών οργάνων γίνεται συνήθως από ξύλο. Τα ξύλινα μουσικά όργανα επηρεάζονται έντονα από παράγοντες όπως υγρασία και θερμοκρασία με απρόβλεπτο τρόπο, επηρεάζοντας την απόδοσή τους. Η χρήση του ξύλου έχει επίσης οικολογικό αντίκτυπο, επιβάλλοντας περαιτέρω περιορισμούς, ειδικά όταν επιλέγονται περιζήτητα και σπάνια είδη δέντρων. Η ανάπτυξη και χρήση νέων και εναλλακτικών υλικών έχει δημιουργήσει καινούργιες δυνατότητες στην κατασκευή μουσικών οργάνων. Τα σύνθετα ή εναλλακτικά υλικά είναι πολύ λιγότερο επιρρεπή σε περιβαλλοντικές αλλαγές. Η χρήση τους εξασφαλίζει πιο εύκολη και ελέγξιμη διαδικασία κατασκευής. Η ανθεκτικότητα των εναλλακτικών υλικών είναι υψηλή, επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιούνται για μουσικά όργανα, όπου εφαρμόζονται υψηλές τάσεις, και ταυτόχρονα είναι ελαφριά, παρέχοντας έτσι άνεση και καλύτερη αναπαραγωγή στον ερμηνευτή. Στις μέρες μας, εκτός από οργανοποιούς και επιστήμονες, τα μουσικά όργανα από εναλλακτικά υλικά είναι αποδεκτά και από τους περισσότερους ερμηνευτές [1,2]. Τέτοια υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή παραδοσιακών μουσικών οργάνων, ωστόσο, σε πολύ περιορισμένο βαθμό.

Στη βιβλιογραφία, αρκετοί συγγραφείς έχουν μελετήσει τη δονητική συμπεριφορά των μουσικών οργάνων χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις. Στην [3], η δονητική συμπεριφορά μιας βιόλα ντα γκάμπα μελετήθηκε μέσω της ηλεκτρονικής συμβολομετρίας κοκκίδων (ESPI) και προσομοιώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η δονητική ανάλυση του σετάρ, ενός περσικού λαούτου με μακρύ λαιμό, μελετήθηκε [4] μέσω ενός συνδυασμού πειραμάτων με κρουστικό σφυρί ανάδρασης και δονόμετρο Laser

Doppler, και προσομοιώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Για τον πλήρη χαρακτηρισμό των μουσικών οργάνων, αναπτύξαμε μια ολοκληρωμένη μέθοδο [5], η οποία συνδυάζει μετρήσεις ESPI, μετρήσεις κρουστικής απόκρισης, μοντελοποίηση και προσομοιώσεις με FEM. Εδώ, παρουσιάζουμε την εφαρμογή αυτής της μεθόδου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη δονητική αξιολόγηση ενός ξύλινου τζουρά, ξύλινων και εκτυπωμένων καπακιών τζουρά. Ένας παραδοσιακός ξύλινος τζουράς και ξύλινα καπάκια τζουρά (χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά) κατασκευάστηκαν και αξιολογήθηκαν με πειραματικές μετρήσεις ESPI. Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά του οργάνου αναφοράς, δημιουργήθηκε τρισδιάστατο σχέδιο CAD και κατασκευάστηκαν εκτυπωμένα καπάκια τζουρά από PETG, τα οποία αξιολογήθηκαν επίσης με ESPI.

Δημιουργήθηκε μοντέλο FEM για τα ξύλινα καπάκια με τα κολλημένα καμάρια τους, το ολοκληρωμένο σώμα του τζουρά και τα εκτυπωμένα καπάκια από PETG. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων με FEM, ήταν σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα της ESPI. Τα μοντέλα CAD-FEM επιτρέπουν τροποποιήσεις των παραμέτρων του μουσικού οργάνου, όπως τις ιδιότητες του εναλλακτικού υλικού καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Ως εκ τούτου, η διαδικασία κατασκευής και η δονητική συμπεριφορά του τζουρά μπορούν να βελτιστοποιηθούν μέσω της προτεινόμενης ολοκληρωμένης μεθόδου.

1. Κατασκευή

1.1 Κατασκευή ξύλινου μουσικού οργάνου

Ο τζουράς είναι ελληνικό έγχορδο μουσικό όργανο, αχλαδόσχημου σώματος, μικρογραφία του μπουζουκιού και περίπου διπλάσιο από το μπαγλαμά. Κατασκευάζεται από τα ίδια υλικά και με παρόμοιες τεχνικές με το μπουζούκι και ανήκει στα έγχορδα λαϊκά όργανα της οικογένειας των λαούτων. Το σώμα του ξύλινου οργάνου που μελετήθηκε είναι σκαφτό από ένα ενιαίο κομμάτι καρυδιάς. Τα ξύλα που χρησιμοποιεί στο εργαστήριο ο οργανοποιός είναι παλιά και με πολλή καλή απόκριση στον ήχο. Τα υπόλοιπα μέρη του οργάνου κατασκευάστηκαν από διαφορετικά είδη ξύλων. Τα διαφορετικά κομμάτια ξύλου διαμορφώνονταν και ενώνονταν σταδιακά με κόλλα σε συνθέσεις – τμήματα του οργάνου. Κάθε φορά που ένα τμήμα του οργάνου προστιγόταν σε κάποιο άλλο τμήμα του οργάνου, ξαναδιαμορφωνόταν ώστε να ετοιμαστεί για το επόμενο βήμα της σύνθεσης. Οι ενώσεις με ψαρόκολλα χρειάζονται ημέρες και για αυτό η κατασκευή δεν είναι γραμμική αλλά με παράλληλες εργασίες μέχρι να τελειώσει το όργανο. Επιγραμματικά αναφέρονται τα στάδια κατασκευής του οργάνου: η δημιουργία σκάφους (καρυδιά) με σκαφτό τρόπο, η κατασκευή μάνικου με τρία ξύλα από σφένδαμο και καρυδιά, η κατασκευή του καπακιού με ξύλο έλατου και καμάρια (δοκαράκια υποστήριξης του καπακιού) από πεύκο, η προετοιμασία της ταστιέρας από έβενο, η δημιουργία μόρσου (χελιδονοουρά) στο σώμα του οργάνου, η εφαρμογή στο μάνικο με κλίση, το κάψιμο κόλλας, το τρίψιμο και δημιουργία τρύπας στο καπάκι, η χάραξη των τάσεων στην ταστιέρα, το τρίψιμο του σκάφους, η κόλληση με το καπάκι, η δημιουργία του καράουλου, ο στολισμός του σκάφους, η κόλληση της ταστιέρας, η μορφοποίηση του μάνικου και του καράουλου, η

διακόσμηση ταστιέρας με όστρακα, η τοποθέτηση των τάστων, το άνοιγμα τρυπών για τα κλειδιά, το λουστράρισμα του οργάνου και τέλος η αρμάτωση του οργάνου με τοποθέτηση κλειδιών, καβαλάρη, χορδιέρας και χορδών.



Εικόνα 1.1 Ο τζουράς που κατασκευάστηκε

Ακολούθησε η κατασκευή καπακιού ίδιου με αυτό του οργάνου, με ίδιες υποστηρίξεις - καμάρια κολλημένα πάνω του και με ίδια υλικά και πάχη.

1.2 Δημιουργία CAD γεωμετρίας

Με βάση μετρήσεις πάνω στα διάφορα μέρη του τζουρά δημιουργήθηκαν τα βασικά δισδιάστατα σχέδια της γεωμετρίας του οργάνου από τα οποία προέκυψαν οι τρισδιάστατες μορφές των τμημάτων και ολόκληρου του οργάνου σε πρόγραμμα CAD. Από την κατασκευή part (τμημάτων) του οργάνου έγινε η σύνθεσή του σε πλήρες Assembly του καπακιού με τα καμάρια, τον καβαλάρη, το σκάφος και τα υπόλοιπα μέρη του τζουρά. Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο για την ψηφιακή μοντελοποίηση του οργάνου, για λόγους καταγραφής και προσομοίωσης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την αντιγραφή του οργάνου είναι απλή μέτρηση με χάρακα και παχύμετρο. Για αυτό υπήρχαν τμήματα του οργάνου με πολύπλοκη γεωμετρία που δεν ήταν δυνατό να καταγραφούν ακριβώς, όπως το σκαφτό σκάφος του τζουρά. Για να γίνει αυτό χρειάζεται 3D scan του μετρούμενου αντικειμένου και αντίστροφη μηχανική (reverse engineering), όπως έχει γίνει σε παλαιότερες εργασίες και είναι στα άμεσα σχέδια επόμενων εργασιών.



Εικόνα 1.2 Δημιουργία CAD γεωμετρίας τζουρά

1.3 Πειραματικές μετρήσεις

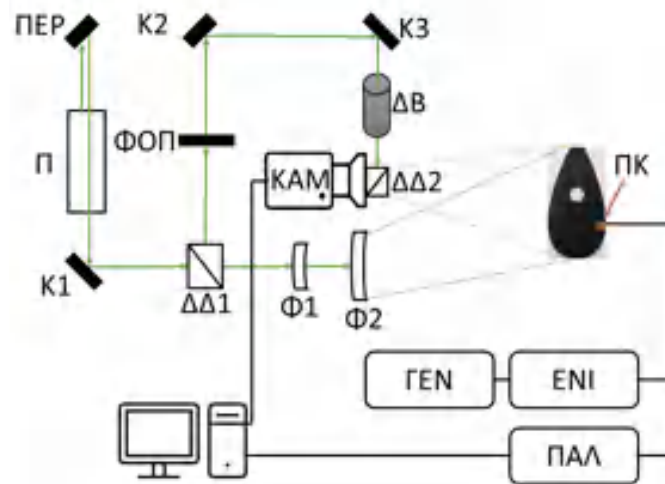
Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε το καπάκι από έλατο 2,4 mm με τα κολλημένα καμάρια από πεύκο και το σώμα του τζουρά, στις πειραματικές διατάξεις του εργαστηρίου Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής στο Ρέθυμνο. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ESPI στο καπάκι και στο πλήρες όργανο.



Εικόνα 1.3 Βάση στήριξης για καπάκι με καμάρια (αριστερά) και για τζουρά (δεξιά)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων συγκρίνονται με πειραματικές μετρήσεις εκτελούμενες με τη μέθοδο της χρονικά ολοκληρωμένης ψηφιακής ολογραφίας κοκκίδων – ESPI, τόσο στο καπάκι αλλά και σε ολόκληρο το συναρμολόγημα του τζουρά. Η διάταξη της ESPI βασίζεται σε συνεχές laser μήκους κύματος 532 nm. Η κύρια δέσμη του laser διαχωρίζεται σε δύο με τη βοήθεια διαχωριστή και ειδικοί καθρέπτες τις ανακλούν. Σύστημα ειδικών φακών τοποθετείται στην εστία της πρώτης δέσμης (pump) και φωτίζει τον υπό μελέτη τζουρά στο πράσινο χρώμα του laser. Η δεύτερη δέσμη, καλούμενη ως δέσμη αναφοράς (probe), κατευθύνεται με καθρέπτες σε κάμερα που καταγράφει το είδωλο του φωτιζόμενου αντικειμένου και ταυτόχρονα καταγράφει και τη δέσμη αναφοράς. Η κάμερα είναι συνδεδεμένη με υπολογιστή στον οποίο γίνεται επεξεργασία της λαμβανόμενης εικόνας και απεικονίζεται το αποτέλεσμα της

δονητικής συμπεριφοράς του οργάνου. Ηχείο συνδεδεμένο με γεννήτρια ήχου ηχοβολεί στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το υπό μελέτη όργανο.



Εικόνα 1.4 Ολογραφική απεικόνιση με χρήση της ESPI [5]

1.4 Μοντελοποίηση και FEM προσομοιώσεις

Η υπολογιστική προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με χρήση λογισμικού απαιτεί συγκεκριμένα στάδια. Το πρώτο είναι η δημιουργία της γεωμετρίας της κατασκευής σε πρόγραμμα CAD. Έπειτα ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος, με πεπερασμένα στοιχεία, του μοντέλου και η επιλογή του είδους της επίλυσης (π.χ. ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων, μηχανική ανάλυση, θερμική ανάλυση, θερμομηχανική ανάλυση). Αυτή η διαδικασία δύναται να γίνει σε πρόγραμμα υπολογιστή που αποκαλείται προ-επεξεργαστής (pre-processor). Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο πραγματοποιεί την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος (solver). Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα δύναται να επεξεργαστούν από ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται postprocessor, για να μπορέσει ο μελετητής να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα. Περαιτέρω, οι πολύπλοκες δονήσεις των μουσικών οργάνων μπορούν να περιγραφούν με όρους κανονικών τρόπων δόνησης. Η ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων των μουσικών οργάνων είναι η μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων τους υπό δονητική διέγερση. Κάθε τρόπος δόνησης προσδιορίζεται από τρεις κύριες παραμέτρους, δηλαδή τη φυσική συχνότητα, το σχήμα του τρόπου λειτουργίας, ιδιομορφή, και τον παράγοντα απόσβεσης. Οποιοδήποτε μοτίβο παραμόρφωσης ενός μουσικού οργάνου εκφράζεται με συνδυασμό των ιδιομορφών. Η ιδιομορφή του τρόπου δόνησης είναι ένα μοτίβο που σχετίζεται με μια συγκεκριμένη φυσική συχνότητα και αντιπροσωπεύει τη σχετική μετατόπιση όλων των τμημάτων του οργάνου, σε διάφορες κατευθύνσεις, για αυτόν τον τρόπο δόνησης. Ο συντελεστής απόσβεσης

κάθε τρόπου λειτουργίας συνδέεται με τη φυσική του συχνότητα, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογος με την κατανομή μάζας.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων των ξύλινων τμημάτων του καπακιού και του οργάνου, ώστε να γίνει ταύτιση της δονητικής συμπεριφοράς τους βάσει των μηχανικών τους ιδιοτήτων και απώτερο στόχο την αντικατάστασή τους από πολυμερή (όπως PETG), που ενδείκνυνται για τρισδιάστατη εκτύπωση. Η ψηφιακή τους ταύτιση και αντικατάσταση θα επιταχύνει την διαδικασία κατασκευής οργάνων με εναλλακτικά υλικά που έχουν παρόμοια δονητικά χαρακτηριστικά με το ξύλο.

Για την προσομοίωση του καπακιού με τα καμάρια το πλέγμα του FEM μοντέλο είχε εξαεδρικά στοιχεία 8 κόμβων και η διακριτοποίηση έγινε με 40000 στοιχεία. Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ήταν πάκτωση στο άνω και κάτω άκρο του καπακιού. Για την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων FEM χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS-DYNA. Για την προσομοίωση του πλήρους σώματος του τζουρά η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με 50000 στοιχεία. Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου ήταν πάκτωση στο κέντρο της πλάτης του σκάφους και θεώρηση προέντασης στις χορδές 338 N για (τρίχορδο) τζουρά χορδισμένο Ρε, Λα, Ρε. Για την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων FEM χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SolidWorks.

Από την βιβλιογραφία έγιναν δοκιμές διαφόρων υλικών ώστε να προσεγγιστεί η δονητική συμπεριφορά των ορθοτροπικών ξύλινων αντικειμένων. Η πιο πλούσια πηγή που έδωσε και την καλύτερη ταύτιση προσομοίωσης – πειράματος ήταν το Mechanical Properties of Wood από τον D. E. Kretschmann [6], ο οποίος έχει συλλέξει δεδομένα από ποικιλίες ξύλων που περιλαμβάνουν όλα τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης καθώς και τους λόγους Poisson.

Πίνακας 1.1 Ιδιότητες ξύλου

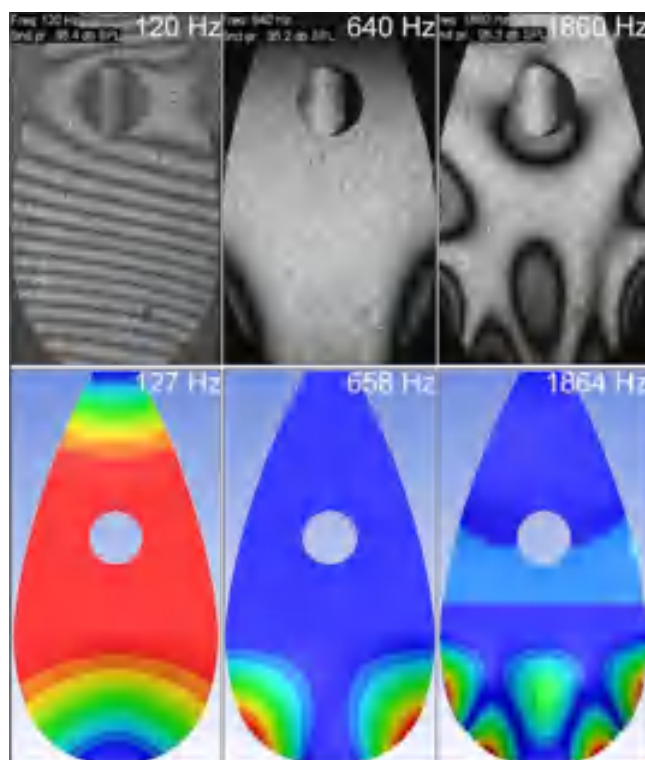
Υλικό	Ειδική βαρύτητα	EL	ET	ER	GLR	GLT	GRT
		GPa	GPa	GPa	GPa	GPa	GPa
Spruce, Engelmann	0.35	8.9	0.53	1.14	1.10	1.07	0.09
Spruce, Sitka	0.4	10.8	0.46	0.84	0.69	0.66	0.03
Maple, red	0.54	11.3	0.76	1.58	1.50	0.84	0.24
Pine, white	0.35	10.1	0.39	0.79	0.53	0.49	0.05
Walnut, black	0.55	11.6	0.65	1.23	0.99	0.72	0.24
Ebony	0.96	15.5	1.15	1.64	0.97	0.96	0.37

μTR	μRL	μTL
0.255	0.083	0.058
0.245	0.04	0.025
0.354	0.063	0.044
0.334	0.026	0.013
0.367	0.052	0.036
0.450	0.033	0.056

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου του τζουρά σχεδιάστηκε επίσης καπάκι χωρίς τρύπα και καμάρια, πάχους 2.4 mm ώστε να μοντελοποιηθεί και να κατασκευαστεί από filament 3D printer και να γίνει ταύτιση των πειραματικών δεδομένων με το μοντέλο προσομοίωσης. Θεωρήθηκαν ιδιότητες υλικού PETG από τη βιβλιογραφία [7].

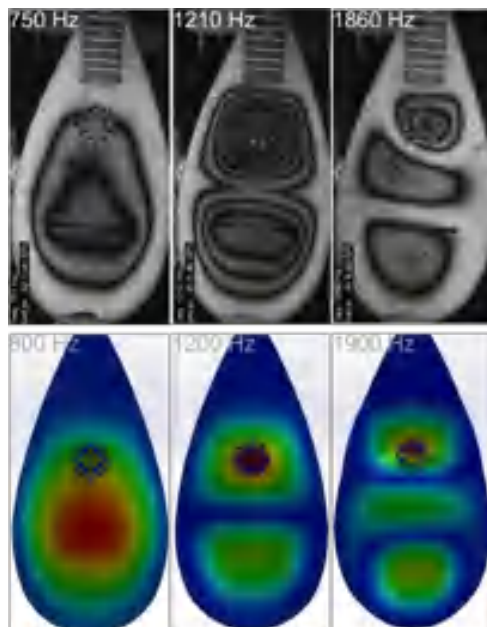
2. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Υλοποιήθηκε η καταγραφή της δονητικής συμπεριφοράς του καπακιού και του οργάνου και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων σταδιακά, πρώτα στο καπάκι και έπειτα στο πλήρες σώμα. Αρχικά στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα σύγκρισης τρόπων δόνησης μετρούμενων με την ESPI και υπολογισμένων με FEM προσομοιώσεις, όπου παρατηρείται καλή συμφωνία, για το μοντέλο καπάκι-καμάρια.



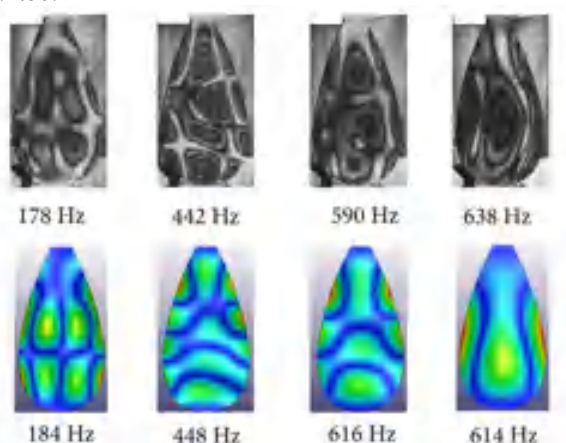
Εικόνα 1.5 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης

Στη συνέχεια στην εικόνα 1.6 επίσης παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα σύγκρισης τρόπων δόνησης μετρούμενων με την ESPI και υπολογισμένων με FEM προσομοιώσεις, όπου παρατηρείται καλή συμφωνία για το μοντέλο καπάκι-καμάρια-καβαλάρης-σκάφος.



Εικόνα 1.6 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εικόνων 1.5 και 1.6 είναι προφανές και αναμενόμενο ότι οι ιδιομορφές είναι διαφορετικές λόγω των διαφορετικών οριακών συνθηκών αλλά και των τμημάτων του οργάνου που μελετώνται στις δονητικές αναλύσεις. Επιπλέον, στην εικόνα 1.7 παρουσιάζονται ομοίως αποτελέσματα ESPI-FEM ιδιομορφών για το εκτυπωμένο καπάκι χωρίς οπή και καμάρια, όπου επίσης παρατηρείται καλή συμφωνία. Τα αποτελέσματα του εκτυπωμένου καπακιού δείχνουν ότι οι συντονισμοί ξεκινούν σε χαμηλότερες συχνότητες σε σχέση με αυτές του ξύλινου καπακιού.



Εικόνα 1.7 Σύγκριση ESPI-FEM αποτελεσμάτων δονητικής ανάλυσης για εκτυπωμένο καπάκι

Συνολικά παρατηρούμε ικανοποιητική συμφωνία αποτελεσμάτων ολογραφικής απεικόνισης με αποτελέσματα FEM προσομοιώσεων για ορθοτροπικά και πολυμερή υλικά. Επίσης αναδείχθηκε ότι η χρήση σύγχρονων μεθόδων κατασκευής όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση συμβάλει στην μελέτη και κατ'επέκταση στην κατασκευή μουσικών οργάνων. Στο μέλλον δύναται να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού στην υλοποίηση δονητικών ακουστικών προσομοιώσεων. Αποσκοπούμε σε κατασκευή μουσικού οργάνου με εύκολα εναλλάξιμα καπάκια ώστε να γίνει πιο εύκολη η έρευνα για τη χρήση εναλλακτικών υλικών στην κατασκευή του τζουρά με στόχο βελτιωμένη απόδοση και μείωση του χρόνου κατασκευής του οργάνου.

3. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον οργανοποιό Μάριο Τορναρίτη για τη βοήθεια στην κατασκευή του τζουρά. Ευχαριστούμε για την υποστήριξη με υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Ελληνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (GRNET) στην Εθνική εγκατάσταση HPC ARIS-στο πλαίσιο του έργου pr016025-LaMPIOS III.

4. Αναφορές

- [1] S. Brezas et al. «Review of Manufacturing Processes and Vibro-Acoustic Assessments of Composite and Alternative Materials for Musical Instruments» *Appl. Sci.* **14**, pp 2293 (2024)
- [2] E. Kaselouris et al. «A review of finite element studies in string musical instruments» *Acoustics* **4**, pp 183-202 (2022)
- [3] V. Chatziioannou «Reconstruction of an early viola da gamba informed by physical modeling» *J. Acoust. Soc. Am.* **145**, 3435-3442 (2019)
- [4] H. Mansour «Modal Analysis of the Setar: A Numerical-Experimental Comparison» *J. Vib. Acoust. Trans. ASME* **137**, pp 61006 (2015)
- [5] S. Brezas et al. «An integrated method for the vibroacoustic evaluation of a carbon fiber bouzouki» *Appl. Sci.* **13**, pp 4585 (2023)
- [6] B. Kasal Wood Formation and properties|Mechanical Properties of Wood in *Encyclopedia of Forest Sciences*, pp 1815-1828 (2004)
- [7] J. M. Mercado-Colmenero et al. «A novel geometric predictive algorithm for assessing compressive elastic modulus in MEX additive processes, based on part nonlinearities and layers stiffness, validated with PETG and PLA materials» *Polymer Testing* **133**, pp 108389 (2024)



Πειραματική Έρευνα για την Εφαρμογή του Συστήματος Σκίασης τύπου ακουστικών Περσίδων για την μείωση του Θορύβου στην πρόσοψη Γραφειακού Κτιρίου

Παναγιώτα Καβάζη
CYacoustics C.G. Ltd, Κουρίου 15B, TK 3025, Λεμεσός, Κύπρος
kavazipanayiotai@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο θόρυβος της κυκλοφορίας και οι υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση και ευημερία των εργαζομένων σε γραφεία, ιδιαίτερα σε πόλεις με ανεπαρκή περιβαλλοντικό σχεδιασμό, όπως η Λεμεσός. Αυτή η μελέτη εξετάζει τη δυνατότητα μείωσης του θορύβου στους χώρους εργασίας μέσω της εγκατάστασης ενός Συστήματος Σκίασης Ακουστικών Περσίδων στην γυάλινη πρόσοψη ενός γραφείου. Αξιολογήθηκαν τρία σενάρια: (1) συνδυασμός παραθύρου με ακουστικές περσίδες, (2) ακουστικές περσίδες χωρίς το παράθυρο και (3) μόνο το παράθυρο. Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν: (i) τη μέθοδο του στοιχείου ηχείου ("element method"), η οποία βασίζεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 16283, για τον υπολογισμό του φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου του συστήματος ("apparent sound reduction index") με την χρήση μεγάφωνου και (ii) την μέτρηση της διαφοράς επιπέδου ηχητικής πίεσης, χρησιμοποιώντας ως πηγή θορύβου το κυκλοφοριακό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συνδυασμός παραθύρου και ακουστικού συστήματος σκίασης προσέφερε τη μεγαλύτερη μείωση του θορύβου, ιδιαίτερα στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, ενώ οι περσίδες χωρίς το στοιχείο του υαλοπίνακα ήταν λιγότερο αποτελεσματικές στις χαμηλές συχνότητες. Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση ακουστικών συστημάτων σκίασης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το ακουστικό περιβάλλον στους χώρους εργασίας σε περιοχές με υψηλά επίπεδα θορύβου.

ABSTRACT

Traffic noise and high indoor temperatures negatively affect the performance and well-being of office workers, particularly in cities with insufficient environmental design, such as Limassol. This study examines the potential for noise reduction in workspaces through the installation of a Splitter Silencers Shading System on the glass façade of an office. Three scenarios were evaluated: (1) a combination of window and acoustic splitter silencers, (2) acoustic splitter silencers without the window, and (3) the window alone. The methodologies used include: (i) the element method, based on the European standard ISO 16283, to calculate the apparent sound reduction index using a loudspeaker, and (ii) the measurement of the sound pressure level difference, using traffic noise as the source. The results showed that the combination of window and acoustic shading system provided the greatest noise reduction, especially at mid and high frequencies, while the louvers without the glass component were less effective at low frequencies. In conclusion, the integration of acoustic shading systems can significantly improve acoustic environment in workplaces located in areas with high noise levels.

1. Εισαγωγή

Ο θόρυβος της κυκλοφορίας οχημάτων μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση και την ευημερία των εργαζομένων σε ένα περιβάλλον γραφείου. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται πιο συχνά σε πυκνοκατοικημένες πόλεις που δεν διαθέτουν επαρκή υποδομή για περιβαλλοντικό αστικό σχεδιασμό. Ένα παράδειγμα τέτοιας πόλης είναι η Λεμεσός στην Κύπρο, όπου πραγματοποιείται η παρούσα μελέτη. Ο ανεπαρκής ακουστικός σχεδιασμός στα γραφεία [1]-[3] καθώς και οι υψηλές εσωτερικές θερμοκρασίες [4] επηρεάζουν την ευημερία και την παραγωγικότητα των εργαζομένων. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να εφαρμοστούν δομές και συστήματα που μπορούν να βελτιώσουν την ακουστική των γραφείων, ώστε να ενισχυθεί η υγεία και η παραγωγικότητα των εργαζομένων, ιδιαίτερα σε πόλεις με υψηλά επίπεδα θορύβου και θερμοκρασιών.

Ορισμένοι ερευνητές έχουν μελετήσει το σχεδιασμό συστημάτων σκίασης που συνδυάζουν τη μείωση θορύβου και θερμότητας. Οι Sakamoto et al. διερεύνησαν την ακουστική απόδοση αυτών των συστημάτων μέσω πειραμάτων με μοντέλα κλίμακας, διαπιστώνοντας ότι οι οριζόντιες προεξοχές και περσίδες προσφέρουν ελάχιστη ηχομόνωση εκτός εάν η γωνία πρόσπτωσης του ήχου είναι μεγάλη, με απώλειες εισαγωγής που κυμαίνονται από 1-10 dB [5]. Τα ευρήματά τους έδειξαν ότι η αποτελεσματική μείωση του ήχου απαιτούσε γωνίες τουλάχιστον 80° για να ξεπεράσουν τα 4dB. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν επίσης επισημάνει ότι, ενώ οι περσίδες μπορούν να προσφέρουν κάποια προστασία από θόρυβο, μπορούν επίσης να αυξήσουν τα επίπεδα ηχητικής πίεσης (SPL) στα κατώτερα επίπεδα, αντανakλώντας τα ηχητικά κύματα [6]-[8]. Πειραματικές μελέτες, συμπεριλαμβανομένων επιτόπιων δοκιμών και δοκιμών σε ημιανηχοϊκό θάλαμο [9], επιβεβαίωσαν ότι οι παραδοσιακές περσίδες μπορεί να αυξήσουν το SPL, γεγονός που ώθησε τους Zuccherini Martello και τους συνεργάτες του να ενσωματώσουν ηχοαπορροφητικά υλικά για να αντιμετωπίσουν αυτές τις επιπτώσεις. Η έρευνά τους έδειξε ότι οι ηχοαπορροφητικές περσίδες μείωσαν σημαντικά την ένταση του ήχου, την τραχύτητα και το SPL [10], ενώ τα παραδοσιακά συστήματα θα μπορούσαν να επιδεινώσουν τις ακουστικές συνθήκες. Επιπλέον, η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από τους Zuccherini Martello και τους συνεργάτες του αποκάλυψε ότι, ενώ τα συστήματα σκίασης τείνουν να αυξάνουν το SPL, η προσθήκη ηχοαπορροφητικών υλικών αντιμετωπίζει αποτελεσματικά αυτό το ζήτημα, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές [11].

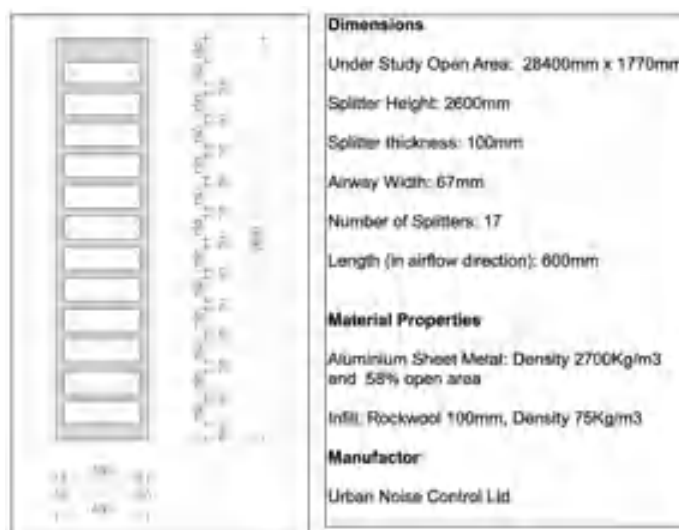
Η συγκεκριμένη μελέτη εξετάζει τις προοπτικές μείωσης του θορύβου σε χώρους εργασίας με την εγκατάσταση ενός Συστήματος Σκίασης Ακουστικών Περσίδων στην πρόσοψη ενός γραφειακού κτιρίου για τρία σενάρια. Η αρχική ιδέα βασίζεται στο γεγονός ότι οι ακουστικές περσίδες χρησιμοποιούνται γενικά για τη μείωση του θορύβου σε ανοιχτές προσόψεις μηχανοστασίων [12]. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει τη μέθοδο του στοιχείου ηχείου, η οποία βασίζεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 16283, για τον υπολογισμό του ουσιαστικού δείκτη μείωσης θορύβου του συστήματος και τη μέτρηση της διαφοράς επιπέδου ηχητικής πίεσης, χρησιμοποιώντας ως πηγή θορύβου το κυκλοφοριακό. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις: το στοιχείο παραθύρου σε συνδυασμό με τους διαχωριστικούς σιγαστήρες, τους διαχωριστικούς σιγαστήρες

χωρίς το στοιχείο παραθύρου και το στοιχείο παραθύρου χωρίς την εγκατάσταση των διαχωριστικών σιγαστήρων. Στην παρούσα μελέτη αναλύεται και παρουσιάζεται η επίδραση αυτών των εγκαταστάσεων, σε περιβάλλον γραφείου.

2. Μεθοδολογία

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στα γραφεία της CYACOUSTICS, στην οδό Κουρίου 15B, 3025, στη Λεμεσό. Τα γραφεία βρίσκονται σε κεντρική τοποθεσία, αλλά σε δρόμο με αραιή/ήπια κυκλοφοριακή κίνηση. Το υπό μελέτη γραφείο βρίσκεται σε μεσοπάτωμα (ύψος 3.34m από το έδαφος) και με διαστάσεις 2.4 m ύψος, 3.18m μήκος και 3.76m πλάτος. Η όψη του γραφείου αποτελείται από ένα οριζόντιο συρόμενο παράθυρο κατασκευασμένο από μονό υαλοπίνακα πάχους 6mm, διαστάσεων 1.77m ύψος και 3.11m μήκος.

Η εγκατάσταση των ακουστικών διαχωριστικών σιγαστήρων περιορίστηκε στην περιοχή κάτω από το μπαλκόνι (2.84m) για λόγους πρακτικούς και ασφαλείας. Οι διαστάσεις των διαχωριστικών είναι 2,6m ύψος και 0.1m πάχος, ενώ το μήκος τους στην κατεύθυνση της ροής του αέρα είναι 0.6m. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από 17 κομμάτια διαχωριστικών και το πλάτος του αεραγωγού μεταξύ δύο γειτονικών διαχωριστικών είναι 67mm. Κάθε διαχωριστικό είναι κατασκευασμένο από αλουμινένιο φύλλο πάχους 1.5mm, με πυκνότητα 2700Kg/m³ και επιφάνεια πρόσοψης με άνοιγμα 58%. Στο εσωτερικό κάθε διαχωριστικού υπάρχει πετροβάμβακας πάχους 100mm και πυκνότητας 75Kg/m³. Η κατασκευή έχει καλυφθεί (με γαλβανισμένο φύλλο πάχους 1.5mm) στην αριστερή πλευρά αλλά όχι στη δεξιά λόγω πρακτικών δυσκολιών.



Σχήμα 2.1 Προδιαγραφές των ακουστικών διαχωριστικών σιγαστήρων.



Σχήμα 2.2 Εγκατάσταση Συστήματος Σκίασης Ακουστικών Περσίδων.

Οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν: (i) τη μέθοδο του στοιχείου ηχείου (“element method”), η οποία βασίζεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 16283, για τον υπολογισμό του φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου του συστήματος (“apparent sound reduction index”) με τη χρήση μεγάλων και (ii) τη μέτρηση της διαφοράς επιπέδου ηχητικής πίεσης, χρησιμοποιώντας ως πηγή θορύβου το κυκλοφοριακό [13]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις: το στοιχείο παραθύρου σε συνδυασμό με τους διαχωριστικούς σιγαστήρες, τους διαχωριστικούς σιγαστήρες χωρίς το στοιχείο παραθύρου και το στοιχείο παραθύρου χωρίς την εγκατάσταση των διαχωριστικών σιγαστήρων.

2.1 Μετρήσεις Πεδίου Ηχομείωσης Πρόσοψης

Η συγκεκριμένη ενότητα περιγράφει την πρώτη μεθοδολογία, για τον προσδιορισμό της αερόφερτης ηχομείωσης του στοιχείου πρόσοψης του κτιρίου, στην περιοχή συχνοτήτων 50-5000Hz, με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ISO 16283-3:2016. Αυτή η μελέτη εστιάζει στη μέθοδο στοιχείου μεγάφωνού (“loudspeaker element method”), η οποία υπολογίζει τον φαινομενικό δείκτη μείωσης του ήχου (R'45° - apparent sound reduction index).

Το R'45° είναι ο δείκτης μέτρησης ηχομόνωσης ενός δομικού στοιχείου, όταν η πηγή ήχου είναι ένα μέγαφωνο, με γωνία πρόσπτωσης του ήχου στις 45°. Η γωνία πρόσπτωσης του ήχου σχηματίζεται από τον άξονα του μεγάφωνου που δείχνει προς το κέντρο του δείγματος και τον κάθετο προς την επιφάνεια της πρόσοψης. Η εξίσωση (2.1) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του R'45° [13].

$$R'45^{\circ} = L1,S - L2 + 10 \log (S/A) \text{dB} - 1,5 \text{dB} \quad (2.1)$$

Όπου:

L1,S: Μέσο επίπεδο ηχητικής πίεσης στην επιφάνεια του δείγματος

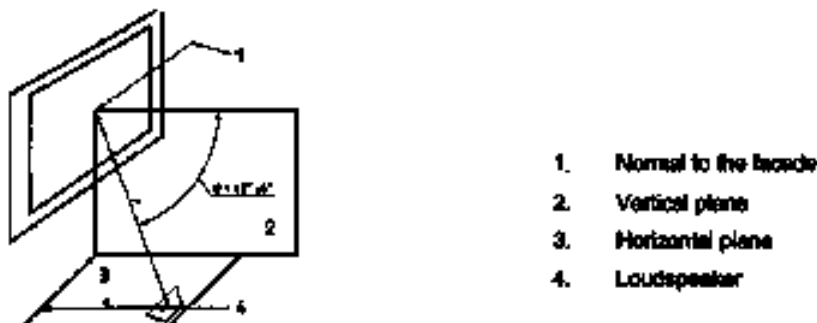
L2: Μέσο επίπεδο ηχητικής πίεσης στον χώρο υποδοχής

S: Επιφάνεια του δείγματος

A: Ισοδύναμη περιοχή ηχοαπορρόφησης στον χώρο υποδοχής

2.1.1 Μετρήσεις στην εξωτερική επιφάνεια του στοιχείου πρόσοψης.

Το μέγαφωνο τοποθετήθηκε στο έδαφος, σε απόσταση 3,6m από την πρόσοψη, με γωνία πρόσπτωσης του ήχου ίση με (45±5)°, ελαχιστοποιώντας τη διακύμανση του επιπέδου ηχητικής πίεσης στο υπό μελέτη στοιχείο. Ο ήχος δημιουργήθηκε από ένα δωδεκάεδρο ηχείο, με ενισχυτή ισχύος που περιλαμβάνει μια γεννήτρια σήματος ροζ θορύβου. Το ηχητικό πεδίο που δημιουργήθηκε ήταν σταθερό, με συνεχές φάσμα από 50Hz έως 5000Hz.



Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης του στοιχείου πρόσοψης, στην εξωτερικό χώρο.

Η μέση στάθμη ηχητικής πίεσης εξωτερικού χώρου (L1,S) μετρήθηκε στην επιφάνεια υπό-δοκιμή στοιχείου. Η απόσταση μεταξύ του δείγματος δοκιμής και του κέντρου της μεμβράνης του μικροφώνου ήταν μικρότερη από 10mm και ο άξονας του μικροφώνου ήταν παράλληλος με την επιφάνεια [13]. Οι μετρήσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις (στην επιφάνεια), ομοιόμορφα αλλά ασύμμετρα. Για σκοπούς μεθοδολογίας, οι μετρήσεις συγκρίθηκαν, έτσι ώστε η διαφορά στο επίπεδο ηχητικής πίεσης μεταξύ δύο θέσεων σε κάθε συχνότητα να μην είναι μεγαλύτερη από $n=3$ [13].

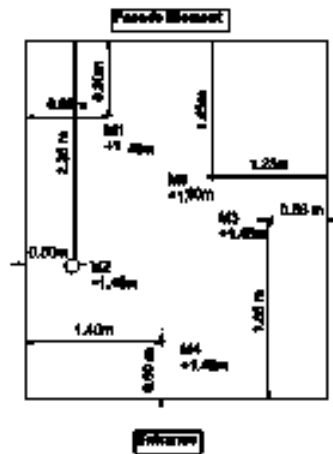
Ο μέσος όρος των μετρήσεων υπολογίστηκε με την παρακάτω εξίσωση:

$$L1,S = 10 \log(10^{L1/10} + 10^{L2/10} + \dots + 10^{Ln/10}) - 10 \log(n) \text{ dB} \quad (2.1)$$

Όπου L1, L2, ..., Ln είναι τα επίπεδα ηχητικής πίεσης στις θέσεις 1, 2, ..., n.

2.1.2 Μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο του υπό μελέτη γραφείου.

Πέντε θέσεις μικροφώνου χρησιμοποιήθηκαν στο υπό μελέτη γραφείο για να ληφθεί η μέση στάθμη ηχητικής πίεσης και η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν 20 δευτερόλεπτα, σύμφωνα με το ISO 16283-3.



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης, στον εσωτερικό χώρο.

2.1.3 Διόρθωση υπόβαθρου θορύβου.

Τα επίπεδα υπόβαθρου θορύβου μετρήθηκαν για να διασφαλιστεί ότι οι εξωγενείς ήχοι δεν επηρέασαν τις μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο του γραφείου. Πέντε σημεία μετρήθηκαν, με χρονική διάρκεια τα 20 δευτερόλεπτα [13].

2.1.4 Μέτρηση Χρόνου Αντήχησης

Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα BS EN ISO 3382-2 και BS EN ISO 16283-3, ακολουθώντας τη μεθοδολογία “μηχανικής” [14]. Στην περίπτωση της εγκατάστασης των διαχωριστικών σιγαστήρων χωρίς το παράθυρο, υποτέθηκε ότι ο χρόνος αντήχησης παρέμεινε ο ίδιος.

2.3 Μέτρηση διαφοράς επιπέδου ηχητικής πίεσης χρησιμοποιώντας το κυκλοφοριακό ως πηγή θορύβου.

Η κυκλοφορία οχημάτων είναι μια μεταβλητή πηγή θορύβου. Οι μετρήσεις επιπέδου πίεσης ήχου πραγματοποιήθηκαν (για να εξεταστεί η διαφορά επιπέδου πίεσης ήχου και για τις τρεις περιπτώσεις) χρησιμοποιώντας δύο μικρόφωνα, εντός και εκτός γραφείου, χρησιμοποιώντας τον κυκλοφοριακό θόρυβο ως πηγή θορύβου. Ο λόγος είναι ότι το πέρασμα του αριθμού των οχημάτων για την χρονική διάρκεια των είκοσι λεπτών ήταν μικρότερη των 50 οχημάτων [15].

Διεξήχθησαν ταυτόχρονες μετρήσεις, διάρκειας 20 λεπτών, για τον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ των μέσων επιπέδων ηχητικής πίεσης (SPL), εντός και εκτός του υπό μελέτη γραφείου. Το μικρόφωνο εντός του γραφείου τοποθετήθηκε στο ένα μέτρο από το παράθυρο και σε ύψος 1.2m, ενώ το μικρόφωνο εξωτερικά του γραφείου τοποθετήθηκε στο 1m από το υπό μελέτη παράθυρο και σε ύψος 4.54m από

το επίπεδο εδάφους. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία πραγματοποιήθηκε και για τις τρεις περιπτώσεις.

3. Αποτελέσματα και θεωρητικές προβλέψεις.

3.1 Αποτελέσματα μέτρησης πεδίου ηχομείωσης πρόσοψης, για τις τρεις περιπτώσεις.

Το παρακάτω γράφημα (Γράφημα 3.1) παρουσιάζει τον υπολογισμένο φαινομενικό δείκτη μείωσης ήχου για τις τρεις περιπτώσεις (50Hz-5KHz), σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 16283-3:2016. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στο στοιχείο του παραθύρου, η πορτοκαλί γραμμή στο σύστημα περσίδων σε συνδυασμό με το στοιχείο του παραθύρου και η γκρι γραμμή αντιπροσωπεύει το σύστημα περσίδων χωρίς το στοιχείο του παραθύρου.



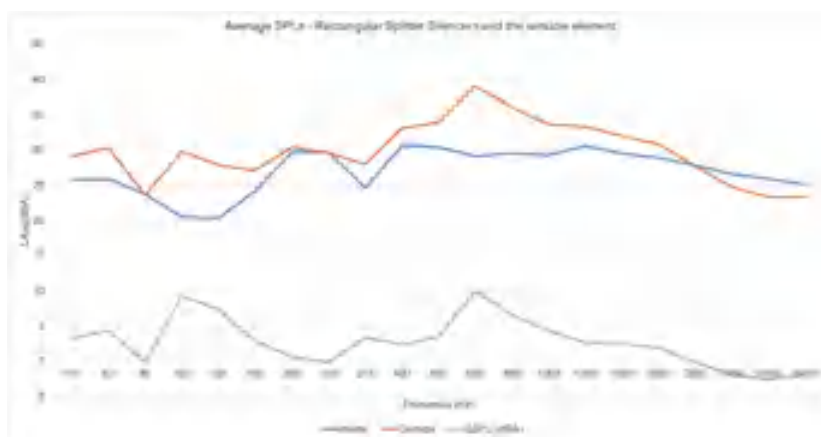
Γράφημα 3.1 Φαινομενικός δείκτης μείωσης ήχου για τις τρεις περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα του σταθμισμένου φαινομένου δείκτη ηχομείωσης για τις τρεις περιπτώσεις ακολουθούν:

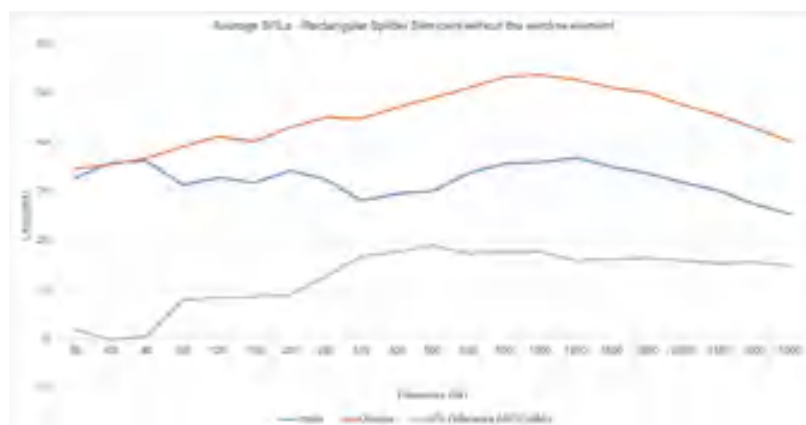
- Στοιχείο παραθύρου: $R'_{45^{\circ},w} = 22\text{dB}$ (-0.2, -0.5).
- Στοιχείο παραθύρου σε συνδυασμό με το ακουστικό σύστημα περσίδων: $R'_{45^{\circ},w} = 30\text{dB}$ (-1.8, -3.9).
- Σύστημα περσίδων χωρίς το στοιχείο του παραθύρου: $R'_{45^{\circ},w} = 14\text{dB}$ (-0.7, -1.7).

3.2 Αποτελέσματα μέτρησης διαφοράς επιπέδου ηχητικής πίεσης χρησιμοποιώντας το κυκλοφοριακό ως πηγή θορύβου.

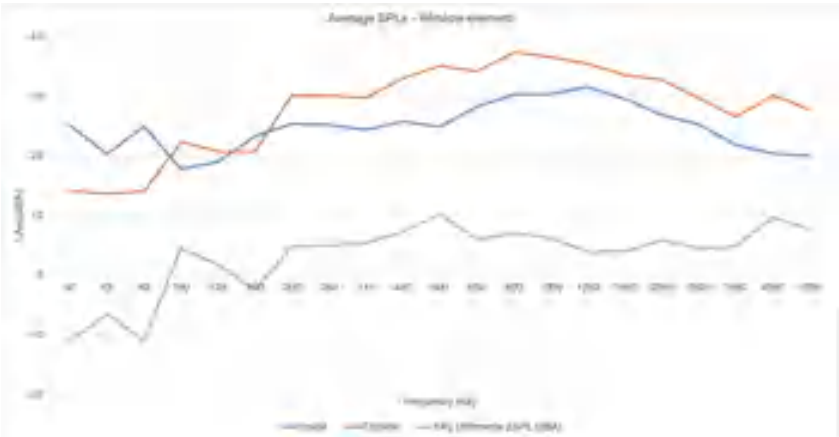
Τα Γραφήματα 3.2 έως 3.5 παρουσιάζουν τη μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης για διάρκεια είκοσι λεπτών, εντός και εκτός του υπό μελέτη γραφείου. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τη μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης εντός του γραφείου, η πορτοκαλί γραμμή αντιπροσωπεύει τη μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης εκτός, και η γκρι γραμμή τη μέση διαφορά στα επίπεδα ηχητικής πίεσης μεταξύ των μετρήσεων εντός και εκτός.



Γράφημα 3.2 Εντός και εκτός μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης για τα στοιχεία του παραθύρου και του ακουστικού συστήματος.



Γράφημα 3.3 Εντός και εκτός μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης για το ακουστικό σύστημα.



Γράφημα 3.4: Εντός και εκτός μέση διαφορά επιπέδου ηχητικής πίεσης για τα στοιχεία του παραθύρου.

3.3 Θεωρητική πρόβλεψη ηχομόνωσης του υπο μελέτη υαλοπίνακα.

Το λογισμικό INSUL Sound Insulation Prediction χρησιμοποιήθηκε για να υπολογίσει τον δείκτη μείωσης ήχου του γυαλιού. Η μέτρηση αυτή δεν περιλαμβάνει το αλουμίνιο του πλαισίου. Ο σταθμισμένος δείκτης μείωσης ήχου του μονού γυαλιού είναι $R_w(C, C_{tr}) = 32(-1, -2)\text{dB}$.

3.4 Θεωρητική πρόβλεψη της απώλειας εισαγωγής (insertion loss) του συστήματος περσίδων.

Το λογισμικό TROX Easy Product Finder χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της απώλειας εισαγωγής των ορθογώνιων διαχωριστικών σιγαστήρων. Η απώλεια εισαγωγής δοκιμάστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 7235:2003, "Acoustics — Laboratory measurement procedures for ducted silencers and air-terminal units — Insertion loss, flow noise, and total pressure loss."

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει την πρόβλεψη της απώλειας εισαγωγής και τον φαινομενικό δείκτη ηχομείωσης της δομής των διαχωριστικών σιγαστήρων.

Πίνακας 3.1 Πρόβλεψη απώλειας εισαγωγής και υπολογισμός σταθμισμένου δείκτη μείωσης ήχου για το σύστημα περσίδων.

Συχνότητα (Hz)	Πρόβλεψη της απώλειας εισαγωγής (dBA)	Φαινομενικός δείκτης μείωσης ήχου R'_{45° (dBA)
63	4	4
125	7	5
250	9	12
500	11	15
1000	19	14

2000	22	14
4000	18	16

4. Συμπεράσματα

Το πρώτο μέρος του πειράματος μέτρησε και αξιολόγησε τον φαινομενικό δείκτη μείωσης θορύβου του στοιχείου του παραθύρου. Τα αποτελέσματα του σταθμισμένου φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου έδειξαν ότι η τιμή $R'_{45^\circ, w}$ για το στοιχείο του παραθύρου είναι 22dB (-0.2,-0.5). Το παράθυρο λειτουργεί εξαιρετικά καλά στα 5000Hz, με αντίστοιχη τιμή 30dB. Στις συχνότητες 250Hz, 400Hz, 800Hz και 1600Hz, παρατηρείται σημαντική πτώση στην τιμή – με τις αντίστοιχες τιμές να είναι 20.7dB, 19.5dB, 18.5dB και 19.7dB, αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι η θεωρητική πρόβλεψη του δείκτη μείωσης ήχου ήταν 9dB μεγαλύτερη από τον μετρούμενο φαινομενικό δείκτη μείωσης ήχου του συνολικού συστήματος αλουμινίου και γυαλιού.

Το δεύτερο μέρος του πειράματος μέτρησε και αξιολόγησε τον φαινομενικό δείκτη μείωσης θορύβου του στοιχείου του παραθύρου σε συνδυασμό με το σύστημα των ακουστικών περσίδων. Τα αποτελέσματα του σταθμισμένου φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου έδειξαν ότι για το στοιχείο του παραθύρου και των ακουστικών περσίδων, η τιμή $R'_{45^\circ, w}$ είναι 30dB (-1.8,-3.9). Ο συνδυασμός του στοιχείου του παραθύρου και των περσίδων λειτουργεί εξαιρετικά καλά στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, με τιμές μεγαλύτερες από 29dB μεταξύ 400Hz έως 5000Hz, με εξαίρεση στα 2500Hz, με τιμή 23dB. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα πριν και μετά την τοποθέτηση του στοιχείου των ακουστικών περσίδων, παρατηρήθηκε μείωση του ουσιαστικού δείκτη μείωσης θορύβου στα 100Hz και 125Hz. Καταγράφηκε μείωση των 9.5dB στα 100Hz, ενώ αντίστοιχα στα 125Hz, 4.6dB.

Το τρίτο μέρος του πειράματος μέτρησε και αξιολόγησε τον φαινομενικό δείκτη μείωσης θορύβου των ακουστικών περσίδων χωρίς το στοιχείο του παραθύρου. Τα αποτελέσματα του σταθμισμένου φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου έδειξαν ότι για το στοιχείο των ακουστικών περσίδων η τιμή $R'_{45^\circ, w}$ είναι 14dB (-0.7, -1.7). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα λειτουργεί καλά στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες. Στην περιοχή από 315Hz έως 500Hz και στις συχνότητες 1250Hz και 2000Hz, ο ουσιαστικός δείκτης μείωσης θορύβου είναι μεγαλύτερος από 15dB(A). Στα 100Hz, ωστόσο, ο ουσιαστικός δείκτης μείωσης θορύβου είναι μηδενικός.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι η θεωρητική πρόβλεψη της απώλειας εισαγωγής (insertion loss) του συστήματος περσίδων δεν αντιστοιχεί στις μετρηθείσες τιμές του σταθμισμένου φαινομενικού δείκτη μείωσης θορύβου. Παρατηρήθηκε ότι στα 63Hz, οι δύο τιμές είναι ίδιες: 4dB(A). Από τα 125Hz έως τα 2000Hz, παρατηρήθηκε ότι η διαφορά μεταξύ των τιμών αυξάνεται – ενώ στα 2000Hz, υπάρχει διαφορά 8dB(A). Αυτή η διαφορά ήταν αναμενόμενη, καθώς ο πρακτικός δείκτης ηχομείωσης του συστήματος περσίδων έχει διαφορετικά αποτελέσματα όταν μετράται επί τόπου, σε σύγκριση με τις θεωρητικές προβλέψεις. Η διαφορά τιμής (θεωρητική-μετρημένη) οφείλεται πιθανότατα στην παράπλευρη μετάδοση και ατελή κατασκευή κατά την εγκατάσταση [16]. Ένας επιπρόσθετος λόγος ήταν ότι (για υπολογιστικούς σκοπούς)

υποτέθηκε ότι ο χρόνος αντήχησης και η ισοδύναμη επιφάνεια ηχοαπορρόφησης στο δωμάτιο υποδοχής ήταν ίσα με αυτά που εφαρμόστηκαν στις περιπτώσεις όπου το στοιχείο του παραθύρου ήταν κλειστό.

Από τις τρεις περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί, οι περσίδες σε συνδυασμό με το στοιχείο του παραθύρου προσφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα του ουσιαστικού δείκτη μείωσης θορύβου. Συγκεκριμένα, στις φασματικές περιοχές από 250Hz έως 2000Hz και από 3150Hz έως 5000Hz. Κατά τη σύγκριση των τριών περιπτώσεων, η πτώση της καμπύλης στα 100Hz και 25000Hz θυμίζει την φασματική καμπύλη της ιδανικής μεταβολής του δείκτη μείωσης θορύβου για ένα μόνο διαχωριστικό [17][18].

Οι μετρήσεις επιπέδου πίεσης ήχου πραγματοποιήθηκαν (για να εξεταστεί η διαφορά επιπέδου πίεσης ήχου και για τις τρεις περιπτώσεις) χρησιμοποιώντας δύο μικρόφωνα, εντός και εκτός γραφείου, χρησιμοποιώντας τον θόρυβο της κυκλοφορίας ως πηγή θορύβου. Καθώς παρατηρούμε την περίπτωση των στοιχείων του παραθύρου και των περσίδων, η σημαντική διαφορά πίεσης ήχου παρουσιάζεται στα 100Hz και 630Hz, με προσεγγιστική τιμή τα 10dB(A). Στα 80Hz και από 200Hz έως 250Hz, η συγκεκριμένη διαφορά ήταν μηδέν. Στην περίπτωση των ακουστικών περσίδων χωρίς το στοιχείο του παραθύρου, η μεγαλύτερη διαφορά επιπέδου πίεσης ήχου παρατηρείται στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, με την υψηλότερη να είναι στα 500Hz, με αντίστοιχη τιμή 20dB(A).

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν τη σημαντική αποδοτικότητα του ακουστικού συστήματος περσίδων στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, για τις περιπτώσεις με και χωρίς το στοιχείο του παραθύρου.

5. Βιβλιογραφία

- [1] R. Paradis, “Acoustic Comfort | WBDG - Whole Building Design Guide,” 2022. <https://www.wbdg.org/resources/acoustic-comfort> (accessed Oct. 02, 2023).
- [2] D. Ouis, “Annoyance from road traffic noise: A review,” *J Environ Psychol*, vol. 21, no. 1, pp. 101–120, 2001, doi: 10.1006/jevp.2000.0187.
- [3] J. Goins, C. Chun, H. Zhang, and Y. Yom, “User perspectives on outdoor noise in open-plan offices with operable windows,” 2012, [Online]. Available: <http://escholarship.org/uc/item/2z68w7nr>
- [4] O. Seppänen, W. J. Fisk, and Q. H. Lei, “Effect of temperature on task performance in office environment,” 2006.
- [5] S. K. Tang, “A review on natural ventilation-enabling façade noise control devices for congested high-rise cities,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 2. MDPI AG, 2017. doi: 10.3390/app7020175.
- [6] C. Díaz, A. Díaz, and M. A. Navacerrada, “An experimental study on the effect of rolling shutters on the field measurements of airborne sound insulation of façades,” *Applied Acoustics*, vol. 74, no. 1, pp. 134–140, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.apacoust.2012.07.001.
- [7] R. Otani, T. Asakura, and S. Sakamoto, “Numerical analysis and experiment on noise shielding effects of eaves/louvers attached on building facade,” 2009.
- [8] S. Secchi, “Nuove applicazioni di elementi in laterizio fonoassorbente Monitoraggio degli effetti ambientali della costruzione del MOSE nella laguna di Venezia (Italia) View project Acoustic effects on building facades of external shading devices View project,” 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261282767>
- [9] N. Z. Martello, P. Fausti, A. Santoni, and S. Secchi, “The use of sound absorbing shading systems for the attenuation of noise on building façades. An experimental investigation,” *Buildings*, vol. 5, no. 4, pp. 1346–1360, 2015, doi: 10.3390/buildings5041346.
- [10] S. Kumar and H. P. Lee, “Recent advances in acoustic metamaterials for simultaneous sound attenuation and air ventilation performances,” *Crystals*, vol. 10, no. 8. MDPI AG, pp. 1–22, Aug. 01, 2020. doi: 10.3390/cryst10080686.

- [11] P. Fausti, S. Secchi, and N. Zuccherini Martello, “The use of façade sun shading systems for the reduction of indoor and outdoor sound pressure levels,” *Building Acoustics*, vol. 26, no. 3, pp. 181–206, Sep. 2019, doi: 10.1177/1351010X19863577.
- [12] E. B. Viveiros, B. M. Gibbs, and S. N. Y. Gerges, “Measurement of sound insulation of acoustic louvres by an impulse method,” *Applied Acoustics*, vol. 63, no. 12, pp. 1301–1313, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0003-682X(02)00049-X.
- [13] British Standard. ISO 16283-3, *Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements Part 3: Façade sound insulation*. 2016.
- [14] British Standard. ISO 3382-2, “Measurement of room acoustic parameters, Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.” 2008.
- [15] ANC, “Measurement Of Sound Levels In Buildings Version 1.0,” 2020.
- [16] C. Asensio, J. A. Trujillo, and G. Arcas, “Analysis of the effects of uneven sound coverage over a facade during a sound insulation test according to the international standard ISO 16283-3,” *Applied Acoustics*, vol. 130, pp. 52–62, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.09.006.
- [17] Institute of Acoustics (IOA), “Building Acoustics Distance Learning Notes,” 2022. <https://classroom.ioa.org.uk> (accessed Oct. 02, 2023).
- [18] Institute of Acoustics (IOA), “General Principles of Acoustics Unit 6 Sound Insulation Distance Learning Notes,” 2022. <https://classroom.ioa.org.uk> (accessed Oct. 02, 2023).



Εφαρμογή των Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων σε Αντίστροφα Προβλήματα Θαλάσσιας Ακουστικής

Βασίλειος Τζιράκης^{1,*}, Κωνσταντίνος Σμαραγδάκης^{1,2,3}, Μιχαήλ Ταρουδάκης^{1,2}

¹Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης,
Πανεπιστημιούπολη Βουτών, 70013 Ηράκλειο

²Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, ΙΤΕ, Ν.Πλαστήρα 100, 70013 Ηράκλειο

³Παρούσα Διεύθυνση: Τμήμα Στατιστικής και Αναλογιστικών –

Χρηματοοικονομικών Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο του Αιγαίου, Σάμος

temp73@math.uoc.gr, vtzirakis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η εκτίμηση των καμπυλών διασποράς (dispersion curves) που χαρακτηρίζουν το φασματογράφημα ενός ευρυζώνιου ακουστικού σήματος που καταγράφεται σε έναν θαλάσσιο κυματοδηγό, με χρήση Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων (Convolutional Neural Networks). Στην περίπτωση μας, οι καμπύλες διασποράς αποτελούν δεδομένα εισόδου για μια κατηγορία αντίστροφων προβλημάτων στην ακουστική ωκεανογραφία, τα οποία αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας την ανάλυση χρόνου-συχνότητας ενός καταγεγραμμένου ακουστικού σήματος προκειμένου να εκτιμηθούν παράμετροι του θαλασσινού νερού ή και του πυθμένα της θάλασσας.

Για βέλτιστη αξιοποίηση της πληροφορίας που μεταφέρουν οι καμπύλες διασποράς, είναι απαραίτητο να ποσοτικοποιηθεί η απεικόνισή τους μαθηματικά και για το σκοπό αυτό επελέγη η μέθοδος της περιγραφής τους μέσω κυβικών splines. Για την εκτίμηση αυτή, επελέγη η χρήση Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων. Η εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου γίνεται με φασματογραφήματα (spectrograms) τα οποία έχουν παραχθεί συνθετικά από ένα σύνολο σημάτων στα οποία δεν έχει προστεθεί θόρυβος, με χρήση προγράμματος κανονικών ιδιομορφών (normal-modes). Το επιθυμητό αποτέλεσμα, που αποτελεί και την έξοδο του νευρωνικού δικτύου, είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών κυβικών splines. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται ως προς την αξιοπιστία τους συγκρίνοντας τις καμπύλες διασποράς που αναπαράγονται μέσω των συντελεστών των κυβικών splines, με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στο σήμα εισόδου όπως παράγονται από τις γνωστές γεωακουστικές παραμέτρους του κυματοδηγού.

Application of Convolutional Neural Networks in Inverse Problems of Ocean Acoustics

ABSTRACT

The aim of this work is the estimation of the dispersion curves that characterize the spectrogram of a broadband acoustic signal recorded in a marine waveguide, using Convolutional Neural Networks. The dispersion curves are input data for a class of inverse problems in acoustic oceanography, which are addressed using time-frequency analysis of a recorded acoustic signal in order to estimate underwater and/or seafloor parameters.

For optimal utilization of the information carried by the dispersion curves, it is necessary to quantify their representation mathematically and for this purpose the method of describing them by cubic splines was chosen. For this estimation, we used Convolutional Neural Networks. The training process of the neural network is done with spectrograms synthetically generated from a set of signals to which no noise has been added, using a normal-modes code. The desired result, which is the output of the neural network, is the determination of the coefficients of cubic splines. The results are commented on their reliability by comparing the resulting dispersion curves produced by the cubic spline coefficients, with the curves corresponding to the input signal as generated by the known geoacoustic parameters of a synthetic waveguide.

Εισαγωγή

Η εργασία αφορά στην αντιμετώπιση ενός αντίστροφου προβλήματος ακουστικής διάδοσης στο θαλάσσιο περιβάλλον με χρήση των χαρακτηριστικών διασποράς ενός μετρούμενου ακουστικού πεδίου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αξιοποιούνται οι καμπύλες διασποράς (dispersion curves) οι οποίες περιγράφουν την ακουστική διάδοση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας όταν είναι δυνατή η διάκριση των ιδιομορφών διάδοσης του ηχητικού σήματος που εκπέμπεται από γνωστή πηγή που λαμβάνεται από ένα υδρόφωνο. Τα χαρακτηριστικά της διασποράς είναι μοναδικά χαρακτηριστικά του σήματος όπως διαδίδεται και εν τέλει καταγράφεται στο περιβάλλον και επομένως συνδέονται άμεσα με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Μπορούν επομένως να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών δεδομένων που είναι το αντικείμενο ενός τυπικού αντίστροφου προβλήματος ακουστικής ωκεανογραφίας.

Τα πραγματικά δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας, είναι μετρήσεις του ηχητικού πεδίου στο υδρόφωνο στο πεδίο του χρόνου. Χρησιμοποιώντας ανάλυση χρόνου-συχνότητας μπορούμε να υπολογίσουμε το φασματογράφημα του σήματος (spectrogram) με χρήση δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier [1]-[2]. Το φασματογράφημα αποδίδει τη διάδοση του σήματος σε διακριτές ιδιομορφές, κάθε μία από τις οποίες περιγράφεται από τις καμπύλες διασποράς [3]. Το επόμενο βήμα είναι η αποτύπωση των καμπύλων διασποράς μέσω κατάλληλων συναρτήσεων

προκειμένου η μαθηματική τους περιγραφή να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Συνοπτικά, το αντίστροφο πρόβλημα μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως: Λαμβάνοντας υπόψη το φασματογράφημα ενός ακουστικού σήματος που έχει καταγραφεί στο θαλάσσιο περιβάλλον, αναγνωρίστε τις καμπύλες διασποράς που περιγράφουν την ενεργειακή κατανομή του μετρούμενου σήματος και χρησιμοποιήστε τη μαθηματική περιγραφή τους με τη μορφή διακριτών δεδομένων για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Διατυπώνεται έτσι ένα διακριτό αντίστροφο πρόβλημα [4].

Στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθούμε στο πρόβλημα της περιγραφής των καμπύλων διασποράς μέσω κυβικών splines, προκειμένου να καταστεί δυνατή η διατύπωση του αντίστροφου προβλήματος ως διακριτού με τα δεδομένα εισόδου να αποτελούνται από τους συντελεστές των splines που περιγράφουν τις καμπύλες διασποράς.

Με δεδομένο ότι η ως δεδομένο για την περιγραφή των καμπύλων διασποράς έχουμε μόνο το φασματογράφημα του σήματος, η εκτίμηση των παραμέτρων των splines (και συνακόλουθα των καμπύλων διασποράς) μπορεί να γίνει με κατάλληλες τεχνικές μηχανικής μάθησης και στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση Συνελικτικών Νευρωνικών Δικτύων (Convolutional Neural Networks – C.N.N.) [5].

Για τον έλεγχο της εφαρμογής της μεθόδου θα αναφερθούμε σε ένα πρόβλημα αναγνώρισης του πυθμένα της θάλασσας, καθώς η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου σχετίζεται άμεσα με το αντίστροφο πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε

1. Περιγράφοντας τις καμπύλες διασποράς με κυβικές splines

Η χρήση των κυβικών splines επιλέχτηκε στην παρούσα εργασία ως πειραματική μέθοδος περιγραφής των καμπύλων διασποράς, δεδομένου ότι αυτές περιγράφονται με ομαλές καμπύλες για το μεγαλύτερο τμήμα χρόνου/συχνοτήτων του ακουστικού σήματος. Επομένως η χρήση splines [6] μπορεί να αποτυπώσει μαθηματικά τις καμπύλες, τουλάχιστον στο μεγαλύτερο μέρος τους που μπορεί άλλωστε να αποδειχθεί ότι είναι το κρίσιμο τμήμα για να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο για επίλυση των αντιστρόφων προβλημάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές των splines όχι μόνο καθορίζουν το σχήμα των καμπύλων διασποράς, αλλά θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως διακριτά δεδομένα εισόδου στο πλαίσιο ενός αντίστροφου προβλήματος, όπως περιεγράφηκε στην εισαγωγή.

Εάν λοιπόν S_n είναι μία καμπύλη διασποράς που αντιπροσωπεύει τη διάδοση της κυματομορφής τάξης n , στόχος μας είναι η περιγραφή της μέσω κυβικών splines σε k υποδιαστήματα $d_k \equiv [t_i, t_{i+1}]$, $i = 0, \dots, k-1$, σε καθένα από τα οποία οι συντελεστές των splines είναι $a_{j,k}$, $j = 0, \dots, 3$ και το κυβικό spline έχει τη μορφή $S_{n,k} = \alpha_{n,0,k} + \alpha_{n,1,k}t + a_{n,2,k}t^2 + a_{n,3,k}t^3$, $t \in d_k$. Ο υπολογισμός των συντελεστών αυτών είναι το αντικείμενο της εργασίας.

2. Μορφή του Νευρωνικού Δικτύου

Χρησιμοποιούμε ένα συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (C.N.N.) το οποίο εκπαιδεύεται από ένα σύνολο φασματογραφημάτων που αντιπροσωπεύουν το ηχητικό πεδίο που καταγράφεται σε ένα υδρόφωνο όταν είναι δεδομένα τα περιβαλλοντικά δεδομένα και η πηγή του ήχου, μέσα από ένα πεδίο πιθανών παραμέτρων που εξαρτώνται από το αντίστροφο πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε. Τα φασματογραφήματα παράγονται συνθετικά με χρήση του προγράμματος MODEL που υπολογίζει το ακουστικό σήμα από γνωστή πηγή και σε γνωστό περιβάλλον στο πεδίο των συχνοτήτων και στη συνέχεια με χρήση διακριτού μετασχηματισμού Fourier στο πεδίο του χρόνου για πηγή γνωστής διέγερσης. Το σημαντικό από την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με προσομοιωμένα περιβάλλοντα είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα αριθμητικού υπολογισμού των αντίστοιχων θεωρητικών καμπύλων διασποράς και συνακόλουθα των συντελεστών των κυβικών splines που τις περιγράφουν. Οι λεπτομέρειες της δομής και της εκπαίδευσης του C.N.N. παρουσιάζεται στη συνέχεια χωρίς εκτεταμένη αναφορά στον ρόλο των παραμέτρων και των επιπέδων (στρωμάτων) του νευρωνικού δικτύου που θα θεωρηθούν γνωστά.

Οι υπερπαραμέτροι του νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιήθηκε φαίνονται στον επόμενο Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1 Υπερπαραμέτροι του Νευρωνικού Δικτύου

Epochs	1000
Learning rate	10^{-3}
Batch size for training	200
Loss function	Mean square error

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης των βαρών (weights) και των biases του νευρωνικού δικτύου είναι ο Adam [7], ο οποίος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου της καθόδου. Η μορφή του νευρωνικού δικτύου χτίστηκε ως εξής: Το πρώτο στρώμα έχει 16 output channels, kernel size 3×3, stride 1 και padding 1. Ένα max pooling layer με kernel size 2×2 και stride 2. Το δεύτερο στρώμα έχει 32 output layers, kernel size 3×3, stride 1 και padding 1. Τρία fully connected layers με προοδευτικά μειούμενο output size [8]. Η διαδικασία που ακολουθείται στο C.N.N. είναι η εξής: Το input περνάει από το πρώτο συνελκτικό στρώμα, ακολουθούμενο από μια activation function ReLU και στη συνέχεια από max-pooling. Έπειτα, περνάει από το δεύτερο συνελκτικό στρώμα με activation function ReLU. Το αντίστοιχο output γίνεται διάνυσμα μέσω μιας διαδικασίας flattening. Τέλος, η προηγούμενη έξοδος περνά από τα fully connected layers.

Το σύνολο των δεδομένων υλοποίησης της εφαρμογής του νευρωνικού δικτύου χωρίζεται ως εξής : train set που περιέχει το 60% του συνόλου, test set που περιέχει το 20% και validation set που περιέχει πάλι το 20%. Κάθε στοιχείο του συνόλου αντιπροσωπεύει ένα φασματογράφημα (X) και ένα σύνολο τιμών που αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές splines (Y).

3. Εφαρμογή σε πρόβλημα αναγνώρισης του πυθμένα της θάλασσας

3.1 Το πρόβλημα

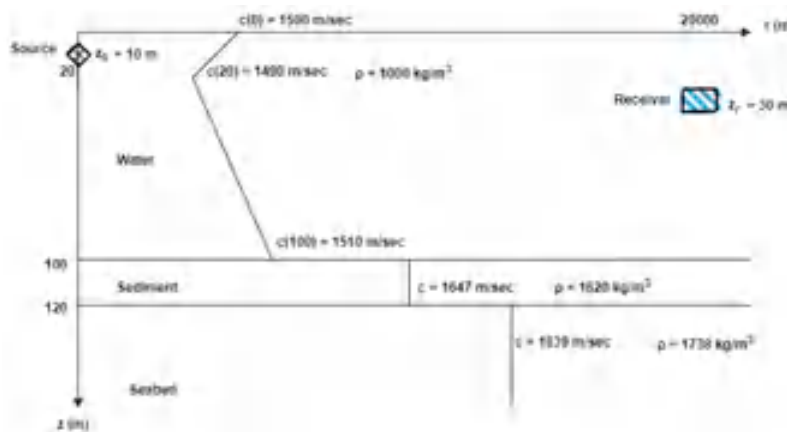
Εξετάζουμε ένα πρόβλημα αναγνώρισης του πυθμένα της θάλασσας που αποτελεί ένα τυπικό αντίστροφο πρόβλημα ακουστικής ωκεανογραφίας. Μια ακουστική πηγή που τοποθετείται σε βάθος z_0 στη θάλασσα, εκπέμπει ακουστικά σήματα που καταγράφονται σε απόσταση R και βάθος z . Για την εφαρμογή που έχουμε κατά νου η ηχητική πηγή θα θεωρηθεί με γκαουσιανή (Gaussian) συνάρτηση διέγερσης. Στόχος της διαδικασίας αντιστροφής, είναι η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του πυθμένα που εκφράζονται μέσω των ταχυτήτων των διαμήκων κυμάτων και των πυκνοτήτων των στρωμάτων του ιζήματος. Εάν τα χαρακτηριστικά διασποράς του μετρούμενου σήματος πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων, οι καμπύλες διασποράς του μετρούμενου σήματος θα πρέπει να προσδιορίζονται με καλή ακρίβεια και αυτός θα είναι ο στόχος της διαδικασίας εκτίμησής τους που περιγράφεται κατωτέρω και αποτελεί ένα αυτοτελές αντίστροφο πρόβλημα επίσης. Οι επιχειρησιακές και περιβαλλοντικές παράμετροι του προβλήματος εμφανίζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Περιβάλλοντα του σετ δεδομένων

Παράμετροι του θαλάσσιου περιβάλλοντος	
Βάθος νερού (D)	100 m
Πάχος ιζήματος (h)	20 m
Οριζόντια απόσταση δέκτη (R)	20000 m
Κεντρική συχνότητα (f_c)	150 Hz
Ζώνη συχνότητας (Δf)	100 Hz
Βάθος πηγής/δέκτη (z_0, z_r)	(10, 30) m
Προφίλ ταχύτητας στο νερό ($c_w(z)$)	
$c_w(0)$	1500 m/sec
$c_w(20)$	1490 m/sec
$c_w(100)$	1510 m/sec
Πυκνότητα νερού (ρ_w)	1000 kg/m ³
Προφίλ ταχύτητας ιζήματος ($c_b(z)$)	
$c_b(100)$	~[1600, 1800] m/sec
$c_b(120)$	Same value as above
Πυκνότητα ιζήματος (ρ_b)	~[1300, 1700] kg/m ³
Ταχύτητα στον πυθμένα (c_{sb})	~[1600, 2000] m/sec
Πυκνότητα πυθμένα (ρ_{sb})	~[1600, 1900] kg/m ³

Προκειμένου να εφαρμόσουμε το C.N.N. για την εκτίμηση των συντελεστών splines, θα ορίσουμε ένα χώρο αναζήτησης (search space) των 6 περιβαλλοντικών παραμέτρων, μεταξύ των οποίων θα εξεταστεί το σύνολο των περιβαλλόντων που

θα εκπαιδεύσουν το δίκτυο. Ο χώρος αναζήτησης των περιβαλλοντικών αυτών δεδομένων παρουσιάζεται επίσης στον πίνακα 3.1. Υπενθυμίζεται ότι στην παρούσα εργασία δεν είναι στόχος μας ο υπολογισμός των παραμέτρων του πυθμένα αλλά μόνο των συντελεστών των splines που περιγράφουν τις καμπύλες διασποράς.



Σχήμα 3.1 Ο κυματοδηγός για το περιβάλλον αναφοράς

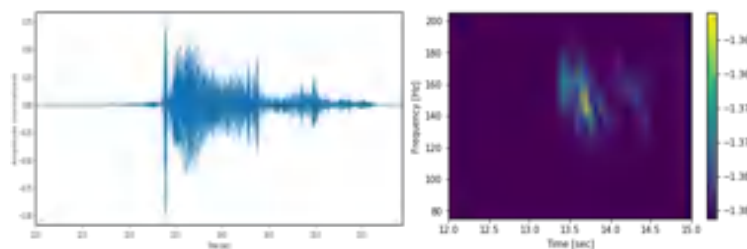
3.2 Αποτελέσματα υπολογισμού των συντελεστών των κυβικών splines

Δημιουργήσαμε 1120 σήματα που απαρτίζουν τα train set, validation set και test set. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα τυχαίο περιβάλλον από το test set και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε για αυτό από την εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου ως προς τις καμπύλες διασποράς που χαρακτηρίζουν τη λήψη ενός ακουστικού σήματος σε δεδομένη θέση στον κυματοδηγό, που είναι το ζητούμενο της παρούσας εργασίας.

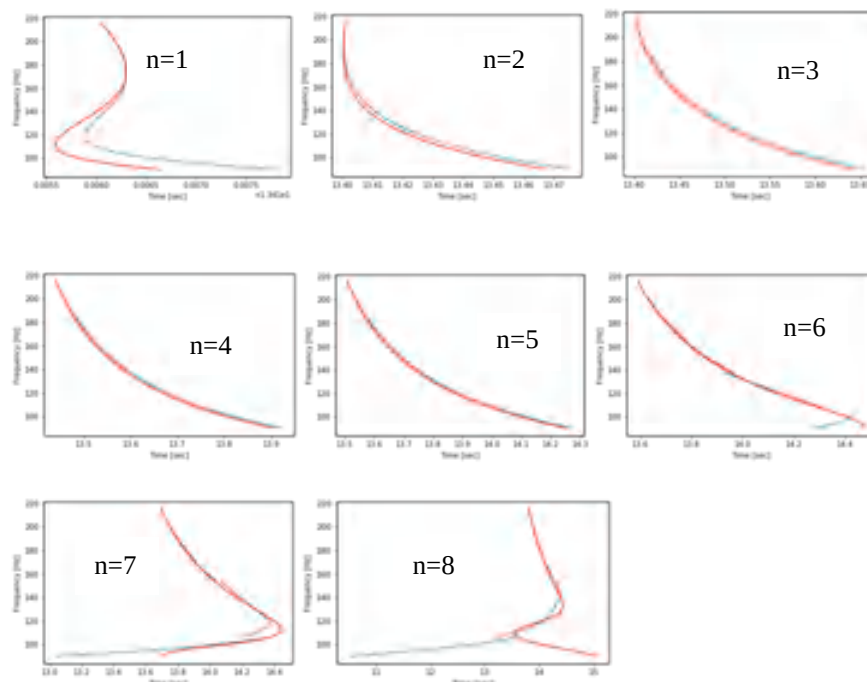
Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το ακουστικό σήμα που λαμβάνεται στο δέκτη (προσομοίωση) για το περιβάλλον του σχήματος 3.1 και για την πηγή που έχει προσομοιωθεί και το αντίστοιχο φασματογράφημα. Θα θεωρήσουμε ότι το σήμα αυτό αποτελεί το σήμα ελέγχου για την πιστοποίηση (validation) του νευρωνικού δικτύου. Παρατηρούμε στο σχήμα 3.2, την παρουσία 8 τουλάχιστον ιδιομορφών διάδοσης.

Στις ομάδες σχημάτων 3.3 παραθέτουμε τις καμπύλες διασποράς υπολογιζόμενες θεωρητικά από το πρόγραμμα MODE1 (κόκκινες καμπύλες) καθώς και αυτές που παίρνουμε από τον νευρωνικό δίκτυο (πολύχρωμες) αφού έχουμε υπολογίσει τους συντελεστές των κυβικών splines μέσω του C.N.N. Κάθε διαφορετικό χρώμα αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό κυβικό πολυώνυμο spline που περιγράφει την καμπύλη στο αντίστοιχο υποδιάστημα. Επιλέξαμε 8 κόμβους, δηλαδή 7 διαστήματα ($k=7$), πάνω σε όλες τις διαθέσιμες συχνότητες με βήμα 128. Ο υπολογισμός έγινε για τις 8 πρώτες διαδιδόμενες ιδιομορφές.

Τα αποτελέσματα κρίνονται ως πολύ καλά για τις καμπύλες διασποράς που αφορούν τις ιδιομορφές 1 έως 6 και για το μεγαλύτερο εύρος των ιδιομορφών 7 και 8. Παρατηρούμε ότι το C.N.N. δεν μπορεί να αποδώσει σωστά την περιοχή της Airy phase [2], (ιδιομορφές 6 και 8) που αντιστοιχούν στις πολύ χαμηλές συχνότητες του ακουστικού σήματος. Οι διαφορές που παρατηρούνται στην πρώτη ιδιομορφή δεν είναι σημαντικές μια και γίνεται μεγέθυνση στο πεδίο του χρόνου σε σχέση με τις υπόλοιπες ιδιομορφές. Οι όποιες ανακρίβειες παρατηρούνται δεν φαίνεται να είναι πρόβλημα για τις πραγματικές εφαρμογές, καθώς συνήθως δεν χρησιμοποιούμε αυτές τις ακραίες περιοχές συχνοτήτων από τις καμπύλες διασποράς για την ανάκτηση πληροφοριών για το περιβάλλον. Κατά συνέπεια, θα μπορούσαμε απλώς να αποκόψουμε τα άκρα και να συνεχίσουμε με τις υπόλοιπες καμπύλες για την υλοποίηση προβλημάτων γεωακουστικών αντιστροφών.



Σχήμα 3.2 Το ακουστικό σήμα και το φασματογράφημα της εφαρμογής



Σχήμα 3.3 Σύγκριση θεωρητικών και εκτιμώμενων καμπύλων διασποράς για τις 8 πρώτες ιδιομορφές, με βάση τους χρόνους άφιξης της εκάστοτε ιδιομορφής.

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία μελετήσαμε το πρόβλημα της περιγραφής των καμπύλων διασποράς που περιγράφουν τη δομή ενός ακουστικού σήματος σε θαλάσσιο κυματοδηγό μέσω κυβικών splines και ταυτόχρονα την εκτίμηση των συντελεστών των splines μέσω συνελκτικού νευρωνικού δικτύου (C.N.N) που εκπαιδεύεται να υπολογίζει τους συντελεστές, με δεδομένο το φασματογράφημα ενός καταγραφέντος ακουστικού σήματος. Από την μελέτη συγκεκριμένης περίπτωσης που παρουσιάστηκε στην εργασία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.

Η απόδοση των καμπύλων διασποράς μέσω κυβικών splines φαίνεται να είναι πολύ καλή με εξαίρεση τις ιδιομορφές που εμφανίζουν αναδίπλωση των καμπύλων στις χαμηλές συχνότητες (Airy Phase).

Βελτίωση της απεικόνισης μπορεί να γίνει με εφαρμογή κανόνων ομαλότητας των splines στους κόμβους του διμερισμού με ταυτόχρονη αλλαγή της συνάρτησης σφάλματος του νευρωνικού δικτύου.

Τέλος θα μπορούσε να εξετασθεί η χρήση του νευρωνικού δικτύου και για την εκτίμηση των παραμέτρων του θαλάσσιου κυματοδηγού παράλληλα με την εξαγωγή των συντελεστών των splines που περιγράφουν τις καμπύλες διασποράς, αφού η εκμάθησή του δικτύου γίνεται με χρήση συνθετικών κυματοδηγών που βασίζονται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές παραμέτρους.

5. Αναφορές

- [1] Olga Sambataro, Costas Smaragdakis, and Michael Taroudakis. «A comparison of processing techniques applied to time-frequency representation of acoustic signals intended for geoacoustic inversions». in Proceedings Forum Acusticum, Dec 2020, Lyon, France. pp.1991-1997, 10.48465/fa.2020.0351 hal-03240244 (2021).
- [2] James W Cooley and John W Tukey. “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series”. Mathematics of Computation Vol 19, No 90, pp 297-301 (1965).
- [3] Finn B Jensen, William A Kuperman, Michael B Porter, Henrik Schmidt: *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2011.
- [4] William Menke. *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic press, 2018.
- [5] Peter E Hart, David G Stork, and Richard O Duda. *Pattern classification*. Wiley Hoboken, 2000
- [6] Γ.Δ. Ακρίβης and Β.Α. Δουγαλής. *Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 4 edition, 2015.
- [7] Diederik P. Kingma and Jimmy Ba. Adam: A method for stochastic optimization, 2017. Published as a conference paper at the 3rd International Conference for Learning Representations, San Diego.
- [8] Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome H Friedman, and Jerome H Friedman. *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, volume 2*. Springer, 2009.



Παραγωγή ήχων από το λεοντόψαρο (Pterois miles), επίδραση του μεγέθους και του φύλου.

Χρύσα Δόξα^{1,4*}, Σ. Κουζούπης^{2,3}, Π. Παπαδάκης³,
 Ν. Μιτριζάκης⁴, Μ. Κεντούρη⁴, Μ. Παυλίδης⁴
¹ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., ²ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ., ³Ι.Τ.Ε., ⁴Παν. Κρήτης
[*chrisadox@hcmr.gr](mailto:chrisadox@hcmr.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το λεοντόψαρο, *Pterois miles*, είναι ένα είδος τροπικού ψαριού που εισέβαλε στην Μεσόγειο θάλασσα μέσω της διώρυγας του Σουέζ, και εμφανίστηκε πολύ πρόσφατα στις Ελληνικές θάλασσες (2015). Είναι χωροκατακτητικό είδος και θεωρείται ένα από τα πλέον επικίνδυνα εισβολικά είδη, όσον αφορά τις επιπτώσεις του στην αυτόχθονη ιχθυοπανίδα, καθώς τρέφεται κυρίως με νεαρά άτομα ψαριών. Στην παρούσα εργασία μελετάται η παραγωγή ήχων από τα λεοντόψαρα με απώτερο στόχο την διερεύνηση της χρήσης των ως «ακουστικά εργαλεία» για τον πληθυσμιακό έλεγχο των λεοντόψαρων στη φύση. Αναλύθηκαν 2656 ηχητικά αποσπάσματα από τα οποία προέκυψε ότι τα λεοντόψαρα ανεξαρτήτως μεγέθους και φύλου, παράγουν ήχους καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου. Θα παρουσιαστούν αποτελέσματα για τον αριθμό των παραγόμενων ήχων καθώς και αναλύσεις από την αλληλουχία των διαφορετικών ήχων. Με βάση αυτά θα σχολιαστούν και κάποια συμπεριφορικά πρότυπα.

Sound production by the lionfish (Pterois miles), effect of size and sex.

ABSTRACT

The lionfish, *Pterois miles*, is a species of tropical fish that invaded the Mediterranean Sea via the Suez Canal and was first observed in Greek waters in 2015. It is an invasive species and is considered one of the most harmful in terms of its impact on native fish populations, as it primarily preys on juvenile fish. This study examines the production of sounds by lionfish, with the ultimate aim of exploring their potential use as "auditory tools" for population control in the wild. A total of 2,656 sound clips were analyzed, revealing that lionfish of both sexes and all studied size groups produce sounds throughout the 24-hour period. The results regarding the number of sounds produced per hour across the day will be presented, along with analyses of the different sound sequences. Additionally, some related behavioral patterns will be discussed.

Εισαγωγή

Η Μεσόγειος θάλασσα έχει μετατραπεί σε hotspot για ξενικά είδη, με τα taxa που έχουν εγκαθιδρυθεί να παρουσιάζουν αύξηση 40% μέσα στην τελευταία δεκαετία, και ο αριθμός των αλλόχθονων ειδών που έχουν καταγραφεί να προσεγγίζει τα 1000 μέχρι το τέλος του 2021 [1]. Το λεοντόψαρο, *Pterois miles* (Bennett 1828), είναι ένα είδος τροπικού ψαριού που εισέβαλε στην Μεσόγειο θάλασσα μέσω της διώρυγας του Σουέζ, και εμφανίστηκε πολύ πρόσφατα (2015) στις Ελληνικές θάλασσες [2]. Έκτοτε εξαπλώθηκε σε όλη σχεδόν την επικράτεια και ανέπτυξε μεγάλους πληθυσμούς νότια των Δωδεκανήσων και στην Κρήτη. Θεωρείται ένας από τους πιο επιτυχημένους εισβολείς [3], καθώς εμφανίζει αυξημένα ποσοστά θήρευσης της αυτόχθονης πανίδας, μεταβάλλοντας την δομή της τοπικής κοινότητας. Η παρουσία του σε ένα οικοσύστημα μπορεί να μειώσει την στρατολόγηση αυτόχθονων ειδών ψαριών, οδηγώντας σε μείωση των πληθυσμών [4] επιφέροντας σοβαρές επιπτώσεις στη λειτουργία του θαλάσσιου οικοσυστήματος [5]. Τα λεοντόψαρα είναι ένα είδος ψαριού που παράγει ήχους. Στην παρούσα εργασία μελετάται η παραγωγή ήχων από τα λεοντόψαρα με απώτερο στόχο τη διερεύνηση της χρήσης των ως «ακουστικά εργαλεία» για τον πληθυσμιακό έλεγχο των λεοντόψαρων στη φύση.

Οι πρώτες αναφορές για την ικανότητα των ψαριών να παράγουν ήχους, ήταν από τον Αριστοτέλη (384-322 π.Χ.). Στην πραγματεία του, «Η ιστορία των ζώων», αναφέρει πολλά είδη ψαριών που παρήγαγαν ήχους και παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά των ήχων αυτών. Τα ψάρια χρησιμοποιούν τους ήχους για διάφορους σκοπούς [6]. Μερικά είδη παράγουν ήχους για να επικοινωνήσουν με άλλα ψάρια, είτε για την αναπαραγωγή, είτε για να δείξουν κοινωνική ιεραρχία. Άλλα είδη παράγουν ήχους ως μέρος της κυνηγητικής συμπεριφοράς τους για να προσελκύσουν τα θύματά τους. Τέλος, ορισμένα ψάρια παράγουν ήχους για άμυνα ή για να αποθαρρύνουν θηρευτές. Το λεοντόψαρο είναι ένα είδος ψαριού που παράγει ήχους [7,8]. Στην παρούσα εργασία μελετάται η παραγωγή ήχων από λεοντόψαρα διαφορετικού μεγέθους και φύλου.

1. Υλικά και μέθοδοι

1.1. Πειραματική δεξαμενή

Η πειραματική δεξαμενή ήταν διαστάσεων 150x120x110cm και χωρητικότητας 2m³ στην οποία είχαν τοποθετηθεί δύο υδρόφωνα (Εικόνα 1Α) συνδεδεμένα με μία συσκευή καταγραφής ήχου. Η δεξαμενή πληρώθηκε με νερό αλατότητας 35ppt, η θερμοκρασία καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος διατηρήθηκε σταθερή στους 22 ± 0,5°C και ο κορεσμός οξυγόνου, παρά την έλλειψη παροχής αέρα για την ελαχιστοποίηση εξωτερικών θορύβων, διατηρήθηκε σταθερά πάνω από 88%. Η φωτοπερίοδος ρυθμίστηκε σε 14L:10D με την χρήση φωτιστικού τεχνολογίας LED, ενώ προσομοιώθηκε η ανατολή και η δύση του ηλίου διάρκειας 1 ώρας με σταδιακή αύξηση και μείωση της έντασης του φωτός. Εκτός από την καταγραφή του ήχου, μπροστά από το γυάλινο τοίχωμα της δεξαμενής τοποθετήθηκε βιντεοκάμερα για την καταγραφή εικόνας



Εικόνα 1: Α) Πειραματική δεξαμενή καταγραφής ήχων εξοπλισμένη με δύο υδρόφωνα. Β) Λεοντόψαρο *Pterois miles*

1.2. Πειραματικός πληθυσμός

Εννέα άγρια λεοντόψαρα (Εικόνα 1Β) συλλέχθηκαν από την περιοχή του κόλπου του Ηρακλείου και μεταφέρθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Φυσιολογίας Ιχθύων του Πανεπιστημίου Κρήτης όπου τοποθετήθηκαν για εγκλιματισμό σε κυλινδρική δεξαμενή χωρητικότητας 400L. Τα ψάρια παρέμειναν σε κλειστό κύκλωμα παροχής νερού με βιολογικό φίλτρο μέχρι την μεταφορά τους στην πειραματική δεξαμενή και επέστρεψαν μετά το τέλος της κάθε δοκιμής. Η θερμοκρασία, η αλατότητα και ο κορεσμός οξυγόνου παρέμειναν σταθερά στο $22 \pm 0,5^\circ\text{C}$, 35ppt και $>90\%$ αντίστοιχα. Επειδή υπήρχε ανομοιομορφία στο μέγεθος τα λεοντόψαρα χωρίστηκαν σε 3 ομάδες ανάλογα με το μέγεθός τους (Πίνακας 1). Μετά τη λήξη της πειραματικής διαδικασίας τα ψάρια θανατώθηκαν, μετρήθηκε το μήκος και το βάρος τους και αναγνωρίστηκε το φύλο τους. Το μέσο μήκος και βάρος των μικρών ατόμων ήταν $15,5 \pm 3,8\text{cm}$ και $54,4 \pm 35,1\text{g}$ αντίστοιχα, των μεσαίων $23,3 \pm 1\text{cm}$ και $167,6 \pm 25,4\text{g}$ και των μεγάλων $27,7 \pm 2,3\text{cm}$ και $306,5 \pm 68,8\text{g}$. Η μικρή ομάδα αποτελούνταν από ένα ανώριμο και δύο θηλυκά άτομα, η μεσαία ομάδα από ένα αρσενικό και δύο θηλυκά άτομα και η μεγάλη ομάδα από 3 αρσενικά άτομα.

Έπειτα από την καταγραφή 24h που πραγματοποιήθηκε στην δεξαμενή χωρίς ψάρια (μάρτυρας), η κάθε ομάδα ψαριών τοποθετούνταν στην δεξαμενή για 3 συνεχόμενα εικοσιτετράωρα κατά την διάρκεια των οποίων πραγματοποιούνταν καταγραφή ήχου και εικόνας. Έπειτα, όλα τα ηχητικά αποσπάσματα απομονώθηκαν με ένα αυτοματοποιημένο τρόπο βασισμένο στην ενέργεια του ήχου, αφού πρώτα μετά από δοκιμές ορίστηκε ένα κατάλληλο κατώφλι στην περιβάλλουσα του ήχου. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση όλων των ηχητικών αποσπασμάτων που καταγράφηκαν κατά το 2^ο εικοσιτετράωρο, τα οποία και για τις 3 ομάδες ανήλθαν σε 2656 εκ των οποίων τα 1758 αντιστοιχούσαν σε ήχους που παρήγαγαν τα λεοντόψαρα.

Πίνακας 1 Βιομετρικά χαρακτηριστικά πληθυσμού λεοντόψαρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική καταγραφή ήχων.

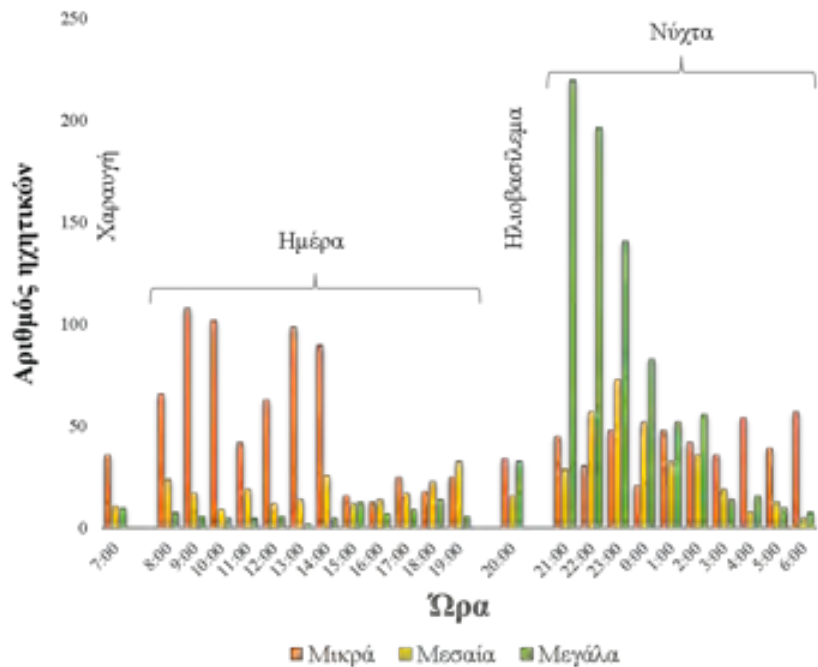
A/A	Μήκος (cm)	Βάρος (g)	Φύλο	Ομάδα
1	11,5	22,6	Αδιευκρίνιστο	Μικρά
2	16,0	48,7	Θηλυκό	Μικρά
3	19,0	92,0	Θηλυκό	Μικρά
4	22,5	152,7	Θηλυκό	Μεσαία
5	23,0	153,2	Αρσενικό	Μεσαία
6	24,5	197,0	Θηλυκό	Μεσαία
7	25,5	256,7	Αρσενικό	Μεγάλα
8	27,5	277,9	Αρσενικό	Μεγάλα
9	30,0	385,0	Αρσενικό	Μεγάλα
10	11,5	22,6	Αδιευκρίνιστο	Μικρά

2. Αποτελέσματα

Αναλύθηκαν 2656 ηχητικά αποσπάσματα (clips) από τα οποία προέκυψε ότι τα λεοντόψαρα όλων των μεγεθών και των δύο φύλων παράγουν ήχους καθ' όλη την διάρκεια της μέρας. Τα μικρά άτομα εμφάνισαν την μέγιστη ηχητική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταξύ 9:00-14:00 ενώ τα μεσαία και τα μεγάλα παρήγαγαν περισσότερους ήχους τις πρώτες νυχτερινές ώρες και συγκεκριμένα μεταξύ 21:00 – 00:00 (Εικόνα 2).

Παρατηρήθηκε επίσης μεγάλη ποικιλία διαφορετικών ήχων, κάποιοι από τους οποίους συνδέθηκαν με συμπεριφορικά πρότυπα. Το πιο κοινό ηχητικό συμβάν που καταγράφηκε από τα άτομα όλων των μεγεθών ήταν τα τριξίματα (grinding) τα οποία συνδέθηκαν με το ανοιγοκλείσιμο το στόματος. Τα μεγάλα και μεσαία άτομα κατά την διάρκεια της νύχτας παρήγαγαν πολλές ακολουθίες τριξιμάτων που αποτελούνταν από 2 έως 14 σύντομα ή/και μακρόσυρτα τριξίματα. Τα τριξίματα σε κάποιες περιπτώσεις συνδυάστηκαν και με άλλους ήχους όπως γδούπους (thumps) και κλικ (click/snap). Ένας ακόμη κοινός ήχος, που συνδέθηκε με το ανοιγοκλείσιμο του στόματος και την εκτίναξη των λεοντόψαρων, είναι ένα είδους «κλικ» (snap, click) που παρήγαγαν τα άτομα όλων των μεγεθών. Το κλικ συνδυάστηκε και με άλλους ήχους όπως γδούπους, τριξίματα και μπάσους. Ένας ακόμη ήχος κοινός για όλα τα μεγέθη ήταν οι «γδούποι» (thumps) που είχαν μικρότερη συχνότητα εμφάνισης, και ήταν μεμονωμένοι, επαναλαμβανόμενοι ή σε συνδυασμό με άλλους ήχους όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες ήχων που κατεγράφησαν.



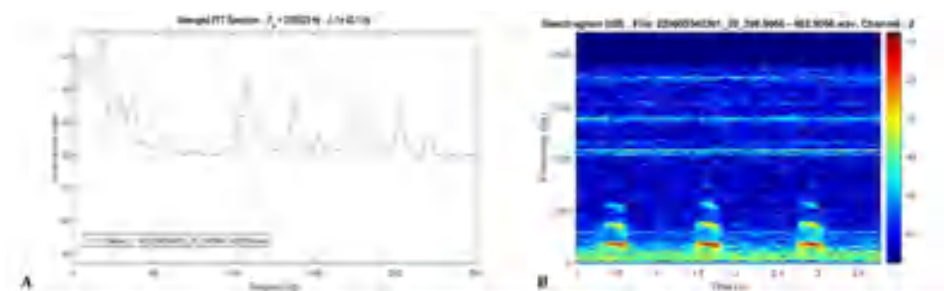
Εικόνα 2: Στο γράφημα παρουσιάζεται η σύγκριση του αριθμού των ήχων ανά ώρα, που παρήγαγαν οι ομάδες των μικρών, των μεσαίων και των μεγάλων ατόμων στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου

Πίνακας 2: Οι καταγεγραμμένες κατηγορίες ήχων και η συχνότητα εμφάνισής τους

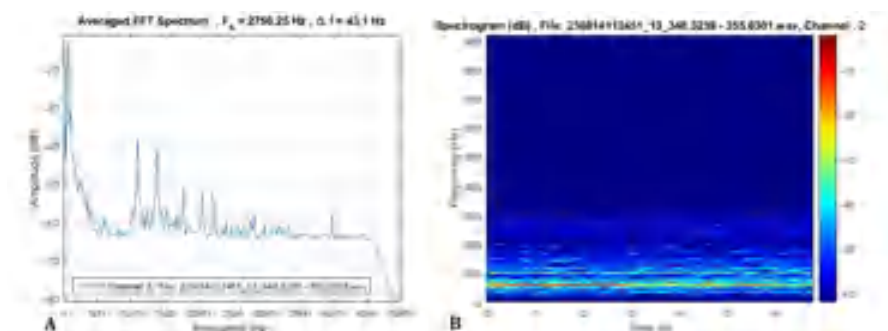
Κατηγορίες Ήχων	Μεγάλα ψάρια	Μεσαία ψάρια	Μικρά ψάρια
Κλικ	139	142	32
Τρίξιμο σύντομο	80	99	367
Τρίξιμο επαναλαμβανόμενο	335	90	74
Τρίξιμο επαναλαμβανόμενο, σύντομο και μακρόσυρτο	109	133	-
Τρίξιμο και Κλικ ή Γδούπος	5	6	11
Τρίξιμο μακρόσυρτο	-	9	-
Γδούπος	2	11	20
Γδούπος και Κλικ	3	1	-
Στεναγμός	6	-	-
Χτύπος	-	3	1
Μπάσος ήχος	4	53	-
Μπάσος ήχος και Κλικ ή Τρίξιμο ή Γδούπος	1	22	-

Από την ανάλυση των καταγεγραμμένων ήχων προέκυψαν και δύο εντελώς διαφορετικοί ήχοι. Στα μεγάλα άτομα καταγράφηκαν 6 ηχητικά συμβάντα που περιείχαν 1 έως 3 «στεναγμούς» (moans) όλοι μέσα στις 3 πρώτες ώρες της ημέρας αλλά δεν συσχετίστηκαν με κάποιο συμπεριφορικό πρότυπο. Τέλος, στα μεσαία άτομα σε μεγάλο αριθμό και στα μεγάλα σε πολύ μικρότερο, καταγράφηκε ένας «μπάσος» ήχος (bass tremor) που παραγόταν καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου.

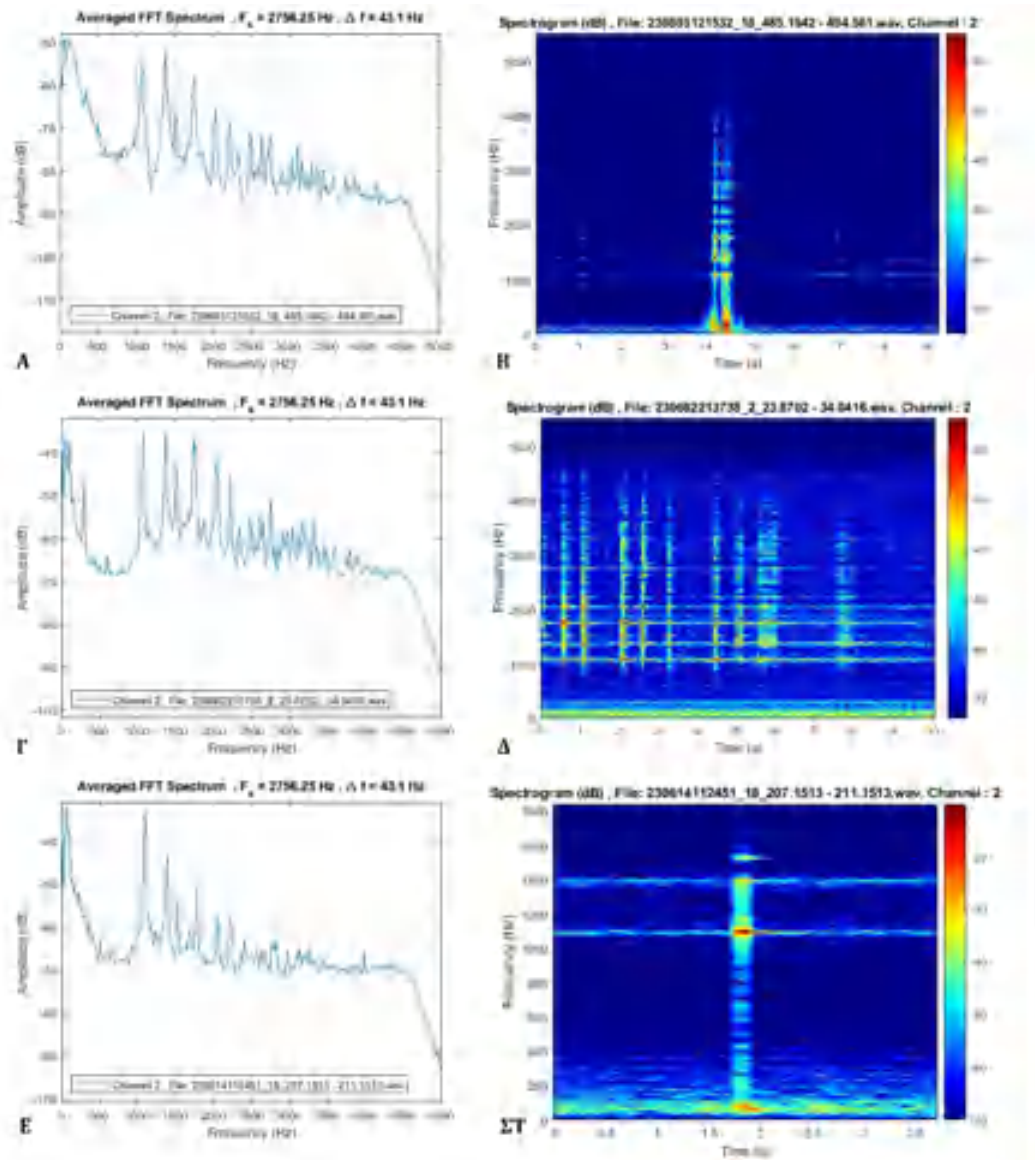
Για κάθε είδος ήχου υπολογίστηκαν τα μέσα φάσματα ισχύος των καταγεγραμμένων ήχων και τα φασματογράφημα τους. Ενδεικτικά στις εικόνες 3 και 4 παρουσιάζονται τα παραπάνω, για τους στεναγμούς (moans) και τους «μπάσους» ήχους (bass tremors), ενώ στην εικόνα 5, απεικονίζεται το μέσο φάσμα των ηχητικών κλικ που συνδυάστηκαν με μουγκρητά (grunts), γδούπους (thumps) και χτύπους (knocks).



Εικόνα 3: Στο γράφημα A απεικονίζεται το μέσο φάσμα των ηχητικών στεναγμών μεγάλων ατόμων και στο γράφημα B το φασματογράφημά τους.



Εικόνα 4: Στο γράφημα A απεικονίζεται το μέσο φάσμα των «μπάσων» ήχων (bass tremors) των μεσαίων ατόμων και στο γράφημα B το φασματογράφημά τους.



Εικόνα 5: Στα γραφήματα Α, Γ και Ε απεικονίζεται το μέσο φάσμα των σύντομων τριζιμάτων, των επαναλαμβανόμενων τριζιμάτων και των ηχητικών κλικ και αντίστοιχα στα Β, Δ και ΣΤ τα φασματογράφηματά τους.

Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν την παραγωγή ήχων από λεοντόψαρα, που έχουν καταγραφεί σε συνθήκες αιχμαλωσίας [7] και στο φυσικό περιβάλλον [8]. Μελετήθηκε για πρώτη φορά η επίδραση του μεγέθους και του φύλου στην παραγωγή ήχων από τα λεοντόψαρα. Τα άτομα όλων των μεγεθών και των δύο φύλων παρήγαγαν ήχους. Σε αντίθεση με τα ευρήματα των Beattie et al. [7], τα λεοντόψαρα της παρούσας μελέτης παρήγαγαν ποικιλία διαφορετικών ήχων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας σε συνθήκες ηρεμίας και όχι μετά από αναστάτωση. Καταγράφηκε μεγάλη ποικιλία ήχων, κάποιοι από τους οποίους είναι αντίστοιχοι με αυτούς που περιγράφονται τόσο σε συνθήκες αιχμαλωσίας [7], όσο και στο φυσικό περιβάλλον [8], αλλά και κάποιοι άλλοι είναι πρωτόγνωροι και εντυπωσιακοί όπως οι στεναγμοί των μεγάλων ατόμων και οι μπάσοι ήχοι που καταγράφηκαν κυρίως στα μεσαία άτομα.

Βιβλιογραφία

- [1] Zenetos, A., Albano, P. G., Garcia, E. L., Stern, N., Tsiamis, K., & Galanidi, M., Established non-indigenous species increased by 40% in 11 years in the Mediterranean Sea. *Mediterr. Mar. Sci.* **23(1)**, pp 196-212 (2022).
- [2] Kytinou E, Issaris Y, Azzurro E, Castriota L, Falautano M, Kalimeris A, & Katsanevakis S., Updating the occurrences of Pterois miles in the Mediterranean Sea, with considerations on thermal boundaries and future range expansion. *Mediterr. Mar. Sci.* **21**, pp 62–69 (2020).
- [3] Côté, I.M.; Smith, N.S., The lionfish Pterois sp. invasion: Has the worst-case scenario come to pass? *Fish Biol.* **92**, pp660-689 (2018).
- [4] Green, S.J.; Akins, J.L.; Maljkovi, A.; Côté, I.M., Invasive lionfish drive Atlantic coral reef fish declines. *PLoS ONE* **7**, e32596 (2012).
- [5] Layman, C.A.; Allgeier, J.E., Characterizing trophic ecology of generalist consumers: A case study of the invasive lionfish in The Bahamas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **448**, pp 131-141 (2012).
- [6] Popper, A.N., Amorim, C., Fine, M.L., Higgs, D.M., Mensinger, A.F., Sisneros J.A., Introduction to the special issue on fish bioacoustics: Hearing and sound communication. *J. Acoust. Soc. Am.* **155(4)**, pp 2385–2391 (2024).
- [7] Beattie, M., Nowacek, D.P., Bogdanoff, A.K., Akins, L., Morris, J.A., The roar of the lionfishes Pterois volitans and Pterois miles. *J. Fish. Biol.* **90(6)**, pp 2488–2495 (2017).
- [8] Schärer-Umpierre, M.T., Zayas-Santiago, C., Appeldoorn, R.S., Tuohy, E., Olson, J.C., Keller, J.A., Acosta, A., The purr of the lionfish: Sound and behavioral context of wild lionfish in the greater Caribbean. *Gulf Caribb. Res.* **30(1)**, pp GCFI15–GCFI19 (2019).



Ξύλο ή Μέταλλο; Επίδραση του Υλικού στο Ηχόχρωμα των Φλάουτων

Διονύσιος Θ. Γ. Κατερέλος

Αν/τής Καθηγητής,

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μουσικής Ακουστικής και Ταλαντώσεων, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Στ. Τυπάλδου, Ληξούρι, 28200

dkaterelos@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα ζητήματα της απόδοσης ενός μουσικού οργάνου είναι αν το υλικό κατασκευής του παίζει ρόλο στο ηχόχρωμά του. Οι περισσότερες από τις προσπάθειες απάντησης του ερωτήματος αυτού βασίζονται στην ακρόαση μουσικών οργάνων κατασκευασμένων από διαφορετικά υλικά. Στο άρθρο αυτό επιλέχθηκε το φλάουτο για τη διερεύνηση της επίδρασης του υλικού κατασκευής στο ηχόχρωμα. Εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις. Στην πρώτη καταγράφηκαν ένα μεταλλικό και ένα ξύλινο φλάουτο. Στη δεύτερη καταγράφηκε ένα μεταλλικό φλάουτο με ξύλινη και μεταλλική κεφαλή. Ο παραγόμενος ήχος επεξεργάστηκε για την εξαγωγή φασματογραφήματος. Οι ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης της αέριας στήλης, που προέκυψαν από τα φασματογραφήματα αναλύθηκαν και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι το υλικό παίζει ρόλο στο ηχόχρωμα, αν και οι καταγραφείσες διαφορές δεν είναι αντιληπτές.

Wood or Metal? Materials Influence on the Flutes Sound Timbre

ABSTRACT

One issue in musical instruments performance is whether the materials that are used to manufacture a musical instrument play role in the sound timbre produced by the instrument. Several attempts presented to answer this question are mostly based on listening musical instruments manufactured from different materials. In this paper the flute was chosen to investigate the manufacturing materials effect on the sound timbre. Two cases were examined. In the first two flutes, a metallic and a wooden were recorded. In the second, a metallic flute with two head joints, one metallic and the other wooden were recorded. The sound produced in all four cases was processed to extract the sound spectrograms. Examining in detail the spectrograms, analysing the eigenfrequencies of the vibrating aerial column and comparing the results corresponding to the same notes lead to the conclusion that the material plays a role in the sound timbre, although differences could be non-listened by the musician or a listener.

Εισαγωγή

Η επίδραση των υλικών στα μουσικά όργανα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της ποιότητας του ήχου και του ηχοχρώματος, το οποίο αναφέρεται στις αρμονικές που παράγονται από ένα όργανο. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα συνεχίζεται, με το Miller [1] να είναι από τους πρώτους που συνέδεσαν το υλικό των πνευστών οργάνων με το ηχοχρώμα τους. Παρά τον αρχικό σκεπτικισμό, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα υλικά επηρεάζουν τον τόνο, αν και οι λόγοι παραμένουν ασαφείς. Ο Backus [2] προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει αυτή την επίδραση στα κλαρινέτα, αλλά δεν βρήκε σημαντική διαφορά μεταξύ ξύλινων και πλαστικών μοντέλων. Πολλές μελέτες, όπως αυτές των Berger [3] και Coltman [4], βασίστηκαν σε ακουστικά τεστ για να εξετάσουν τις διαφορές στο ηχοχρώμα μεταξύ οργάνων κατασκευασμένων από διάφορα υλικά όπως ξύλο, ασημί και χαλκό. Τα αποτελέσματα συχνά ήταν ασαφή, με τους ακροατές να μην μπορούν να διακρίνουν σημαντικές διαφορές στον τόνο.

Πιο πρόσφατες μελέτες διεύρυναν την έρευνα, εστιάζοντας στη δραστηριότητα του εγκεφάλου και την επίδραση του υλικού στο φλάουτο. Για παράδειγμα, οι Cocchi και Tronchin [5] μέτρησαν τις διαφορές στην ποιότητα του ήχου μεταξύ νέων και παλαιών μεταλλικών φλάουτων, ενώ η Hurtgen [6] εξερεύνησε τις σύνθετες δονήσεις που προκαλούνται από τα υλικά του τοιχώματος του φλάουτου. Οι Widholm κ. ά. [7] πραγματοποίησαν διπλές-τυφλές δοκιμές, δείχνοντας ότι το υλικό δεν είχε σημαντική επίδραση στον τόνο. Έρευνες [8-10] για τις κεφαλές των φλάουτων έδειξαν επίσης ότι ο κατασκευαστής του οργάνου είχε μεγαλύτερη επίδραση στις αρμονικές από το ίδιο το υλικό.

Αυτό το άρθρο συγκρίνει ξύλινα και μεταλλικά φλάουτα αναλύοντας τα φασματογραφήματά τους, αποκαλύπτοντας διαφορές στο ηχοχρώμα. Εξετάζεται επίσης η επίδραση των κεφαλών φλάουτου από διάφορα υλικά. Απαιτείται περαιτέρω αξιολόγηση από μουσικούς για να κατανοηθεί πλήρως η σημασία αυτών των ευρημάτων.

1. Πειραματική διαδικασία

1.1 Ηχογράφηση και μετρήσεις ήχου

Η μέτρηση του φάσματος ενός μουσικού οργάνου είναι ένα πολύπλοκο θέμα [11]. Στην περίπτωση που εξετάστηκε, χρησιμοποιήθηκε το στούντιο ηχογράφησης του πρώην Τμήματος Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων του πρώην ΤΕΙ Ιονίων Νήσων για την ηχογράφηση του ήχου που παρήχθη από τα δύο όργανα. Δύο έμπειροι φλαουτίστες κλήθηκαν να παίξουν τα φλάουτα. Ο θόρυβος περιβάλλοντος μετρήθηκε πριν το παίξιμο με τη χρήση του ηχομέτρου Brüel & Kjær 2250 τύπου I. Για να μειωθεί η μεταβλητότητα στο στυλ παιξίματος, οι μουσικοί έπαιξαν και με τα δύο όργανα. Ηχογραφήθηκαν όλες οι νότες της ντο μείζονος κλίμακας και κάθε νότα ηχογραφήθηκε τέσσερις φορές, συγκεντρώνοντας συνολικά 72 σήματα από κάθε όργανο. Οι ηχογραφημένες ηχητικές ενδείξεις αποθηκεύτηκαν σε υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία σήματος.

Ο ήχος ηχογραφήθηκε με τη μέθοδο κλειστής τοποθέτησης μικροφώνων, ώστε

να υπάρξει εστίαση στον ίδιο τον ήχο του οργάνου, χωρίς επιρροή από εξωτερικούς παράγοντες. Χρησιμοποιήθηκαν επτά μικρόφωνα, τοποθετημένα συμμετρικά γύρω από τον μουσικό. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μικροφώνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1.1 Γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μικροφώνων που χρησιμοποιήθηκαν

Τύπος μικροφώνου	Audio Technica 4050 (i and vi)	Behringer ECM8000 (ii and v)	AKG C451-B (iii and iv)	AKG C414 B-ULS (vii)
Αρχή μετατροπής	Πυκνωτικό	Πυκνωτικό	Πυκνωτικό	Πυκνωτικό
Πολικό διάγραμμα	Παντοκατευθυντικό, καρδιοειδές και δι-κατευθυντικό	Παντοκατευθυντικό	Καρδιοειδές	Παντοκατευθυντικό, καρδιοειδές, υπερ-καρδιοειδές και δι-κατευθυντικό
Συχνотική απόκριση	20 Hz-18 kHz	15 Hz-20 kHz	20 Hz-20 kHz	20 Hz-20 kHz

Η επιλογή μικροφώνων βασίστηκε στην καμπύλη απόκρισης συχνότητας. Χρησιμοποιήθηκαν μικρόφωνα με μικρή και μεγάλη διάμετρο διαφράγματος για καλύτερη απόκριση σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες αντίστοιχα. Ο εξοπλισμός ελέγχου περιλάμβανε έναν ελεγκτή C24, ηχεία, λογισμικό και κάρτα ήχου. Τα μικρόφωνα ήταν συνδεδεμένα με την αίθουσα ελέγχου μέσω πολυπλέκτη.

1.2 Φλάουτα από μέταλλο και ξύλο

Το φλάουτο αποτελείται από τρία κύρια μέρη: τον αρμό (ποδαράκι), το σώμα και την κεφαλή. Στην περίπτωση που εξετάστηκε, τα δύο φλάουτα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου Boehm, με τις ίδιες γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες, με μόνη διαφορά το υλικό κατασκευής. Το ένα φλάουτο ήταν μεταλλικό από κράμα νικελίου-ασημιού, ενώ το δεύτερο ήταν ξύλινο, κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από έβενο. Η κεφαλή και τα μηχανικά μέρη και των δύο οργάνων ήταν κατασκευασμένα από κράμα νικελίου-ασημιού.

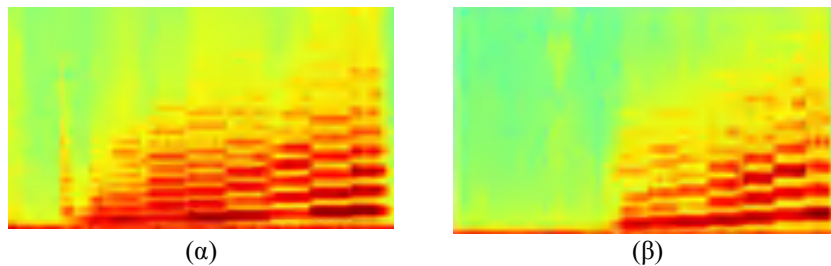
1.2 Κεφαλές φλάουτου

Στη δεύτερη φάση του πειράματος, ερευνήθηκε η επίδραση του υλικού της κεφαλής του φλάουτου στο ηχόχρωμα. Χρησιμοποιήθηκε ένα φλάουτο Yamaha 271, με δύο διαφορετικές κεφαλές: μία μεταλλική και μία ξύλινη κατασκευασμένη από τριανταφυλλιά. Ο μουσικός έπαιξε νότες σε όλες τις οκτάβες, και ο ήχος

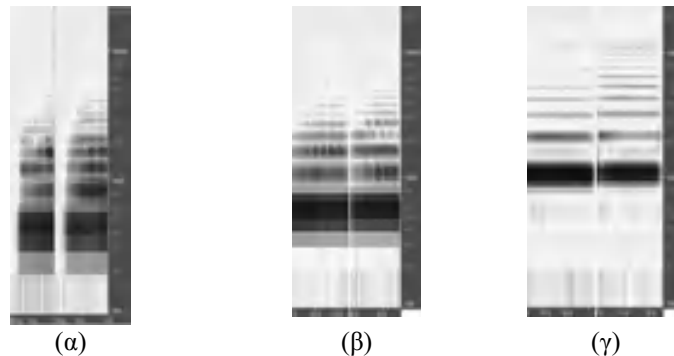
ηχογραφήθηκε με την ίδια μέθοδο όπως παραπάνω.

2. Αποτελέσματα

Για κάθε σήμα ηχογράφησης εφαρμόστηκε βραχυχρόνιος μετασχηματισμός Fourier (Short Time Fourier Transform - STFT). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε φασματογραφήματα, όπου ο άξονας των κάθετων αντιπροσωπεύει τις συχνότητες και ο άξονας των οριζόντιων τον χρόνο. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται το φασματογράφημα πλήρους οκτάβας από τα μεταλλικό και ξύλινο φλάουτα, ενώ στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται ενδεικτικό φασματογράφημα από το μεταλλικό φλάουτο με ξύλινη και μεταλλική κεφαλή. Τα σήματα από τις κεφαλές των φλάουτων και από τις νότες που παίχτηκαν παρουσιάζουν διαφορές στο ηχόχρωμα. Η ένταση του χρώματος ορίζει το ποσοστό συνεισφοράς της κάθε συχνότητας στο τελικό ηχόχρωμα.



Εικόνα 2.1 Φασματογράφημα σήματος πλήρους ντο μείζονος κλίμακας από (α) το μεταλλικό και (β) το ξύλινο φλάουτο



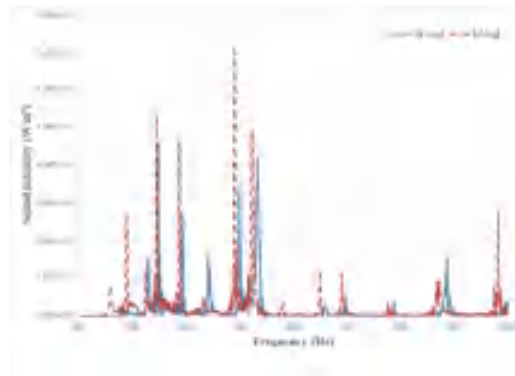
Εικόνα 2.2 Φασματογράφημα των νοτών φα(1) (α), ρε(2) (β) και ρε(3) (γ) μεταλλικού φλάουτου με μεταλλική (δεξιά) και ξύλινη (αριστερά) κεφαλή

3. Συζήτηση

3.1 Μεταλλικό και ξύλινο φλάουτο

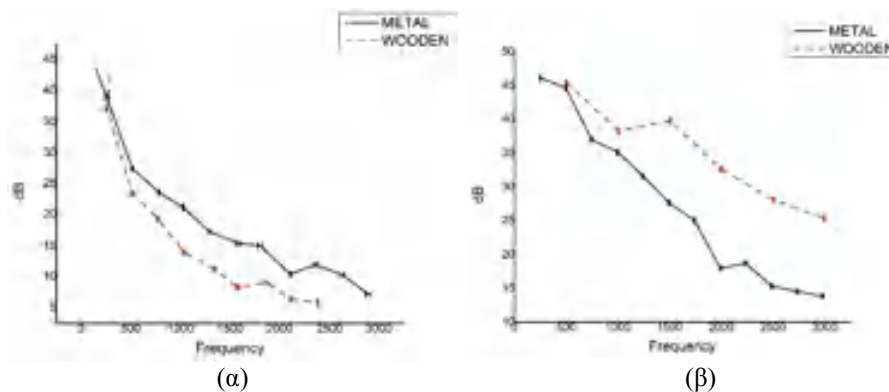
Εκ πρώτης όψεως τα φασματογραφήματα δύσκολα δείχνουν διαφορές. Όμως, αν

ειδωθούν όπως στο διάγραμμα της εικόνας 3.1, όπου παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις (πρώτες ιδιοσυχνότητες) κάθε νότας της οκτάβας, οι διαφορές εμφανίζονται, τόσο στην ένταση (που όμως εξαρτάται και από τον εκτελεστή) όσο και, ιδιαίτερα, στην τιμή κορυφής των συχνότητων, οι οποίες είναι γειτονικές αλλά διαφορετικές.



Εικόνα 3.1 Η ένταση του ήχου ως συνάρτηση της συχνότητας για πλήρη οκτάβα

Στην επόμενη εικόνα (3.2) παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν τις νότες ντο (α) και ντο(2) (β), όπου γίνονται ξεκάθαρες οι διαφορές ανάμεσα στα δύο όργανα. Η σημαντικότερη από αυτές τις διαφορές είναι ότι το μεταλλικό φλάουτο παράγει περισσότερες συχνότητες από το ξύλινο άρα έχει πιο πλούσιο ηχόχρωμα. Επίσης, παρατηρούνται διαφορές στην ένταση της κάθε συχνότητας, αλλά, όπως προαναφέρθηκε, αυτές μπορεί να οφείλονται και στον εκτελεστή. Αντίστοιχα παρατηρήθηκαν και για τις άλλες νότες στην κλίμακα.



Εικόνα 3.2 Ιδιοσυχνότητες που αποτελούν τις νότες ντο (α) και ντο(2) (β)

3.2 Μεταλλικό φλάουτο με διαφορετικές κεφαλές

Παρόμοια ευρήματα παρουσιάζονται και στην ανάλυση των μετρήσεων μεταλλικού φλάουτου με διαφορετικές κεφαλές. Εδώ το υλικό κατασκευής της

κεφαλής φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά το ηχόχρωμα, παρά μόνο ελαφρώς στις υψηλότερες αρμονικές.

4. Συμπεράσματα

Το υλικό κατασκευής ενός μουσικού οργάνου, στην προκειμένη περίπτωση του φλάουτου, επηρεάζει το ηχόχρωμα που παράγεται. Το μεταλλικό φλάουτο, γενικά, παράγει πιο πλούσιο ηχόχρωμα από το ξύλινο. Επιπλέον, οι διαφορές στις κεφαλές των φλάουτων, αν και υπαρκτές, δεν είναι τόσο σημαντικές όσο το υλικό του ίδιου του οργάνου. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση της επιρροής των υλικών κατασκευής στις ηχητικές ιδιότητες των μουσικών οργάνων.

5. Ευχαριστίες

Ο συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει για τη συνεισφορά τους, τους Μάγια Παπαγεωργίου, Μυρτώ Κορκοκίου, Μαρία Μπακάλη, Χρήστο Μυλωνά, Νίκο Διπλάρη, Γιώργο Παράσχο†, Στέλιο Μιμηλάκη, Κωνσταντίνο Δρόσο, Νίκο Λάσκαρη και Τάσο Κόκκινο

6. Αναφορές

- [1] D.C. Miller «The Influence of the Material of Wind-Instruments on the Tone Quality» *Science, New Series* **29**, pp 161-171 (1909)
- [2] J. Backus «Effect of Wall Material on the Steady-State Tone Quality of Woodwind Instruments» *J. Acoust. Soc. Am.* **36**, pp. 1881-1887 (1964)
- [3] K.W. Berger «Some Factors in the Recognition of Timbre» *J. Acoust. Soc. Am.* **36**, pp. 1888-1891 (1964)
- [4] J.W. Coltman «Effect of Material on Flute Tone Quality» *J. Acoust. Soc. Am.* **49**, pp. 520-523 (1970)
- [5] A. Cocchi and L. Tronchin «Material and Obsolescence on Flute Quality» *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, pp. 763-764 (1998)
- [6] C.M. Hurtgen «Body Vibrational Spectra of Metal Flutes Models» *J. Undergrad. Res. Phys.* **18**, pp. 26-31, (2000)
- [7] G. Widholm, R. Linortner, W. Kausel and M. Bertsch «Silver, gold, platinum—and the sound of the flute» in *Proc. International Symposium on Musical Acoustics*, 277–280 (2001)
- [8] J. Smith, J. Wolfe and M. Green «Head Joint, Embouchure Hole and Filtering Effects on the Input Impedance of Flutes» in *Proc. Stockholm Music Acoustics Conference* (2003)
- [9] N.H. Fletcher, J.W. Strong and R.K. Silk «Acoustical Characterization of Flute Head Joints» *J. Acoust. Soc. Am.* **71**, pp. 1255-1260 (1982)
- [10] C.D. Young and D. Boyd Schultz «Effects of Head Joint Material and Instrument Manufacturer on Flute Timbre, as Measured by the Intensity of the First Nine Overtones in the Harmonic Series» *Univ. Alabama McNair J.* pp. 139-154 (2009)
- [11] A.H. Benade and C.O. Larson «Requirements and Techniques for measuring the musical spectrum of the clarinet» *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, pp. 1475-1498 (1985)



Automatic Guitar String Detection Based on the Inharmonicity Coefficient

Alexandros Iliadis*, Chrisoula Alexandraki
Department of Music Technology and Acoustics
School of Music and Optoacoustic Technologies
Hellenic Mediterranean University
*mta56@edu.hmu.gr (corresponding)

ABSTRACT

This paper explores the automatic detection of guitar strings, a topic closely related to the Music Information Retrieval task of automatic music transcription. The proposed methodology draws inspiration from previous research works focusing on the inharmonicity feature of guitar strings, while presenting a straightforward approach to associating isolated note samples with a string-fret pair. The implemented algorithm is based on the computation of the inharmonicity coefficient from monophonic guitar audio recordings via partial frequency tracking and curve fitting. Furthermore, an adaptation process requiring a minimal number of audio samples to adjust the algorithm to different guitars has been implemented. The evaluation process yielded positive results, encouraging the further improvement of the algorithm to handle more complex recordings.

Αυτόματη Ανίχνευση Χορδής Κιθάρας Βάσει του Συντελεστή Αναρμονικότητας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την αυτόματη ανίχνευση χορδών κιθάρας, ένα θέμα στενά συνδεδεμένο με το ζήτημα Ανάκτησης Μουσικής Πληροφορίας της αυτόματης μεταγραφής μουσικής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αντλεί έμπνευση από προηγούμενες ερευνητικές εργασίες που επικεντρώνονται στο χαρακτηριστικό της αναρμονικότητας των χορδών κιθάρας, παρουσιάζοντας μία άμεση προσέγγιση για το συσχετισμό δειγμάτων απομονωμένων νοτών με κάποιο ζεύγος χορδής-τάστου. Ο υλοποιημένος αλγόριθμος βασίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή αναρμονικότητας από ηχογραφήσεις μονοφωνικής κιθάρας μέσω του εντοπισμού μερικών συχνοτήτων και της προσαρμογής καμπυλών. Επιπλέον, υλοποιήθηκε μια διαδικασία που απαιτεί ελάχιστα ηχητικά δείγματα για την προσαρμογή του αλγορίθμου σε διαφορετικές κιθάρες. Η διαδικασία αξιολόγησης απέφερε θετικά αποτελέσματα, ενθαρρύνοντας την περαιτέρω βελτίωση του αλγορίθμου για την αναγνώριση πιο σύνθετων ηχογραφήσεων.

Introduction

The guitar is undoubtedly one of the most popular musical instruments in contemporary music. Its distinctive sound is produced by a set of strings that vibrate between two fixed points, the bridge and the nut. Most guitars feature six strings that follow the so-called standard tuning (i.e. E2-A2-D3-G3-B3-E4), however the tuning pegs provided on the headstock can be used to alter the pitch of any string by adjusting the corresponding string tension.

During performance, a guitarist changes the pitch of the strings by pressing on them on the fretboard, thus splitting their length and restricting their vibration between the bridge and a set of thin metal strips called frets. The frets are logarithmically spaced along the fretboard, enabling the progressive rise of the pitch by one semitone when moving the finger from the neck towards the bridge of the guitar. A fretboard can typically host between 19 and 24 frets, depending on the guitar type (e.g. classical, acoustic, or electric), while the 12th fret corresponds to a pitch that is an octave higher than the pitch of the associated open string.

Based on the above, it is easy to understand that it is possible to play notes of the same pitch in different positions, which is a property shared among stringed instruments. Therefore, a guitarist with a certain level of expertise can select among different variations of string-fret pairs to play a melody or a chord. This has led to the rising popularity of guitar tablatures, a form of musical notation that indicates the finger positions on the fretboard, as an alternative to traditional sheet music which depicts the pitch and the duration of the notes (Figure 0.1). Due to this popularity of tablature notation, the task of string detection has been introduced as a prerequisite of audio to tablature transcription within the MIR research community.



Figure 0.1 Conventional score vs tablature variations of the same melody

1. Background

1.1 Related Work

Guitar tablature transcription has been a topic of interest for many years. Relevant research initiatives generally emphasize on the estimation of note-related properties (i.e. pitch, onset and offset) and instrument-related parameters (e.g. fretboard position and performing style). A significant body of these works approach the task of string detection by computing a spectral feature which correlates to the physical properties of each string and is known as *inharmonicity* [1]-[8].

A different approach introduces the concept of String-Inverse Frequencies (SIFs) for determining the string-fret pair of played notes [9], while some works have applied playability constraints by utilizing probabilistic and optimization techniques such as Hidden Markov Models (HMMs) [10], Genetic Algorithms (GAs) [1], [11] and dynamic programming [12].

Regarding machine learning approaches, a few works employ feature extraction and classification techniques such as Support Vector Machines (SVMs) [3], [4], and [8]. Additionally, a deep learning approach deploying Convolutional Neural Networks (CNNs) has also been presented recently [13], paving the road for neural networks to possibly overtake traditional signal processing and statistical methods.

Besides these initiatives, multimodal approaches combining audio and video analysis to determine the fretboard position of played notes present an alternative perspective [14], [15]. Moreover, there are similar works which focus exclusively on video information and computer vision to achieve the same goal [16], [17].

1.2 Inharmonicity

Following the main direction of the relevant literature, this paper also adopts inharmonicity as a basis for detecting guitar strings. In general, the inharmonicity coefficient of a real string is mainly a result of its stiffness and it is defined by Equation 1.1, where Q is a material-specific property known as Young's Modulus, d is the diameter of the string, l its length, and T its tension [18].

$$\beta = \frac{\pi^3 Q d^4}{64 l^2 T} \quad (1.1)$$

The effect of inharmonicity on a vibrating string is the shift of the partial frequencies from harmonics to non-integer multiples of the fundamental frequency, as expressed by Equation 1.2, where f_k is the k^{th} partial and f_0 is the fundamental frequency of the ideal string without stiffness [19].

$$f_k = k f_0 \sqrt{1 + \beta k^2}, k \geq 1 \quad (1.2)$$

Specifically for guitar strings, it has been shown that the inharmonicity coefficient $\beta(s, n)$ of a string s pressed down on fret n can be derived from the inharmonicity coefficient $\beta(s, 0)$ of the corresponding open string according to Equation 1.3 [6]. Thus, this equation allows the estimation of the inharmonicity coefficient across the entire fretboard, resulting in an inharmonicity curve per string, by computing only the coefficient of each open string.

$$\beta(s, n) = \beta(s, 0) \cdot 2^{\frac{n}{6}} \quad (1.3)$$

2. Methodology

The methodology presented in this paper applies to monophonic guitar audio recordings (i.e. recordings without overlapping notes or chords) and assumes that the pitch, as well as the onset and offset timestamps of the played notes, are known in advance. From this point onward, the circumflex symbol ($\hat{\cdot}$) will denote computed values, while the tilde symbol ($\sim$) will indicate estimated values.

2.1 Inharmonicity Computation

The process of computing the inharmonicity coefficient consists of four stages, namely *preprocessing*, *partial tracking*, *curve fitting* and *postprocessing*.

The initial step of the *preprocessing* stage is to obtain an audio spectrogram $X(t, f)$ from the audio waveform $x(t)$ of a guitar recording. To achieve this, the Short-Time Fourier Transform (STFT) using a Hann window is applied. The window length and hop size are set to 2048 and 1024 samples respectively, which correspond to 46.4ms and 23.2ms of audio at a sample rate of 44100Hz. As the frequency deviations of the partials due to the inharmonicity effect are expected to be relatively small, the windowed signal for each audio block is zero-padded to 2^{18} samples to achieve a very high frequency resolution [6]. The next step is to iteratively retrieve the computed FFT audio spectrum $X(f)$ for each audio block between the onset and offset timestamps of the target note and proceed to the next two stages, after normalizing $X(f)$ to $[0, 1]$ and applying a threshold so that all values below 0.01 (1%) are zeroed [6].

In the *partial tracking* stage, the frequency values of up to a maximum of 15 partials on each previously obtained spectrum are determined. This process is carried out by centering search windows of length $\hat{f}_0/2$ at integer multiples of the computed fundamental frequency $\hat{f}_0$ of the target note [6]. The location of the highest spectral peak inside the range of the k^{th} window corresponds to the detected partial $\hat{f}_k$. Here, it is assumed that the fundamental frequency $\hat{f}_0$ is provided by a pitch detection algorithm. If the actual fundamental frequency f_0 of the played note is known instead (e.g. from dataset annotations), $\hat{f}_0$ is computed around it similarly to the rest of the partials, essentially being identical to $\hat{f}_1$.

The purpose of the *curve fitting* stage is to compute the inharmonicity coefficient by utilizing the previously detected sets of partials. To achieve this, the formula of Equation 1.2 is initially rearranged to obtain the equivalent expression of Equation 2.1. The inharmonicity coefficient β can then be computed through non-linear least squares [3], as described in Equation 2.2. This curve fitting process is visualized in Figure 2.1 where the ideal curve $y = k^2$ is also displayed.

$$\left(\frac{f_k}{f_0}\right)^2 = k^2 + \beta k^4, k \geq 1 \quad (2.1)$$

$$\left(\frac{\hat{f}_k}{\hat{f}_0}\right)^2 \approx k^2 + \hat{\beta} k^4, k \geq 1 \quad (2.2)$$

After computing a provisional inharmonicity coefficient value from every audio block between the onset and offset timestamps of the target note, the *postprocessing* stage of the methodology involves initially removing those coefficients that fall outside the value range of $[10^{-7}, 10^{-2}]$, considering them as outliers. Subsequently, the median of the remaining values is calculated, ultimately providing a robust representation of the inharmonicity coefficient over the note duration.

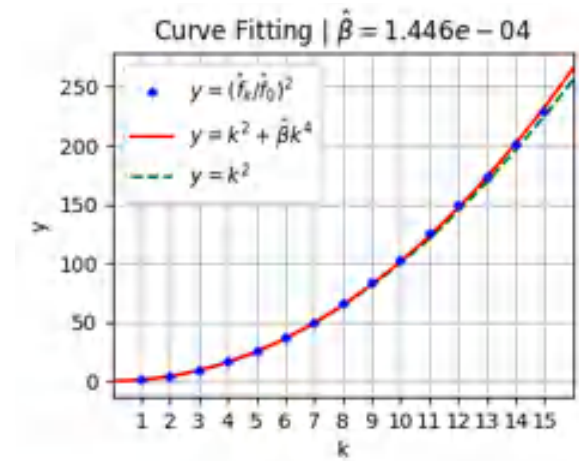


Figure 2.1 Visualization of the curve fitting process

2.2 Inharmonicity Estimation

The previous subsection covered the computation of the inharmonicity coefficient for a single note based on Equation 1.2. In contrast, the current subsection describes the estimation of the inharmonicity coefficient across the guitar fretboard, relying on Equation 1.3, in order to establish a basis for identifying notes as string-fret pairs. A more generalized form of this equation is presented in Equation 2.3.

$$\tilde{\beta}(s,n) = \hat{\beta}(s,0) \cdot 2^{\frac{an+b}{6}}$$

(2.3)

The introduced coefficients a and b allow the adaptation of the algorithm to different guitars. This is achieved through the computation of the inharmonicity coefficient on additional frets, by utilizing audio samples of multiple notes per string. Specifically, four adaptation schemes which are shown in Table 2.1 have been proposed [1]. In these schemes, the unknown values x , x_1 , and x_2 of the coefficients a and b are calculated by initially computing the inharmonicity coefficient on the corresponding frets and then solving Equation 2.3.

Table 2.1 Proposed Adaptation Schemes

Scheme	Frets	Coefficient a	Coefficient b
1Fret	{0}	1	0
2FretA	{0,12}	x	0
2FretB	{0,12}	1	x
3Fret	{0,3,12}	x_1	x_2

2.3 String-Fret Identification

After estimating the inharmonicity coefficient across a guitar fretboard using Equation 2.3, the system is ready to perform automatic string detection of incoming guitar notes. Assuming that a pitch detection algorithm provides the fundamental frequency of a note, a set C of candidate string-fret pairs that produce the same pitch is then defined and the inharmonicity coefficient of the note is computed as outlined in Subsection 2.1. An identification process then determines the candidate pair that minimizes the absolute distance between the computed and the corresponding estimated inharmonicity coefficient, as described in Equation 2.4.

$$(\hat{s}, \hat{n}) = \arg \min_{(s,n) \in C} \left(\left| \hat{\beta} - \tilde{\beta}(s, n) \right| \right) \quad (2.4)$$

3. Evaluation

3.1 Dataset

For the algorithm evaluation, three distinct subsets from the IDMT-SMT-Guitar dataset were utilized [4]. These subsets correspond to separate raw audio recordings acquired from the bridge, middle, and neck pickups of a standard-tuned Ibanez Power Strat electric guitar. Each subset comprises one isolated note recording for every string-fret pair of the guitar up to the 12th fret, resulting in a total of 78 samples per subset. The dataset includes ground-truth annotations that specify the string, fret, pitch, onset, and offset for each note sample, and is therefore appropriate for evaluating the presented methodology.

3.2 Results

Note samples that were utilized during the adaptation phase (Subsection 2.2) or have only one candidate string-fret pair were excluded from the evaluation process, as their correct identification is essentially predetermined. The computed and estimated inharmonicity curves for four pickup-scheme configurations are displayed in Figure 3.1. The identification accuracy for all configurations is presented in Table 3.1. Notably, the neck pickup exhibits an intriguing drop in accuracy, which may be attributed to the lack of higher overtones in the corresponding audio signals compared to the middle and bridge pickups. However, the algorithm appears to be fairly accurate overall, with schemes *3Fret* and *2FretA* performing slightly better than *1Fret* and *2FretB*.

Table 3.1 Identification Accuracy

Scheme	Bridge	Middle	Neck	Overall
<i>1Fret</i>	98.41%	92.06%	<u>92.06%</u>	94.17%
<i>2FretA</i>	98.28%	<u>100%</u>	91.38%	96.55%
<i>2FretB</i>	94.83%	98.28%	87.93%	93.68%
<i>3Fret</i>	<u>100%</u>	<u>100%</u>	90.57%	<u>96.85%</u>

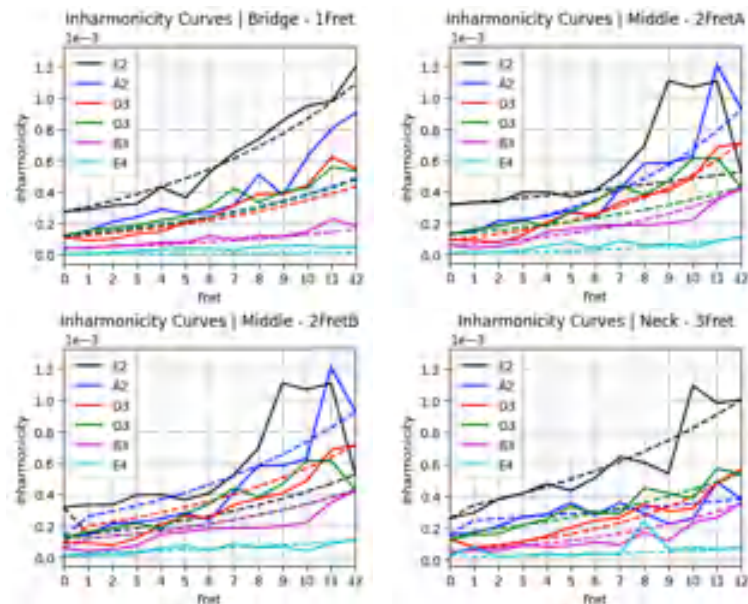


Figure 3.1 Computed (solid) and estimated (dashed) inharmonicity curves

4. Conclusions

This paper presents an algorithm for guitar string detection based on the computation of the inharmonicity coefficient and applicable to monophonic guitar audio recordings. The proposed methodology consolidates elements of the relevant literature, while pursuing simplicity and comprehensibility. The evaluation results on a well-known dataset of guitar recordings were deemed satisfactory and inspire future investigations for further improving and evaluating the effectiveness of the algorithm on additional datasets, such as the *Guitarset* [20], as well as for assessing its performance for real-time tablature transcriptions.

5. References

- [1] G. Bastas, S. Koutoupis, M. Kaliakatsos-Papakostas, V. Katsouros, and P. Maragos “A Few-Sample Strategy for Guitar Tablature Transcription Based on Inharmonicity Analysis and Playability Constraints” in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2022)
- [2] J. J. Michelson, T. M. Sullivan, and R. M. Stern “Automatic Guitar Tablature Transcription from Audio using Inharmonicity Regression and Bayesian Classification” in *145th Audio Engineering Society International Convention* (2018)
- [3] J. Abeßer, “Automatic String Detection for Bass Guitar and Electric Guitar” in *Lecture Notes in Computer Science* (2013)
- [4] C. Kehling, J. Abeßer, C. Dittmar, and G. Schuller “Automatic Tablature Transcription of Electric Guitar Recordings by Estimation of Score- and Instrument-Related Parameters” in *International Conference on Digital Audio Effects* (2014)

- [5] J. M. Hjerrild and M. Grasboll Christensen “Estimation of Guitar String, Fret and Plucking Position Using Parametric Pitch Estimation” in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2019)
- [6] I. Barbancho, L. J. Tardon, S. Sammartino, and A. M. Barbancho “Inharmonicity-Based Method for the Automatic Generation of Guitar Tablature” *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, **20** (2012)
- [7] J. M. Hjerrild, S. Willemsen, and M. G. Christensen “Physical Models for Fast Estimation of Guitar String, Fret and Plucking Position” in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics* (2019)
- [8] C. Dittmar, A. Mannchen, and J. Abeßer “Real-Time Guitar String Detection for Music Education Software” in *International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services* (2013)
- [9] T. Geib, M. Schmitt, and B. Schuller “Automatic Guitar String Detection by String-Inverse Frequency Estimation” in *Lecture Notes in Informatics* (2017)
- [10] A. M. Barbancho, L. J. Tardón, I. Barbancho, and A. Klapuri “Automatic Transcription of Guitar Chords and Fingering from Audio”, *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, **20** (2012)
- [11] D. R. Tuohy and W. D. Potter “A Genetic Algorithm for the Automatic Generation of Playable Guitar Tablature” in *International Computer Music Conference* (2005)
- [12] K. Yazawa, D. Sakaue, K. Nagira, K. Itoyama, and H. G. Okuno “Audio-Based Guitar Tablature Transcription using Multipitch Analysis and Playability Constraints” in *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2013)
- [13] A. Wiggins and Y. Kim “Guitar Tablature Estimation with a Convolutional Neural Network” in *20th International Society for Music Information Retrieval Conference* (2019)
- [14] M. Paleari, B. Huet, A. Schutz, and D. Slock “A Multimodal Approach to Music Transcription” in *International Conference on Image Processing* (2008)
- [15] A. Hrybyk and Y. Kim “Combined Audio and Video Analysis for Guitar Chord Identification” in *11th International Society for Music Information Retrieval Conference* (2010)
- [16] C. Kerdvibulvech and H. Saito “Vision-Based Guitarist Fingering Tracking using a Bayesian Classifier and Particle Filters” in *Lecture Notes in Computer Science* (2007)
- [17] A. M. Burns and M. M. Wanderley “Visual Methods for the Retrieval of Guitarist Fingering” in *International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (2006)
- [18] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton “Quality of Piano Tones” *The Journal of the Acoustical Society of America*, **34** (1962)
- [19] H. Järveläinen, T. Verma, and V. Välimäki “The Effect of Inharmonicity on Pitch in String Instrument Sounds” in *International Computer Music Conference* (2000)
- [20] Q. Xi, R. M. Bittner, J. Pauwels, X. Ye, and J. P. Bello, “Guitarset: A Dataset for Guitar Transcription” in *19th International Society for Music Information Retrieval Conference*, pp. 453–460 (2018)



Δονητική ανάλυση κυμβάλων και καπακιών τζουρά

Σπύρος Μπρέζας^{1,*}, Δέσποινα Γρηγορίου¹, Ευάγγελος Κασελούρης¹, Ελένη Παπαδάκη¹, Ιωάννης Ορφανός¹, Ευθύμιος Μπακαρέζος¹, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης¹, Βασίλειος Δημητρίου¹

¹Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο
*sbrezas@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό των δονητικών χαρακτηριστικών μουσικών οργάνων ή μερών τους. Η μέθοδος περιλαμβάνει μετρήσεις για τον προσδιορισμό της συχνοτικής απόκρισης, ολογραφική απεικόνιση των τρόπων ταλάντωσης, μοντελοποίηση FEM και προσομοιώσεις. Οι παράμετροι FEM επαληθεύονται μέσω ενός κριτηρίου συσχέτισης. Τα υπό εξέταση μουσικά όργανα και μέρη αρχικά προσομοιώνονται, στη συνέχεια εκτυπώνονται χρησιμοποιώντας πολυμερή υλικά και μετρούνται. Η δονητική απόκριση δύο τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυμβάλων και τριών καπακιών τζουρά, μετρούνται πειραματικά και προσομοιώνονται υπολογιστικά. Τα εκτυπωμένα αντικείμενα διαφέρουν ως προς το υλικό, τη γεωμετρία και το πάχος. Οι αλλαγές στη γεωμετρία χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω μελέτη της συχνοτικής απόκρισης και οι τρόποι ταλάντωσης επίσης παρουσιάζονται και μελετώνται. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση FEM και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις. Η συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων και μοντελοποίησης πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κριτηρίου συσχέτισης. Το τελευταίο χρησιμοποιείται επίσης και για την ποσοτικοποίηση των μεταβολών της γεωμετρίας και του πάχους.

Vibration analysis of cymbals and Tzouras top plates

ABSTRACT

In this paper, an integrated method for the determination of the vibration characteristics of musical instruments or their parts is presented. The method includes modal measurements, holographic visualization of vibration modes, FEM modelling and simulations. The FEM parameters are verified by a correlation criterion. The musical instruments and parts under consideration are first simulated,

then printed using polymer materials and measured. The vibration response of two 3D printed cymbals and three Tzouras top plates are experimentally measured and computationally simulated. The printed objects differ in material, geometry and thickness. The changes in geometry are used to further study the frequency response and the vibration modes are also presented and studied. From the experimental results, vibration parameters are derived and used for FEM modelling and related simulations. The correlation between measurements and modelling is performed using the the complex frequency domain assurance criterion. The latter is also used to quantify changes in geometry and thickness.

Εισαγωγή

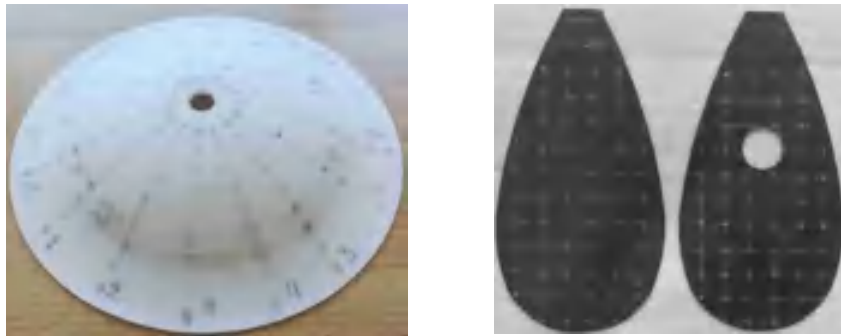
Η μουσική ακουστική αποτελεί έναν από τους τομείς της ακουστικής, ο οποίος προσελκύει συνεχώς το επιστημονικό ενδιαφέρον. Πλήθος μελετών αφορούν στα κρουστά, τα οποία συμπεριλαμβάνουν πολλά όργανα από όλο τον κόσμο. Οι κανονικοί τρόποι δόνησης κυμβάλων είναι το επίκεντρο ερευνών, στις οποίες χρησιμοποιείται μοντελοποίηση FEM για την πρόβλεψη των συντονισμών σε συνδυασμό με μετρήσεις ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI).

Η κατασκευή μουσικών οργάνων από σύνθετα ή εναλλακτικά υλικά έχει μεγάλη εφαρμογή και πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους [1]. Τα δονητικά χαρακτηριστικά των οργάνων ή μερών τους έχουν μεγάλη σημασία για τη μοντελοποίησή τους και προφανώς, για την ακουστική τους ποιότητα. Η επίδραση της απόσβεσης είναι μια σημαντική παράμετρος για τη δόνηση αντικειμένων και έχει μελετηθεί ευρέως. Για τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ της συχνοτικής απόκρισης μιας αρχικής και μιας τροποποιημένης κατάστασης, προτάθηκε η τροποποίηση μιας ήδη χρησιμοποιούμενης μεθόδου, η οποία εφαρμόστηκε στη μοντελοποίηση καπακιών κιθάρας [2]. Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δονητική συμπεριφορά τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυμβάλων και καπακιών τζουρά.

1. Μετρήσεις και μοντελοποίηση

Η παρούσα μεθοδολογία αποτελείται από τέσσερα μέρη. Στο πρώτο μέρος περιγράφονται μετρήσεις δονητικής απόκρισης και στο δεύτερο, δονητικές μετρήσεις με χρήση ολογραφικής μεθόδου με laser. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση με FEM, χρησιμοποιώντας εν μέρει ως αρχικές παραμέτρους, δεδομένα από τις μετρήσεις. Στο τελευταίο μέρος πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ αρχικών και τροποποιημένων καταστάσεων.

Για τις μετρήσεις εκτυπώθηκε ένα κύμβαλο από PLA διαμέτρου 8 ιντσών βάσει μετρήσεων των φυσικών διαστάσεων ενός πραγματικού κυμβάλου. Το μέσο πάχος του κυμβάλου είναι ~1,2 mm, όπως μετρήθηκε με ψηφιακό παχύμετρο. Για την αξιολόγηση της διαδικασίας, εκτυπώθηκε το ίδιο μοντέλο αυξάνοντας το πάχος του κατά 2,5 φορές. Επιπλέον, εκτυπώθηκαν τρία καπάκια τζουρά από PETG, χρησιμοποιώντας επίσης μετρήσεις των διαστάσεων ενός πραγματικού καπακιού. Τα τρία καπάκια έχουν όμοιες διαστάσεις, πλην του πάχους (δύο πάχους 2,4 mm και ένα πάχους 3 mm). Το ένα καπάκι των 2,4 χιλιοστών διαθέτει οπή, ενώ τα άλλα δύο όχι. Κατά την εκτύπωση των καπακιών οι ρυθμίσεις του εκτυπωτή ήταν ίδιες. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα κύμβαλο και δύο καπάκια τζουρά, χωρίς και με οπή.



Σχήμα 1.1 Εκτυπωμένο κύμβαλο (αριστερά) και καπάκια τζουρά (δεξιά).

1.1 Μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης

Η κρουστική απόκριση του υπό εξέταση αντικειμένου υπολογίζεται με τη χρήση ενός κρουστικού σφυριού ανάδρασης μικρής μάζας (PCB, μοντέλο 086E80). Η προκαλούμενη ταλάντωση ανιχνεύεται από ένα μικρής μάζας επιταχυνσιόμετρο (PCB, μοντέλο TLD352A56). Τα δύο σήματα καταγράφονται και επεξεργάζονται περαιτέρω από έναν αναλυτή σήματος (OROS, μοντέλο OR34). Η συνάρτηση της συχνοτικής απόκρισης δίνεται με βάση την ποσότητα H_2 , χρησιμοποιώντας τον λόγο:

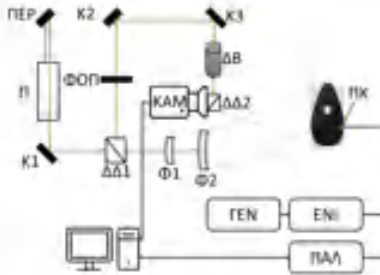
$$H_2(\omega) = \frac{G_{aa}(\omega)}{G_{Fa}(\omega)} \quad (1)$$

όπου $G_{aa}(\omega)$ είναι το αυτοφάσμα της επιτάχυνσης και $G_{Fa}(\omega)$ το ετεροφάσμα μεταξύ των σημάτων δύναμης και επιτάχυνσης. Η συχνοτική ανάλυση είναι 0,5 Hz με ανώτατο όριο συχνότητας τα 3200 Hz.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πλέγμα σημείων. Για το κύμβαλο το πλέγμα αποτελείται από 144 σημεία (16 ακτίνες, με 9 σημεία κατά μήκος κάθε ακτίνας ανά 1 cm), ενώ για τον τζουρά τα σημεία του πλέγματος απέχουν μεταξύ τους 2 cm. Ο αριθμός των σημείων για τις πλάκες χωρίς οπή είναι 64, ενώ για την πλάκα με οπή τα σημεία είναι 62.

1.2 Απεικόνιση κανονικών τρόπων δόνησης

Η απεικόνιση των κανονικών τρόπων δόνησης πραγματοποιείται με τη χρήση της τεχνικής ESPI, μιας ολογραφικής μεθόδου με χρήση λέιζερ [3]. Η διάταξη ESPI παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2. Κατά την υλοποίηση της ESPI το υπό εξέταση αντικείμενο φωτίζεται από μια δέσμη, η οποία αποτελεί τον ένα βραχίονα μιας αρχικής δέσμης. Ο δεύτερος βραχίονας ακολουθεί σταθερή πορεία, μέχρι τη συμβολή του με την ανακλώμενη δέσμη από το υπό εξέταση αντικείμενο. Περισσότερες πληροφορίες, ο αναγνώστης μπορεί να αντλήσει από την πηγή [3].



Σχήμα 1.2 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης ESPI.

1.3 Μοντελοποίηση FEM και προσομοιώσεις

Για την προσέγγιση της γεωμετρίας του κυμβάλου σχεδιάστηκε το αξονοσυμμετρικό προφίλ στο επίπεδο XZ και περιστράφηκε γύρω από τον άξονα Z [4]. Το κύμβαλο έχει ακτίνα 101,6 mm και ύψος 28 mm, με ακτίνα του επιπέδου στήριξης (συμπεριλαμβανομένης της οπής) 16 mm. Στους κόμβους που περιβάλλουν την κεντρική οπή εφαρμόστηκε περιορισμός πάκτωσης για την προσομοίωση της στήριξης που εφαρμόστηκε κατά τις μετρήσεις. Το πάχος του κυμβάλου μετρήθηκε και βρέθηκε ότι κυμαίνεται από 1,0 mm έως 1,2 mm. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο με πάχος 1,0 mm παρουσιάζει μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά ευρήματα και χρησιμοποιήθηκε στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Κατά αντιστοιχία, δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο CAD του καπακιού ενός πραγματικού τζουρά. Το συνολικό μήκος του καπακιού είναι 260 mm, ενώ το πάχος είναι 2,4 mm. Αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, ένα χωρίς και ένα με οπή, για να μελετηθεί η επίδραση της οπής στη δονητική συμπεριφορά. Οι αναλύσεις FEM των τρόπων ταλάντωσης και της συχνοτικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Πρέπει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις (κύμβαλο και τζούρας), ο συντελεστής απόσβεσης εξήχθη από τις μετρήσεις συχνοτικής απόκρισης που περιγράφονται στην ενότητα 1.1, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση modalfit του Matlab. Για κάθε υλικό χρησιμοποιείται ένας μόνο λόγος απόσβεσης, δηλαδή η μέση τιμή της ανάλυσης modalfit.

1.4 Κριτήριο συσχέτισης

Ο Perez [2] εισήγαγε το μιγαδικό κριτήριο διασφάλισης στο πεδίο της συχνότητας (Complex Frequency Domain Assurance Criterion - CFDAC) για τη σύγκριση συχνοτικών αποκρίσεων μεταξύ δύο διαφορετικών καταστάσεων, μίας αρχικής (συμβολίζεται με $\mathbf{p}$) και μίας τροποποιημένης (συμβολίζεται με $\mathbf{a}$). Το CFDAC περιγράφεται ως εξής:

$$CFDAC_{fg} = \frac{\left[\sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(p)}(\omega_f) h_{pq}^{(a)}(\omega_g) \right]^2}{\left[\sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(p)}(\omega_f) h_{pq}^{*(p)}(\omega_f) \right] \left[\sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^{(a)}(\omega_g) h_{pq}^{*(a)}(\omega_g) \right]} \in \mathbb{C} \quad (2)$$

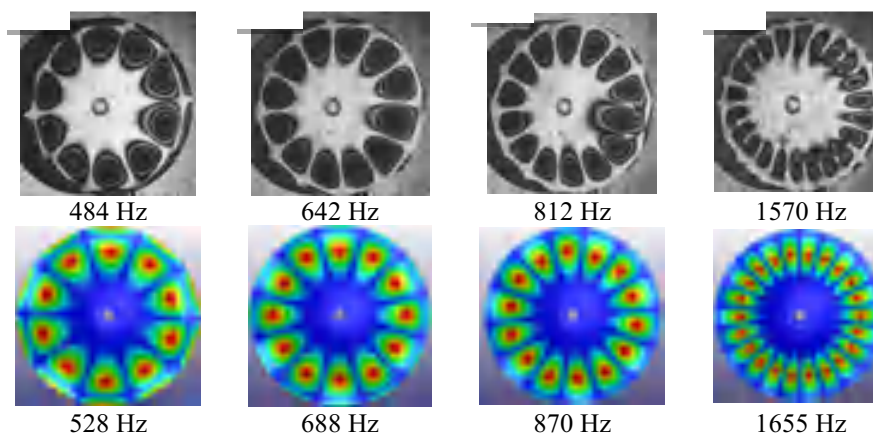
όπου $h_{pq}^{(p)}(\omega_f)$ είναι η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης της αρχικής κατάστασης μετά από διέγερση στο σημείο p και ανίχνευση της απόκρισης στο σημείο q για συχνότητα f , $h_{pq}^{(a)}(\omega_g)$ είναι η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης της τροποποιημένης κατάστασης μετά από διέγερση στο σημείο p και ανίχνευση της απόκρισης στο σημείο q για συχνότητα g . Ο αστερίσκος στον παρονομαστή σημαίνει συζυγής μιγαδικός.

Κατά τη σύγκριση δύο ταυτόσημων καταστάσεων (π.χ. αρχική-αρχική), το γράφημα CFDAC παρουσιάζει διαγώνια συμμετρία, η οποία αποκλίνει κατά τη σύγκριση μη ταυτόσημων καταστάσεων (αρχική-τροποποιημένη).

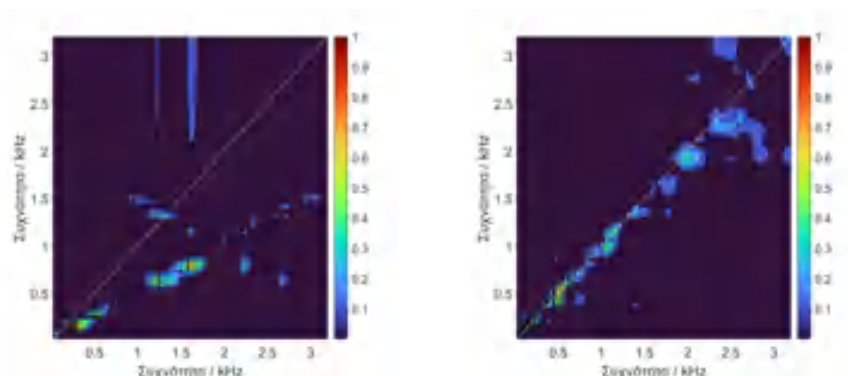
2. Αποτελέσματα

Αρχικά, οι μετρήσεις με το κρουστικό σφυρί και το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης. Ο λόγος χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στα μοντέλα FEM, από τα οποία προκύπτουν συναρτήσεις συχνοτικής απόκρισης και οι αντίστοιχοι τρόποι δόνησης. Για κάθε μοντέλο FEM, το πλέγμα σημείων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συχνοτικών αποκρίσεων είναι όμοιο με το πλέγμα σημείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Η αξιολόγηση του μοντέλου FEM πραγματοποιείται με δύο τρόπους. Πρώτον, οι τρόποι δόνησης κατά FEM συγκρίνονται με τους τρόπους δόνησης που καταγράφονται από τις μετρήσεις ESPI. Δεύτερον, οι συχνοτικές αποκρίσεις που υπολογίζονται από τα μοντέλα FEM χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κριτηρίου CFDAC. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα των μετρήσεων θεωρείται ότι αντιστοιχούν στην αρχική κατάσταση, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEM στην τροποποιημένη κατάσταση.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τέσσερις αντιπροσωπευτικοί τρόποι ταλάντωσης μετά από μετρήσεις με την τεχνική ESPI και μετά από μοντελοποίηση FEM (πάχος 1,0 mm) για το μικρού πάχους κύμβαλο PLA. Το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των μοντελοποιημένων συντονισμών του σχήματος 3 είναι 9,8 %. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το πλάτος του μιγαδικού CFDAC μετά τη σύγκριση των συχνοτικών αποκρίσεων των μετρήσεων με αυτές της μοντελοποίησης FEM. Τα σχήματα 2.1 και 2.2 αποκαλύπτουν ότι, αν και το μοντέλο FEM προβλέπει τους τρόπους ταλάντωσης που απεικονίζονται από την ESPI, τα αποτελέσματα του μοντέλου FEM μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, ώστε η κατανομή των τιμών του CFDAC να πλησιάζει εγγύτερα την κύρια διαγώνιο. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις αποδίδονται κυρίως στη χρησιμοποιηθείσα γεωμετρία CAD του μοντέλου FEM που μπορεί να τροποποιηθεί, χρησιμοποιώντας γραμμές για την προσομοίωση της μη ομαλής καμπυλότητας αντί τόξων.



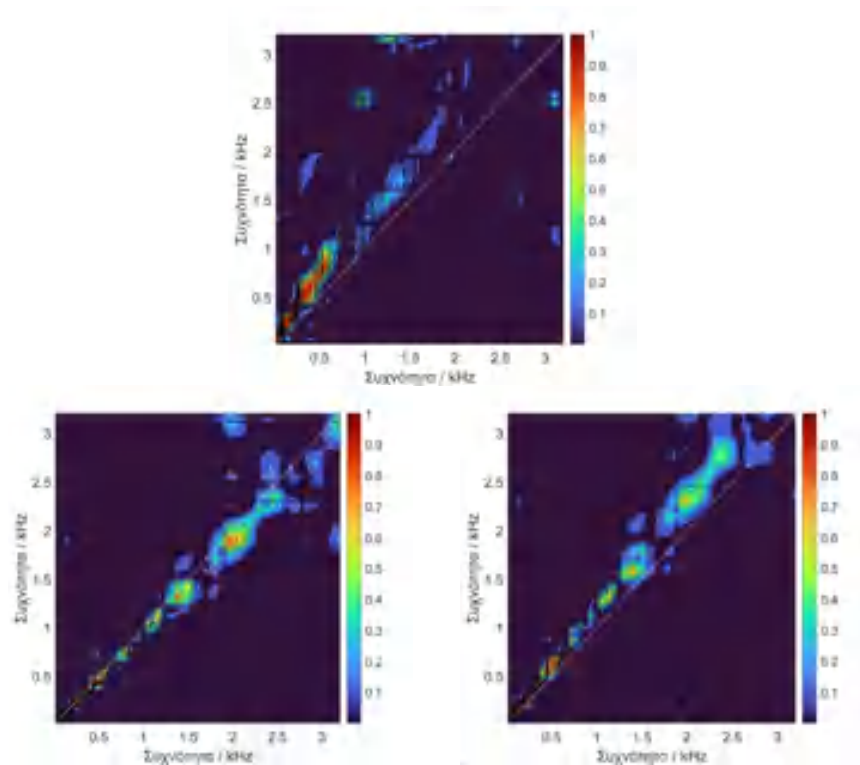
Σχήμα 2.1 Τρόποι δόνησης του μικρού πάχους κυμβάλου κατά την εφαρμογή της τεχνικής ESPI (πάνω) και κατά μοντελοποίηση FEM (κάτω).



Σχήμα 2.2 Αριστερά: πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ του μικρού πάχους κυμβάλου από PLA (συχνοτικές αποκρίσεις κατόπιν μετρήσεων) και του ίδιου κυμβάλου μετά από FEM προσομοίωση. Δεξιά: πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ του άνευ καπακιού τζουρά από PETG (συχνοτικές αποκρίσεις κατόπιν μετρήσεων) και του ίδιου καπακιού μετά από FEM προσομοίωση.

Παρόμοια ανάλυση πραγματοποιείται για το καπάκι του τζουρά χωρίς οπή. Στο δεξί μέρος του σχήματος 2.2 παρουσιάζεται η κατανομή του κριτηρίου CFDAC. Κατά τη σύγκριση, προκύπτει ότι το μέγιστο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων συντονισμών είναι 3,7%. Κατά τη σύγκριση των εικόνων του σχήματος 2.2 όσον αφορά την απόκλιση από την κύρια διαγώνιο, προκύπτει ότι το μοντέλο FEM του καπακιού του τζουρά δίδει αποτελέσματα με μικρή απόκλιση στα μετρούμενα.

Το κριτήριο CFDAC χρησιμοποιείται επίσης για τη σύγκριση των δύο τρισδιάστατα εκτυπωμένων κυμβάλων (μικρού και μεγάλου πάχους) και των πλακών τζουρά. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των πλακών με και χωρίς ηχητική οπή (ίδιου πάχους) και μεταξύ των πλακών με διαφορετικό πάχος (2,4mm και 3mm). Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα γραφήματα CFDAC.



Σχήμα 2.3 Πλάτος του κριτηρίου CFDAC μεταξύ PLA κυμβάλων διαφορετικού πάχους (πάνω), and PETG καπακιών τζουρά με και χωρίς οπή (κάτω αριστερά) και μεταξύ καπακιών διαφορετικού πάχους (κάτω δεξιά).

Η διάνοιξη της ηχητικής οπής έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση από την κύρια διαγώνιο σε συχνότητες άνω του 1 kHz. Η απόκλιση είναι προς τη δεξιά πλευρά, λόγω της μείωσης της συχνότητας των συντονισμών του καπακιού με την οπή. Αντιθέτως, η μείωση της ελαστικότητας του καπακιού με την αύξηση του πάχους, μετατοπίζει τους συντονισμούς σε υψηλότερες συχνότητες και κατά συνέπεια, τις τιμές του κριτηρίου CFDAC άνω από την κύρια διαγώνιο. Η αύξηση του πάχους του κυμβάλου έχει παρόμοια αποτελέσματα στο αντίστοιχο γράφημα CFDAC. Το μεγάλο πάχος κύμβαλο παρουσιάζει διακριτές κορυφές συντονισμού πάνω από τα 1,5 kHz, οι οποίες σχετίζονται με τις περιοχές στο γράφημα CFDAC περίπου στα (1 kHz, 2,5 kHz) και (1,5 kHz, 3,1 kHz), όπου η πρώτη τιμή της παρένθεσης είναι η συχνότητα στον άξονα x και η δεύτερη τιμή στον άξονα y.

3. Συμπεράσματα

Η εργασία περιγράφει μια ολοκληρωμένη μέθοδο για τη μέτρηση και την ανάλυση των δονητικών χαρακτηριστικών τρισδιάστατα εκτυπωμένων μουσικών

οργάνων ή/και τμημάτων τους. Μελετώνται δύο κύμβαλα κατασκευασμένα από PLA και τρία καπάκια τζουρά κατασκευασμένα από PETG. Η συνάρτηση συχνοτικής απόκρισης μετράται με την τεχνική του μετακινούμενου κρουστικού σφυριού (roving hammer) και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου απόσβεσης των υλικών. Αυτός με τη σειρά του χρησιμοποιείται ως αρχική παράμετρος σε μοντελοποίηση και προσομοίωση FEM, η οποία παρέχει τις αντίστοιχες συχνοτικές αποκρίσεις και τους τρόπους δόνησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα μετρούμενα. Εφαρμόζονται δύο μέθοδοι σύγκρισης. Πρώτον, οι τρόποι δόνησης μετά από μετρήσεις ESPI χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των συχνοτήτων συντονισμού. Δεύτερον, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ των μετρούμενων συχνοτικών αποκρίσεων και των αποκρίσεων μετά τη μοντελοποίηση με FEM χρησιμοποιώντας το κριτήριο CFDAC. Τα αποτελέσματα της FEM δείχνουν ότι και στην περίπτωση του κυμβάλου και των πλακών του τζουρά, οι τρόποι δόνησης αντιστοιχούν στους μετρούμενους. Οι τιμές του κριτηρίου CFDAC δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κυμβάλου μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του τζουρά είναι πιο κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα του εκτυπωμένου καπακιού. Το κριτήριο CFDAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον εντοπισμό διαφορών μεταξύ καταστάσεων κατά την κατασκευή μουσικών οργάνων, όπως αλλαγές στο πάχος και στα ανοίγματα οπών.

4. Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, στο πλαίσιο του έργου «Καταγραφή και μετρολογική ανάλυση των δονητικο-ακουστικών χαρακτηριστικών μουσικών οργάνων για τη διερεύνηση εναλλακτικών και χαμηλού κόστους υλικών και γεωμετριών με συναφή ηχητικά χαρακτηριστικά». Ευχαριστούμε για την υποστήριξη με υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Ελληνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (GRNET) στην Εθνική εγκατάσταση HPC ARIS-στο πλαίσιο του έργου pr016025-LaMPIOS III.

5. Αναφορές

- [1] S. Brezas et al. «Review of manufacturing processes and vibro-acoustic assessments of composite and alternative materials for musical instruments» *Applied Sciences*, **14**, 2293 (2024)
- [2] R. Viala et al. «Towards model-based approaches for musical instruments making: validation of the model of a Spanish guitar soundboard and characterization features proposal» *Applied Acoustics*, **172**, 107591 (2021)
- [3] E. Bakarezos et al. *Laser-Based Interferometric Techniques for the Study of Musical Instruments*, Springer Cham (2019)
- [4] S. Brezas et al. «Vibrational analysis of a splash cymbal by experimental measurements and parametric CAD-FEM simulations» *Vibration*, **7**, 146-160, (2024)



Μελέτες για την ηχητική κάλυψη των μεγάλων παρελάσεων του καρναβαλιού για την Πάτρα και την Ξάνθη

Κωνσταντίνος Μπαξεβάνης, Μηχ. Ήχου.(B.Sc), Ακουσ.
Σχεδιασμός & Ψηφιακός Ήχος Ε.Α.Π., (M.Sc)
kosbax@gmail.com
Γαβριήλ Καμάρης, Ηλ. Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ
Πανεπιστημίου Πατρών, gpkamaris@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι ηλεκτροακουστικές μελέτες εφαρμογής και εγκατάστασης, στις δύο μεγαλύτερες καρναβαλικές παρελάσεις της Ελλάδας. Ο καρναβαλικός χαρακτήρας των παρελάσεων τις καθιστά περισσότερο απαιτητικές στην ύπαρξη ηχητικού συστήματος ισχύος. Λόγω της ετήσιας επανάληψης, των εκδηλώσεων στην Πάτρα και στην Ξάνθη υπάρχει η ανάγκη να δημιουργηθούν μελέτες, ώστε να καταγραφούν οι απαιτούμενες υλικοτεχνικές επιδομές και να καλυφθεί ηχητικά όλη η έκταση της παρελάσεις. Το μεγάλο μήκος των παρελάσεων, αλλά και το πλήθος του κόσμου δημιουργεί ανάγκες για μετάδοση ηχητικού σήματος σε μεγάλες αποστάσεις. Για τις παρελάσεις στις δύο πόλεις, αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία και περιγράφονται, το σύνολο της διαδρομής της παρέλασης, τα σημεία συγκέντρωσης, τερματισμού και ανοίγματα-πλατείες πάνω στην διαδρομή της παρέλασης. Έπειτα παρουσιάζονται οι τεχνικές προδιαγραφές του εξοπλισμού, προηγούμενων ετών και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται πλέον για την κάλυψη των εκδηλώσεων όπως και ο τρόπος μετάδοσης του σήματος. Στα τελευταία κεφάλαια παρουσιάζονται μετρήσεις Στάθμης Ακουστικής Πίεσης (ΣΗΠ) κατά την διάρκεια των δοκιμών αλλά και κατά την διάρκεια της παρέλασης. Τέλος, συνοψίζονται προτάσεις για την αναβάθμιση του τρόπου μετάδοσης του ηχητικού σήματος, προτείνεται αναβάθμιση της εγκατάστασης αλλά και περιγράφεται ο προτεινόμενος τρόπος ασφάλισης και προστασίας του κοινού.

Study on the Audio Reinforcement of the parades for the Patras and Xanthi carnival

ABSTRACT

This paper presents the electro-acoustic studies installed in the two largest parades in Greece. The carnival character of the parades makes them more

demanding in the existence of a sound power system. Due to the large repetition of the events in Patras and Xanthi there is a need to create them, so as to cover the whole area of the parades with sound and to record the required logistical raids. The long length of the parades, as well as the number of people, creates for the transmission of a sound signal over long distances. In the first part of it, some historical facts are mentioned, about the parades and the way they were done in previous years. The entire route of the parade, the points of gathering, termination, and openings-squares on the route of the parade are described. Then the requirements of the equipment, of previous years and the equipment now used to cover the events will be presented as well as the way of transmitting the signal. In the last chapters, Sound Pressure Level (SPL) measurements are presented during the tests and also during the parade. Finally, proposals are summarized for the upgrade of the audio signal transmission method, an upgrade of the installation is proposed, but also the proposed method of safety and protection of the public and this installation is described.

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μελέτες για την ηχητική εγκατάσταση των παρελάσεων στα πλαίσια των καρναβαλικών εκδηλώσεων στις πόλεις της Πάτρας και της Ξάνθης. Οι καρναβαλικές εκδηλώσεις σε αυτές τις πόλεις είναι οι τα μεγαλύτερες και μακροβιότερες της Ελλάδας. Η συνοδεία της μουσικής είναι βασικό στοιχείο για την διεξαγωγή αυτών των εκδηλώσεων και η αναζήτηση της ποιότητας της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του κοινού είναι τα βασικά ζητούμενα των διοργανωτών (εκάστοτε Δήμος).

1. Το καρναβάλι της Πάτρας

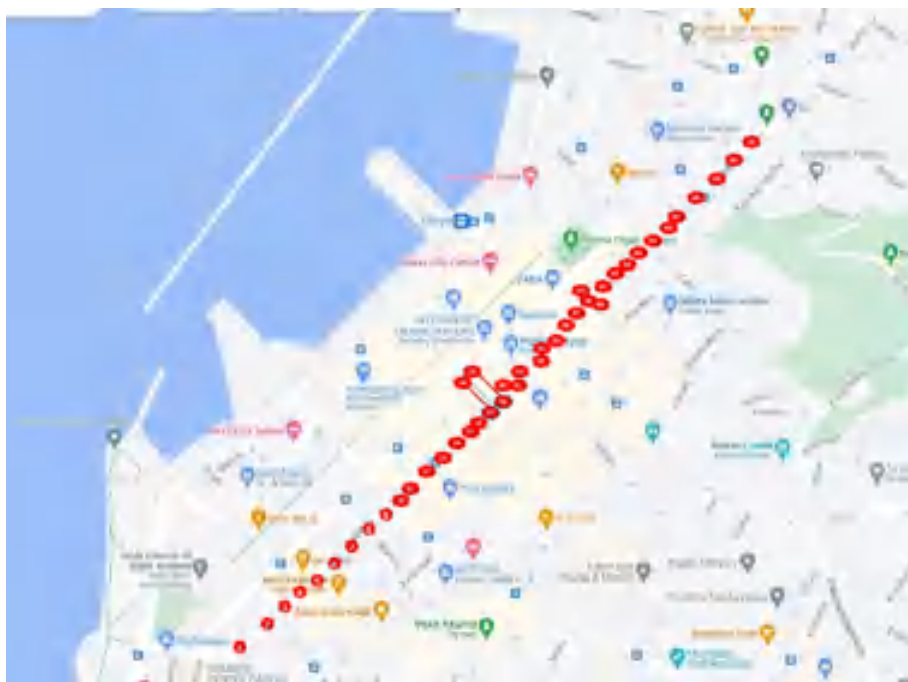
Το καρναβάλι της Πάτρας έχει μια ιστορία σχεδόν 2 αιώνων (αναφορά για θεσμοθέτηση του “Πατρινού Καρναβαλιού” ως το έτος 1829). Οι ρίζες των εκδηλώσεων βρίσκονται σε αρχαία ελληνικά έθιμα που σχετίζονται με τον θεό Διόνυσο, ο οποίος αναγεννάτε για να φέρει την άνοιξη [1]. Σήμερα το καρναβάλι αποτελείται από μια σειρά εκδηλώσεων που περιλαμβάνει, τις τελετές έναρξης και λήξης αλλά και ομαδικά παιχνίδια, για μεγάλους και μικρούς, με κορύφωση τις παρελάσεις των καρναβαλιστών και των αρμάτων. Το “Καρναβάλι των μικρών”, η “Νυχτερινή ποδαράτη” και η “Μεγάλη παρέλαση” συντελούν στην κορύφωση του καρναβαλιού πριν την λήξη και το “κάψιμο του βασιλιά καρναβάλου”. Οι τρεις αυτές παρελάσεις αποτελούν το αντικείμενο της μελέτης και στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε κυρίως στην “Μεγάλη παρέλαση” που αποτελεί την κεντρική και πιο απαιτητική εκδήλωση από την συνολική μελέτη.

1.1 Οι προδιαγραφές του εξοπλισμού στην παλιά και στην νέα μελέτη.

Η μεγάλη παρέλαση καλύπτει μια διαδρομή συνολικού μήκους 1.7km (Εικόνα 1.1) επί της οδού Κορίνθου και διασχίζει το κέντρο της πόλης περνώντας από την κεντρική πλατεία, γνωστή ως Πλατεία Γεωργίου. Τα τελευταία 30 χρόνια η

παρέλαση καλύπτεται από 50 “ηχητικούς πύργους” τοποθετημένους σε θέσεις οι οποίες καθιερώθηκαν από τους παράγοντες, όπως αυτοί αναφέρθηκαν από τους εμπλεκόμενους υπαλλήλους και καταγράφονται παρακάτω:

1. Παροχή ρεύματος για την ηλεκτροδότηση των “πύργων”.
2. Συγκατάθεση περίοικων (καταστήματα και επαγγελματίες).
3. Εμπειρική ανάγκη κάλυψης.



Εικόνα 1.1 Η διαδρομή της μεγάλης παρέλασης και οι θέσεις των ηχητικών πύργων [2]

Την περασμένη χρονιά (2023-2024) εκφράστηκε από την αρμόδια υπηρεσία (ΚΕΔΗΠ Καρναβάλι Πάτρας [3]) η ανάγκη για τον εκσυγχρονισμό και την επικαιροποίηση της μελέτης. Στόχος είναι (α) η διασφάλιση της ποιότητας της ηχητικής κάλυψης της παρέλασης του καρναβαλιού, (β) η μεθοδολογία ελέγχου της καταλληλότητας και της ποιότητας του παρεχόμενου εξοπλισμού από τον εκάστοτε ανάδοχο όπως και (γ) η διασφάλιση της ασφάλειας του κοινού (ηλεκτροπληξία, πτώση εξοπλισμού).

Η προηγούμενη τεχνική μελέτη, προμήθειας του ηχητικού εξοπλισμού για την κάλυψη των παρελάσεων του πατρινού καρναβαλιού είχε συνταχθεί από υπαλλήλους του Δήμου οι οποίοι ήταν εμπειροτέχνες και χρησιμοποίησαν την αργκό της αγοράς για να εκφράσουν τεχνικούς όρους. Με την πάροδο του χρόνου οι προδιαγραφές αυτές κρίθηκαν μη επαρκείς και ελλιπείς. Επίσης η διατύπωση των όρων εμπεριέχει αοριστίες και ενδεχόμενο παραπλάνησης και μη επαρκούς κάλυψης των αναγκών από τον ανάδοχο προμηθευτή του εξοπλισμού. Η εμπειρία ετών έχει δείξει ότι, οι προμηθευτές αδυνατούν να διαφυλάξουν την ασφάλεια του

κοινού και του εξοπλισμού σε μια τέτοιου μεγέθους εκδήλωση, με αποτέλεσμα να προτιμούν να φέρνουν εξοπλισμό ευτελούς ποιότητας, προκειμένου να αποφύγουν μεγάλες οικονομικές ζημιές από αστοχία εξοπλισμού ή ακόμα και δολιοφθορές.

Παρακάτω φαίνεται η διατύπωση των τεχνικών προδιαγραφών, στην παλιά μελέτη:

Θα χρησιμοποιηθούν τριάντα εννέα (39) ηχητικοί πύργοι. Κάθε ηχητικός πύργος θα αποτελείται από :

- α) Ενισχυτές συνολικής ισχύος 3KW P.A..*
- β) Ανάλογα ηχεία (2 WAY – 3 WAY) εργοστασιακής κατασκευής. (SUB WOOFER και δορυφόροι).*
- γ) Ένα (1) EQUALIZER.*
- δ) Ένα (1) compressor.*
- ε) Ένα (1) ηλεκτρονικό crossover.*
- στ) Ένα (1) DELAY REVERBE (εάν κρίνεται απαραίτητο).*

Τα ηχεία των πύργων πρέπει να βρίσκονται σε ύψος –2 μέτρα– (πάνω σε ικριώματα) και με μία μικρή κλίση προς τον κεντρικό άξονα του δρόμου.

Για τις παραπάνω διαδρομές θα χρησιμοποιηθούν:

- α) Ηχητικές κόρνες των 50 – 75 WATT η κάθε μία (σύνολο 50 κόρνες).*
- β) Ανάλογοι ενισχυτές και EQUALIZERS.*
- γ) Ανάλογοι μετασχηματιστές των 100 VOLTS.*
- δ) Ένα (1) CD PLAYER επαγγελματικό (5 – 10 CD).*
- ε) Ένα (1) μικρόφωνο.*
- στ) Ένα (1) MIXER με εισόδους LINE – AUX κ.λ.π.*
- ζ) Ένα (1) compressor.*
- η) Ένα (1) laptop.*

Στην νέα μελέτη δόθηκε βάρος στην ορθή διατύπωση των τεχνικών προδιαγραφών με σκοπό την, όσο το δυνατόν, μικρότερη απόκλιση από αυτές. Ζητούμενο είναι η διασφάλιση της ποιότητας του παρεχόμενου εξοπλισμού και οι όσο το δυνατόν μικρότερες αποκλίσεις από τις απαιτήσεις αυτές. Επίσης σκοπός της νέας μελέτης είναι να αυξηθεί η δυνατότητα παραγωγής ακουστικής πίεσης στον δρόμο, για να υπάρχει επαρκής κάλυψη αλλά και για να διασφαλιστεί ότι τα μηχανήματα θα λειτουργούν στην γραμμική τους περιοχή και ότι δεν θα παράγουν υψηλές, μη γραμμικές, παραμορφώσεις. Για τον λόγο αυτό, όπως φαίνεται παρακάτω, αναφέρονται τεχνικές προδιαγραφές, οι οποίες δίνονται ορθά, καλώς ορισμένες και μονοσήμαντες, στα τεχνικά δελτία των κατασκευαστών των συσκευών. Επίσης, αναπόσπαστο ζητούμενο της μελέτης είναι και η ομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας του δρόμου κατά την διέλευση των καρναβαλιστών. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι, μια ριζική αλλαγή θα δημιουργούσε πολυάριθμες διαταραχές, διατηρήθηκαν οι παλαιές θέσεις των ηχητικών πύργων, οι οποίες αναπόφευκτα δημιουργούν “κενά” σε ορισμένα σημεία. Η νέα μελέτη χωρίζει τους πύργους σε δύο τύπους. Ο τύπος 1 αφορά τους ηχητικούς πύργους, ενώ ο τύπος 2 αφορά τις συστοιχίες ηχείων (Line Array) που χρησιμοποιήθηκαν στην είσοδο και έξοδο της πλατείας. Ακολουθεί η διατύπωση για τα ηχεία **Τύπου #01**.

Τύπος #01

Α. παθητικά ηχεία μεσαίων υψηλών συχνοτήτων (Mid - high) με τις προδιαγραφές που φαίνονται παρακάτω:

1. Ποσότητα ανά ηχητικό πύργο: τέσσερα (4) (σε περίπτωση ηχείων με διπλό μεγάφωνο χαμηλών συχνοτήτων μπορούν να τοποθετηθούν τρία (3) ηχεία σε κάθε πύργο αν επιτυγχάνεται η αντίστοιχη διασπορά).
 2. Ευαισθησία (sensitivity) τουλάχιστον 99dB/ 1m /1w (κάθε ηχείο).
 3. Διασπορά στον οριζόντιο άξονα τουλάχιστον 60 μοίρες (κάθε ηχείο).
 4. Μέγιστη ακουστική πίεση μουσικής ή προγράμματος (Max SPL Program/music) τουλάχιστον 130dB/1m (κάθε ηχείο).
 5. Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς για σήμα προγράμματος ή μουσικής (MAX program/ music power) τουλάχιστον 1.000 Watt (κάθε ηχείο).
 6. Διάμετρος μεγαφώνου χαμηλών συχνοτήτων τουλάχιστον 15".
- Επιπλέον τα ηχεία θα συνοδεύονται από ενισχυτή, του ιδίου οίκου ή ομίλου εταιριών, τουλάχιστον διπλάσιας ισχύος ανά κανάλι όπως αυτή αναφέρεται στο (5) των τεχνικών προδιαγραφών, για το φορτίο που θα συνδεθεί (4/8 Ω κοκ) σε αυτόν. Τυχόν μονάδα επεξεργασίας / διαχωρισμού ηχητικού σήματος θα πρέπει να είναι του ιδίου οίκου, σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να παρέχονται εργοστασιακές ρυθμίσεις για το σύστημα ηχείων το οποίο οδηγεί.

Δεν γίνονται δεκτά:

1. Αυτοενισχυόμενα ηχεία (εκτός και αν πληρούν τουλάχιστον τις προϋποθέσεις, 1,3,4,6 όπως αυτές περιγράφονται στην παράγραφο Α του Παραρτήματος Ι)
2. Τροποποιημένα ηχεία
3. Ιδιοκατασκευές

Β. παθητικά ηχεία χαμηλών συχνοτήτων (sub woofer)

1. ποσότητα δύο (2) μονάδες.
2. διάμετρος μεγαφώνου τουλάχιστον 15" (προτείνεται 18").
3. Ευαισθησία τουλάχιστον 98dB/1m/1w.
4. Μέγιστη ακουστική πίεση προγράμματος / μουσικής τουλάχιστον 135dB @ 1m.
5. Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς για σήμα προγράμματος ή μουσικής (MAX program/ music power) τουλάχιστον 1.500 Watt.

Δεν γίνονται δεκτά:

1. Αυτοενισχυόμενα ηχεία (εκτός και αν πληρούν τουλάχιστον τις προϋποθέσεις, 1,2,4 όπως αυτές περιγράφονται στην παράγραφο Β του

Παραρτήματος Ι)

2. Τροποποιημένα ηχεία.

3. Ιδιοκατασκευές,

Ο κάθε πύργος θα πρέπει να στήνεται σε μεταλλικό ικρίωμα και σε ύψος 2 μ. Τα ικρίωματα παρέχονται από τον ανάδοχο.

Τα ηχεία θα τοποθετούνται με τον άξονα εκπομπής προς το οδόστρωμα και με κλίση εκατέρωθεν του πύργου ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη κάλυψη επί της οδού, προτείνεται +/- 20 και +/- 60 μοίρες ως προς τον κάθετο άξονα προς την οδό.

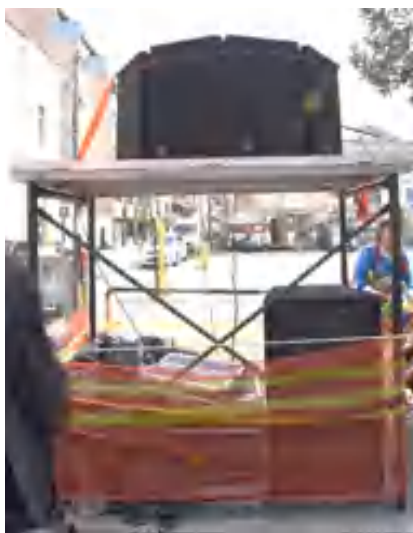
Στην παλιά μελέτη, πέρα από τα ορθογραφικά/τυπογραφικά λάθη, που κανένας δεν μπήκε στον κόπο να εξετάσει και διορθώσει, το κύριο τεχνικό χαρακτηριστικό του κάθε πύργου είναι τα “3kWPA εγκατεστημένη ισχύς σε κάθε πύργο” και το “2 ή 3ών δρόμων σύστημα/ηχείο”. Με αυτή την διατύπωση ο ανάδοχος έχει την απεριόριστη ελευθερία να φέρει ό,τι μεγάφωνα θέλει, αρκεί π.χ. ο ενισχυτής που θα χρησιμοποιήσει να αναφέρει ότι είναι 3kW. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε έντονα στα περασμένα έτη. Επίσης τα μηχανήματα επεξεργασίας του ήχου (EQ, Compressor etc), είτε είναι ενσωματωμένα στους ενισχυτές είτε αποτελούν μέρος της αλυσίδας επεξεργαστών που βρίσκονται σε αυτό που ονομάζεται “loudspeaker controller”.

Η νέα μελέτη προσπαθεί να θέσει κάποιες τεχνικές προδιαγραφές των ηχείων οι οποίες να εξασφαλίζουν το δυνατό την καλύτερη ποιότητα των μηχανημάτων, πέρα από την λειτουργική τους κατάσταση. Για τον σκοπό αυτό κρίθηκε απαραίτητο το βασικό κριτήριο να είναι η διάμετρος του μεγαφώνου, χαρακτηριστικό το οποίο συνδέεται άμεσα με την απόκριση συχνότητας και την ευαισθησία της γραμμής. Επίσης η ευαισθησία του ηχείου είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που όταν συνοδεύεται από την μέγιστη ισχύ την οποία μπορεί να διαχειριστεί το μεγάφωνο μπορούν να παράγουν την μέγιστη ακουστική πίεση την οποία μπορεί να παράγει το ηχείο. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών τα οποία, τα επώνυμα μεγάφωνα έχουν ορθά προσδιορισμένα και αποτυπωμένα στα τεχνικά τους δελτία, κρίθηκε ότι μπορούν να “κλειδώσουν” τις προδιαγραφές του συστήματος και να διασφαλίσουν την ποιότητά του. Στην Εικόνα 1.2 φαίνεται ηχητικός πύργος που εμπίπτει στις προδιαγραφές της μελέτης.

1.2 Μετάδοση του σήματος

Η μετάδοση του σήματος βασίζεται εξ ολοκλήρου σε σύστημα σταθερής τάσης, σε στάθμη 100V. Στην περίπτωση αυτή τα ηχεία δεν συνδέονται απευθείας στην γραμμή μετάδοσης του σήματος αλλά με έμμεσο τρόπο παρεμβάλλοντας μια συσκευή μετατροπής του σήματος. Στην πηγή έχουμε έναν μετασχηματιστή προσαρμογής του σήματος από την στάθμη γραμμής (Line level +4dBV) στην γραμμή 100V και σε κάθε ηχητικό πύργο υπάρχει αντίστοιχα ένας μετασχηματιστής υποβιβασμού από την γραμμή 100V σε αυτή της στάθμης Line +4dBV. Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η βασική δομή του συστήματος. Αυτός ο τρόπος

μετάδοσης πρακτικά, εξασφαλίζει την μετάδοση του σήματος σε μεγάλη απόσταση, αλλά οι μετασχηματιστές περιορίζουν το δυναμικό εύρος και το εύρος συχνοτήτων του σήματος [4].



Εικόνα 1.2 Πρότυπος ηχητικός πύργος κατά την αυτοψία.

Σκοπός είναι η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός του τρόπου μετάδοσης του σήματος. Σκέψεις γίνονται για την χρήση δικτύου Audio Over IP και συγκεκριμένα ανάπτυξη δικτύου βασισμένο στο πρωτόκολλο Dante [5]. Αυτό προϋποθέτει την ανάπτυξη της αντίστοιχης υποδομής από τον Δήμο και την εξασφάλιση της τεχνογνωσίας και του απαιτούμενου εξοπλισμού από τον ανάδοχο.



Εικόνα 1.3 Η δομή του συστήματος μετάδοσης του σήματος στα 100V.

1.3 Μετρήσεις ΣΗΠ κατά την διάρκεια της παρέλασης

Κατά την αυτοψία αλλά και κατά την διάρκεια των εκδηλώσεων πραγματοποιήθηκαν όσο ήταν δυνατόν μετρήσεις Στάθμης Ηχητικής Πίεσης για στατιστικούς λόγους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με πιστοποιημένο ηχόμετρο

Class 1 το NTi XL2 και μετρήθηκε το Leq σε dBA διάρκεια μέτρησης 60 δευτερολέπτων. Οι μετρήσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.1 Μετρήσεις Στάθμης Ηχητικής Πίεσης(ΣΗΠ)

Θέση	ΣΗΠ (Leq dBA)	Lpeak (dBA)	σχόλια
1μ από τον πύργο	115	123	Πριν την παρέλαση
Μέση οδού (~7μ)	108	115	Πριν την εκδήλωση
1μ από τον πύργο	105	115	Κατά την παρέλαση

Οι αποκλίσεις οφείλονται στην φύση των μετρήσεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με σήμα μουσικής και όχι κάποιο σύνθετο σήμα ελέγχου (πχ ροζ θόρυβος). Η στάθμη που παράγουν τα συστήματα κρίθηκε επαρκής με βάση την μελέτη. Φαίνεται ότι η στάθμη αυτή υπερβαίνει τα ανώτατα όρια που τίθενται από την νομοθεσία (όριο στην πίστα 100dBA) [6].

2. Το καρναβάλι της Ξάνθης

Μέχρι και τη δεκαετία του 1950 οι αποκριάτικες εκδηλώσεις που διοργανώνονταν στην Ξάνθη είχαν κυρίως λαογραφικό χαρακτήρα. Συμμετείχαν κυρίως χορευτικά συγκροτήματα, πολιτιστικοί σύλλογοι των τριών νομών της Θράκης και κάποιοι γειτονικών περιοχών. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960, ορισμένοι Ξανθιώτες με φαντασία, διάθεση και τόλμη προώθησαν την ιδέα των λαϊκών γιορτών κατά την περίοδο της Αποκριάς. Έτσι, για πρώτη φορά οργανώθηκαν στη Ξάνθη οι Αποκριάτικες Θρακικές Γιορτές. Οι Γιορτές του 1966 και 1967 οργανώθηκαν από την Τοπική Επιτροπή Τουρισμού και η σύλληψη της ιδέας, ανήκει στο γιατρό Στέργιο Στάθη. Στα πρώτα χρόνια, πριν τη δικτατορία, η Φιλοπρόοδη Ένωση Ξάνθης (Φ.Ε.Ξ.) είχε αναλάβει την πραγματοποίηση των γιορτών, ενώ από τη μεταπολίτευση και μετά οι σύλλογοι της πόλης και των χωριών του νομού Ξάνθης, βοηθούν ποικιλοτρόπως. Στη διοργάνωσή, από το 1986 - 1990 κύριο λόγο παίζει η Θρακική Θεατρική Σκηνή, ενώ από το 1991 οργανώνονται σύλλογοι ειδικά για τη συμμετοχή στις Θρακικές Λαογραφικές Γιορτές. Από το 1987 δίπλα στον τίτλο «Θρακικές Λαογραφικές Εορτές», που είναι η επίσημη ονομασία του θεσμού (από το 1969), προστίθεται και ο τίτλος «Ξανθιώτικο Καρναβάλι».

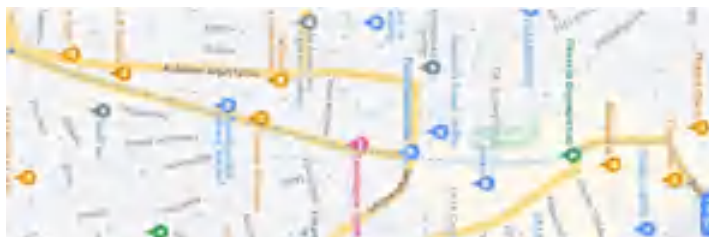
Από το 2011 το νομικό πρόσωπο δημοσίου δικαίου (Ν.Π.Δ.Δ.) του δήμου Ξάνθης, με την ονομασία Κέντρο Πολιτισμού Δήμου Ξάνθης (ΚΠΔΞ), έχει αναλάβει την διοργάνωση της εκδήλωσης. Το 2022-2023 εκφράστηκε από την αρμόδια υπηρεσία, ΚΠΔΞ, η ανάγκη για την δημιουργία μιας νέας μελέτης, στην οποία θα αναγράφονταν οι σύγχρονες απαιτήσεις των ηλεκτροακουστικών συστημάτων, για το σύνολο των εκδηλώσεων που γίνονται την περίοδο του καρναβαλιού. Στόχος της μελέτης ήταν α) η επικαιροποίηση προδιαγραφών των ηχητικών απαιτήσεων για τις εκδηλώσεις του δήμου, συμπεριλαμβανομένου και

της παρέλασης του καρναβαλιού, και β) η μεθοδολογία προδιαγραφών ποιοτικού ελέγχου της καταλληλότητας αλλά και της ποιότητας του παρεχόμενου εξοπλισμού.

2.1 Η διαδρομή της Μεγάλης Παρέλασης του Ξανθιώτικου Καρναβαλιού

Η διαδρομή της παρέλασης ξεκινάει από την ανατολική είσοδο της πόλης και καταλήγει στο παλαιό γήπεδο του Α.Ο.Ξάνθης. Από την είσοδο της πόλης, διασχίζοντας όλη την 28^{ης} Οκτωβρίου, διαπερνάει από την κεντρική πλατεία (Ρολόι) και έπειτα, διασχίζοντας ένα μέρος από την παλιά πόλη της Ξάνθης, δημιουργείτε διαδρομή 1,8 χλμ¹ μέχρι το μνημείο Φ.Αμοιρίδη (πλησίον της ΔΕΗ). Οι καρναβαλιστές και τα άρματα τερματίζουν στο παλαιό Γήπεδο του Α.Ο. Ξάνθης και τελειώνουν οι εκδηλώσεις με ένα υπαίθριο πάρτι όλων των συλλόγων.

Στην διαδρομή της καρναβαλικής παρέλασης, μέχρι και το μνημείο, υπάρχουν 30 σημεία στα οποία τοποθετούνται ηχητικοί πυλώνες. Στους πυλώνες, με μέσο ύψους 3 μέτρων, τους οποίους υπόδειξε, τοποθέτησε και ονομάτισε ο Δ. Ξάνθης, τοποθετείτε ηχητικός εξοπλισμός.



Εικόνα 2.1 Αστική διαδρομή 1760 μέτρων.

Από το μνημείο Φ.Αμοιρίδη μέχρι το γήπεδο το Α.Ο.Ξ., η νέα μελέτη, προέβλεπε τρεις ακόμα ηχητικούς πυλώνες, αλλά μετά από αυτοψία, παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχε δυνατότητα ύπαρξης ασφαλούς παροχής ρεύματος και δεν εγκαταστάθηκαν.

Το κεντρικό σημείο αναπαραγωγής & ελέγχου εξοπλισμού αλλά και όλων των εκδηλώσεων είναι η κεντρική πλατεία (Ρολόι). Για την μεταφορά του ηχητικού σήματος σε όλη η διαδρομή, από την κεντρική πλατεία, χρησιμοποιώντας σύστημα υψηλής τάσης, 100V. Το σύστημα υψηλή τάση (100V) για τη μετάδοση του ήχου, επιτρέπει την τοποθέτηση πολλών ηχείων σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς απώλειες ποιότητας ήχου. Τα οφέλη του συστήματός είναι: α) μικρότερες απώλειες λόγω της υψηλής τάσης, β) εύκολη εγκατάσταση, συνδέονται περισσότερα ηχεία χωρίς την ανάγκη για ύπαρξη προενισχυτή σε κάθε ενισχυτή και γ) ασφάλεια, η υψηλή τάση δεν έχει επικίνδυνη ένταση και δεν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

¹ Η απόσταση υπολογίζεται από τον πρώτο μέχρι τον τελευταίο ηχητικό πυλώνα.

2.2 Ηχητικοί πυλώνες για την Μεγάλης Παρέλασης του Ξανθιώτικου Καρναβαλιού

Η Σύνταξη προδιαγραφών των ηχητικών πυλώνων είχε γίνει από υπάλληλο του δήμου, και χωρίζονταν σε τουλάχιστον 6 κατηγορίες. Στις κατηγορίες εμπεριείχε πληροφορίες ηχητικών συστημάτων με στοιχεία τα οποία δεν εξασφαλίζονται η ένταση αλλά και το συχνотικό εύρος. Το στοιχείο της ισχύος ήταν το βασικό κριτήριο. Για αυτό, κρίθηκε σκόπιμο, στην μελέτη να προσδιοριστούν, εκ νέου, οι τεχνικές προδιαγραφές, για κάθε τύπο πυλώνων οι οποίες είχαν την παρακάτω μορφή:

Τύπου Α. Σύστημα οκτώ (8) «δορυφόρων» τύπου *Line Array* ισχύος 500W/8Ω έκαστο και τεσσάρων (4) *sub*, ισχύος 600W/8Ω. Η συνολική ισχύς της κάθε ηχοστήλης θα είναι τουλάχιστον 6400W/8Ω. Κάθε ηχοστήλη θα συνοδεύεται από τους αντίστοιχους επεξεργαστές και τελικούς ενισχυτές. Οι ηχοστήλες θα τοποθετηθούν στα κάτωθι σημεία...

Ευκολά γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν στρεβλές διατυπώσεις, οι οποίες, οδηγούσαν τους ανάδοχους να ερμηνεύουν τις προδιαγραφές κατά το δοκούν και να τοποθετούν στους πυλώνες, εξοπλισμό χαμηλής ποιότητας ή ηχητικά συστήματα /υλικό αποθήκης. Για αυτόν τον λόγο έγινε επαναπροσδιορισμός προδιαγραφών για τα ηχητικά συστήματα, με βασικό κριτήριο την μέγιστη ηχητική πίεση (dB_{spl}) και την διάμετρο των ηχείων (για τα σημειακά ηχεία). Οι προδιαγραφές ήταν ξεχωριστές, μεταξύ Δορυφόρων και υπογούφερ. Μια ακόμα προσθήκη στις προδιαγραφές ήταν η χρήση ψηφιακού επεξεργαστή του ιδίου οίκου ή ενισχυτή. Όπως την παρακάτω:

Τύπου 1. Μονοφωνικό σύστημα τριών ή τεσσάρων «δρόμων» τύπου *array* αποτελούμενο από 8x δορυφόρους μέγιστης ηχητικής πίεσης 136dB και 4x υπογούφερ 133dB ηχητικής πίεσης στο 1 μέτρο ή μεγαλύτερο. Υποστηριζόμενο από τελικούς ενισχυτές του ιδίου οίκου με τα ηχεία, εναλλακτικά χρήση ψηφιακού επεξεργαστή του ιδίου οίκου.

Επίσης διερευνήθηκε η αναβάθμιση, σημείων και τοποθέτησης ηχητικού εξοπλισμού μεγαλύτερης ισχύος, από την προηγούμενη μελέτη, π.χ. αναβαθμιστήκαν πυλώνες οι οποίοι είχαν σημειακά ηχεία, σε συστοιχίες ηχείων *Array* [10]. Η εγκατάσταση και η στατικότητα των κλουβιών, ήταν υποχρέωση του Δήμου Ξάνθης όπως επίσης ο Δήμος Ξάνθης είναι υπεύθυνος, μαζί με τον ηλεκτρολόγο του αναδόχου για την ασφαλή παροχή ρεύματος στα σημεία όπου βρίσκονται τα κλουβιά.



Εικόνα 2.2 Κατανομή ηχητικού εξοπλισμού, Διαδρομή Καρναβαλικής Παρέλασης

2.3 Αυτοψία, επιτόπιες μετρήσεις ανά πυλώνα

Η μελέτη προέβλεπε ότι πριν την έναρξη της παρέλασης, αλλά και κατά την διάρκεια της, θα γινόντουσαν αυτοψία και επιτόπιες μετρήσεις ανά πυλώνα και είχε ζητηθεί από τον Δήμο, να εξασφαλιστεί χρόνος για μετρήσεις. Αλλά δεν ήταν εφικτό να γίνουν μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες. Πριν από την παρέλαση υπήρχε αναμετάδοση «ραδιοφωνικής» εκκλησίας και με το τελείωμα της εκκλησίας δεν δόθηκε απαραίτητος χρόνος για να γίνουν μετρήσεις ανά πυλώνα. Παρόλα αυτά, έγιναν μετρήσεις σε κάθε πυλώνα, ενδεικτικές της έντασης και της συχνοτικής απόκρισης κάθε ηχητικού πυλώνα.

Πίνακας 2.1 Ενδεικτικός πίνακας μετρήσεων σε ηχητικούς πυλώνες

A/A	3	5	6	7	10	12	13	16	18	22	27
Lzeq	83.3	74.6	69.5	71.2	71.2	80.52	78.6	76.6	78.1	83.4	93.3

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με πιστοποιημένο ηχόμετρο Class 1, BEDROCK AM100 και μετρήθηκε το Leq σε dBz, διάρκεια μέτρησης 32 δευτερολέπτων. Όλες οι μετρήσεις γίναν σε απόσταση 3-4 μέτρων μπροστά από ένα ηχείο του ηχοσυστήματος, σε ύψος περίπου 1.5μ από τον δρόμο. Οι μεγάλες διαφορές των μετρήσεων προκύπτουν γιατί όσο περνούσε η ώρα ανεβαίνει η ένταση ώστε να ξεκινήσει το καρναβάλι.

3. Σχόλια Συζήτηση

Κ.Γ. - Καρναβάλι Πάτρας : Στις εκδηλώσεις του Καρναβαλιού 2023 έγινε η πρώτη εφαρμογή της σχετικής μελέτης. Η ΚΕΔΗΠ έκρινε σκόπιμο πριν ανακοινωθεί η μελέτη και η σχετική προκήρυξη, να κοινοποιήσει και να καλέσει σε συνάντηση τους τοπικούς επαγγελματίες του χώρου ώστε να εκφράσουν τις εμπειρίες τους, της παρατηρήσεις τους, τις απορίες τους και τις τυχόν ενστάσεις τους. Από την συνάντηση αυτή προέκυψαν κάποιες προσθήκες στην μελέτη όπως και προστέθηκε κάποια παράληψη στην διατύπωση για τους ενισχυτές. Κατά την διάρκεια των

εκδηλώσεων φάνηκε η αδυναμία του Δήμου και της ΚΕΔΗΠ για την σύσταση ελεγκτικού οργάνου οπότε και ο μελετητής κλήθηκε να προσφέρει το έργο του ελέγχου της εγκατάστασης και την σύνταξη της σχετικής έκθεσης για την



Εικόνα 2.3 Ενδεικτικός ηχητικός πυλώνας “κλουβί” καρναβαλικής παρέλασης Ξάνθης.

παραλαβή του έργου. Μικρές αποκλίσεις υπήρξαν και επισημάνθηκαν. Οι κυριότερες ήταν (1) η χρήση μικρότερων διαστάσεων ηχείων όπως και (2) η χρήση μονάδων line array για την κάλυψη του ήχου επί της οδού, μέθοδος η οποία είχε απορριφθεί από την μελέτη και η οποία και στην πράξη δημιουργούσε ακουστά “κενά” ηχητικής κάλυψης, υποκειμενικά φάνηκε ότι ενώ στον άξονα της συστοιχίας η κάλυψη ήταν επαρκής μόλις περνούσε το “ύψος” της συστοιχίας και πίσω από αυτή η ένταση του ήχου δεν επαρκούσε για την ομοιόμορφη κάλυψη της οδού. Όπως αναφέρθηκε, από σχετικό ερώτημα που τέθηκε στον φιλικό κύκλο (πάνω από 10 άτομα φανατικοί καρναβαλιστές), μετά την διεξαγωγή των εκδηλώσεων και χωρίς καμία πρότερη αναφορά, ο ήχος έκανε εντύπωση και όλοι παρατήρησαν ότι ήταν βελτιωμένος. Οι άνθρωποι της ΚΕΔΗΠ και οι υπάλληλοι του Δήμου που ασχολούνται χρόνια με το καρναβάλι, επίσης είχαν πολύ καλές εντυπώσεις από την εφαρμογή της νέας μελέτης. Αντίθετη άποψη είχε βέβαια ο “πρόεδρος ηχητικών Αχαΐας Ηλίας” σε συνεργασίας με τοπικούς δημοσιογράφους της αντιπολίτευσης προς την Δημοτική Αρχή. Τα λεγόμενά του ήταν γεμάτα ανακρίβειες και συκοφαντίες τόσο για τον μελετητή, όσο και για τον Δήμο Πατρών [8][9]. Ν αναφερθεί ότι ο εν λόγω επαγγελματίας, δεν κατέβηκε καθόλου στην δημοπράτηση του έργου και πως οι παρατηρήσεις του επί της μελέτης κατά την προαναφερθείσα συνάντηση, ενσωματώθηκαν πλήρως στην μελέτη.

Θα συνοψίζαμε τα εξής σημεία:

1. Οι προδιαγραφές του ηχοσυστήματος ήταν σαφώς ορισμένες και με επιτυχία εξασφάλισαν την ποιότητα του ηχητικού εξοπλισμού που εγκατέστησε ο ανάδοχος.
2. Η ηχητική πίεση ήταν επαρκής για την κάλυψη των εκδηλώσεων

3. Οι υπάλληλοι του Δήμου δεν μπορούν να ελέγξουν την ηχητική εγκατάσταση. Ο Δήμος (ΚΕΔΗΠ) ήδη αναζητά τρόπους ελέγχου και αξιολόγησης της ηχητικής εγκατάστασης για το μέλλον.
4. Οι συστοιχίες στην είσοδο και την έξοδο της πλατείας θα καθιερωθούν, μιας και έκαναν μεγάλη διαφορά στην ποιότητα και την ένταση της μουσικής στο πιο σημαντικό σημείο της διαδρομής. Πιθανότατα θα προστεθούν και για την περιοχή του Σαμπαδρομίου επί της πλατείας.

Μελλοντική εργασία θα περιλαμβάνει την αναβάθμιση του συστήματος μετάδοσης του ηχητικού σήματος. Ήδη εξετάζεται η δημιουργία δικτύου IP βασισμένο στο πρωτόκολλο Dante [5]. Τέλος εξετάζονται από τον Δήμο τρόποι εξασφάλισης της ασφάλειας του κοινού και του εξοπλισμού πέραν του “δεσίματος” των ηχείων με μάντες πάνω στα ικρίωματα.

Κ.Β - Ξανθιώτικο Καρναβάλι: Στις εκδηλώσεις του Καρναβαλιού 2023 και τις Ξάνθης, έγινε η πρώτη εφαρμογή της σχετικής μελέτης. Για την σύσταση της μελέτης ήταν απαραίτητο να δοθεί υλικό από την αρμόδια υπηρεσία του δήμου, το οποίο ήταν πλήρες. Η ύπαρξη φωτογραφικού υλικού, βοήθησε πολύ στο να γνωρίζουμε την υφιστάμενη κατάσταση από προηγούμενες παρελάσεις.

Η Μελέτη κρίθηκε άρτια από την υπηρεσία αλλά και τον ανάδοχο. Ο ανάδοχος εξέφρασε το προβληματισμό για την ενσωμάτωση της ασφάλεια των παροχών ρεύματος και για την χρήση των ψηφιακών επεξεργαστών του ιδίου οίκου.

Η υλοποίηση του αναδόχου ήταν ικανοποιητική και υπάκουγε στις προδιαγραφές της μελέτης. Μόνο 2 πυλώνες είχαν ηχεία «ονομαστικών προδιαγραφών», παρατηρήθηκαν μετρήσεις εντάσεων και συχνοτικού εύρους, δεν αντιστοιχούσαν με τα ηχεία.

Ενώ ζητήθηκε από το Δήμο να ενταχθεί στην μελέτη ή επέκταση της διαδρομής, τριών ακόμα πυλώνων (μετά το μνημείο Φ.Αμοιρίδη μέχρι γέφυρα) δεν εφαρμόστηκε στην καρναβαλική παρέλαση του 2023. Δυστυχώς ο ανάδοχος αλλά και ο Δήμος δεν έδωσαν χρόνο ώστε να γίνει επιβεβαίωση – μετρήσεις με πραγματικές συνθήκες για να υπάρχει πληρέστερη αναφορά εκτέλεσης. Ενώ έγινε πρότασή στον δήμο, η μελέτη να συμπεριλαμβάνει και το σύστημα μετάδοσης, με χρήση συστήματος Audio Over Ip [11], π.χ. AVB [12], δεν έγινε αποδεκτό. Ο λόγος ήταν γιατί δεν υπάρχει εξειδικευμένο προσωπικό στον δήμο και θα ήταν αρκετά δύσκολη η εγκατάσταση και για τον στον ανάδοχο και

Συγκριτικά (Πάτρας-Ξάνθης) : Ενώ στην Πάτρα προδιαγράφονταν στην διαδρομή μόνο ηχητικά συστήματα με ηχεία Point source, στην Ξάνθη προδιαγράφονται και ηχητικά συστήματα τύπου Array.

Επιλογή/Περιγραφή	Πάτρα	Ξάνθη
Δορυφόρος	4x15” , 1. Μέγιστη ακουστική πίεση μουσικής ή	2x15” (δορυφόρος) 133dB (@1m)

	προγράμματος (Max SPL Program/music) τουλάχιστον 130dB/1m 2. Ευαισθησία (sensitivity) τουλάχιστον 99dB/1m /1w 3. Διασπορά στον οριζόντιο άξονα τουλάχιστον 60 μοίρες Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς για σήμα προγράμματος ή μουσικής (MAX program/music power) τουλάχιστον 1.000 Watt	
Υπογούφερ	2x18" (15") 1. Μέγιστη ακουστική πίεση προγράμματος / μουσικής τουλάχιστον 135dB @ 1m 2. Ευαισθησία τουλάχιστον 98dB/1m/1w Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς για σήμα προγράμματος ή μουσικής (MAX program/music power) τουλάχιστον 1.500 Watt	Υπογούφερ 133dB ηχητικής πίεσης στο 1 μέτρο
Ενισχυτής	Επιπλέον τα ηχεία θα συνοδεύονται από ενισχυτή τουλάχιστον διπλάσιας ισχύος ανά κανάλι όπως αυτή αναφέρεται στις τεχνικές προδιαγραφές, για το φορτίο που θα συνδεθεί (4/8 Ω κοκ) σε αυτόν. Προτείνεται η χρήση ενισχυτή με ενσωματωμένο επεξεργαστή σήματος.	Του ιδίου οίκου ή Επεξεργαστή

Επεξεργαστής	-	Του ιδίου οίκου ενισχυτής
Ενισχυτής	Τάση Line 4dBV σε διαμόρφωση 100V	1,7v σε διαμόρφωση 100V
Σύστημα μετάδοσης		

Αν και οι μελετητές δούλεψαν εντελώς ανεξάρτητα για τη σύνταξη των μελετών, και δεν υπήρχε συνεργασία για την σύνταξη τους, βλέπουμε ή ότι μεθοδολογία βλέπουμε και ο τρόπος προσέγγισης είναι παρόμοιος και χρησιμοποιείτε ο ίδιος τρόπος προδιαγραφών και ελέγχου και στις δυο μελέτες.

4. Αναφορές

- [1] https://el.wikipedia.org/wiki/Πατρινό_Καρναβάλι (προσπέλαση Σεπτ. 2024)
- [2] Google Maps (2024), Κέντρο της πόλης της Πάτρας, Διαθέσιμο στον: <https://maps.app.goo.gl/V3rdom5si3FtWZG19> (προσπέλαση Σεπτ. 2024)
- [3] <https://www.carnivalpatras.gr/> (προσπέλαση Σεπτ. 2024)
- [4] Sound Reinforcement Engineering: Fundamentals and Practice, Wolfgang Ahnert and Frank Steffen, CRC Press; 1st edition, Mar 9, 2000
- [5] <https://www.audinate.com/>
- [6] Νόμος Α5/3010/1985 , Μέτρα προστασίας της Δημόσιας Υγείας από θορύβους μουσικής των Κέντρων διασκέδασης και λοιπών Καταστημάτων.
- [7] https://el.wikipedia.org/wiki/Ξανθιώτικο_Καρναβάλι (Προσπέλαση Σεπτ. 2024)
- [8] <https://pelop.gr/sovares-katangeliies-tou-proedrou-ichitikon-achaias-ileias-me-kouponia-tou-kke-pairneis-douleies-o-andreas-patsis-milaei-apokleistika-stin-p/> (προσπέλαση 16 Σεπτ. 2024)
- [9] <https://pelop.gr/patrino-karnavali-ichitika-apo-gamous-stis-parelaseis-katangeltikos-o-proedros-tou-somateiou-stin-p/>
- [10] <https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id=9974> (προσπέλαση Σεπτ. 2024)
- [11] <https://www.aes.org/publications/standards/search.cfm?docID=96> (προσπέλαση 16 Οκτωβ. 2024)
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Audio_Video_Bridging (προσπέλαση Οκτωμβ. 2024)



Exploratory analysis of sound datasets in musical acoustics: the case of drumheads

Michael Starakis^{1,*}, Chrisoula Alexandraki¹, Rolf Bader²,
Maximos Kaliakatsos-Papakostas¹

¹ Department of Music Technology and Acoustics, Hellenic Mediterranean
University, 74133 Rethymnon, 5 Greece

² Institute of Systematic Musicology, University of Hamburg, 20354 Hamburg,
Germany

* ddk216@hmu.gr (corresponding)

ABSTRACT

The increasing progress in the development of high-performance computing systems and artificial intelligence reveals new perspectives in correlating timbral texture to the structural characteristics of musical instruments. Training correlating models, e.g. deep learning neural networks, requires aggregating large volumes of data and developing tools for Exploratory Data Analysis (EDA). This article presents AudioInsight, a web application for the audiovisual exploration of sound datasets in music acoustics. This application is a byproduct of our research in drumhead acoustics, which aims at the computational estimation of tuning and damping strategies for a membrane to reproduce a desired timbre. Through the automatic rendering of histograms for parameter distributions, scatter plots for parameter correlations, and interactive cluster visualizations, AudioInsight enables the assessment of the suitability of a sound dataset for the computational task at hand. Compared to conventional data analysis tools, AudioInsight enables the identification of areas where data may be sparse, dense, or inaccurate, and it highlights complex, nonlinear relationships between physical properties and perceptual characteristics that might otherwise remain unnoticed.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη πρόοδος στην ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων και στις τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης αναδεικνύει νέες προοπτικές στη συσχέτιση της ηχοχρωματικής υφής με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μουσικών οργάνων. Η εκπαίδευση συσχετιστικών μοντέλων, όπως τα νευρωνικά δίκτυα βαθιάς μάθησης, απαιτεί τη συγκέντρωση δεδομένων μεγάλου όγκου και την ανάπτυξη εργαλείων για Εξερευνητική Ανάλυση Δεδομένων (Exploratory Data Analysis - EDA). Το παρόν άρθρο παρουσιάζει το AudioInsight, μια διαδικτυακή εφαρμογή για την οπτικοακουστική εξερεύνηση συνόλων ηχητικών δεδομένων στη μουσική ακουστική. Η εφαρμογή αυτή αποτελεί παραπροϊόν της έρευνάς μας στην ακουστική των τυμπάνων, η οποία στοχεύει στην υπολογιστική εκτίμηση του τρόπου χορδίσματος και απόσβεσης μιας μεμβράνης προκειμένου αυτή να αναπαράγει ένα επιθυμητό ηχόχρωμα. Μέσω ιστογραμμάτων για κατανομές παραμέτρων, διαγραμμάτων διασποράς για συσχετίσεις παραμέτρων και διαδραστικών

απεικονίσεων συστάδων, η εφαρμογή AudioInsight επιτρέπει την εκτίμηση της καταλληλότητας ενός συνόλου ηχητικών δεδομένων για το υπολογιστικό πρόβλημα για το οποίο προορίζεται. Συγκριτικά με τα συμβατικά εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, το AudioInsight επιτρέπει τόσο τον εντοπισμό περιοχών στις οποίες τα δεδομένα μπορεί να είναι αραιά, πυκνά ή ανακριβή, όσο και την ανάδειξη σύνθετων, μη γραμμικών σχέσεων ανάμεσα σε φυσικές ιδιότητες και αντιληπτικά χαρακτηριστικά που σε διαφορετική περίπτωση θα παρέμεναν απαρατήρητες.

Introduction

Advances in AI-driven techniques have improved the ability to process large datasets of acoustic signals, offering new insights into the physical and perceptual aspects of musical instruments. These techniques require large, high-quality sound datasets to estimate physical sound traits from sound and to train deep learning models for sound recognition. While large collections of audio data are currently available, finding datasets with accurate annotations that link physical properties to perceptual traits remains challenging and often requires human curation and expert knowledge. Relevant methodologies assisting this task are presented in the domain of Exploratory Data Analysis (EDA). EDA is a fundamental methodology in data science designed for summarizing, visualizing, and understanding complex datasets, by employing techniques such as data visualization, statistical summaries, and dimensionality reduction [1 - 5]. In musical acoustics, and especially in large multidimensional audio datasets, EDA tools aim to reveal underlying patterns, detect anomalies, test hypotheses, and validate assumptions through visual and statistical methods, allowing researchers to efficiently identify trends and correlations within complex data structures that might otherwise go unnoticed. This paper presents the AudioInsight application [6], which was developed to address these challenges in our recent research endeavors focusing on drumhead acoustics [7].

1. Motivation: Drumhead dataset

The development of the AudioInsight application emerged from our research on drumhead acoustics [7, 8], which aimed to computationally infer the amount and distribution of damping material to apply on the surface of a membrane in order to achieve a desired sound texture. This inverse acoustic problem presented unique challenges, particularly in handling and exploring vast amounts of data. AudioInsight was conceived as a solution to these challenges, providing a versatile visual and auditory exploration tool capable of revealing complex relationships between the physical properties and sound characteristics of drumheads. The drumhead dataset consists of approximately 11,000 synthetic sounds generated using a Finite Difference Time Domain (FDTD) algorithm [9] that models the behavior of a vibrating circular membrane. This model assumes the distribution of malleable, paste-like material on the surface of the membrane to alter its vibrational behavior and hence the sound it generates. Six paste distribution patterns were applied to vary the sounds. These patterns were inspired by commercial and custom drum dampeners, commonly used by percussionists, as shown in Fig. 1.1. By varying the area covered by paste (i.e., the mass per unit area of the paste in each pattern) and the strike position of membrane excitation, the model generated different sounds.

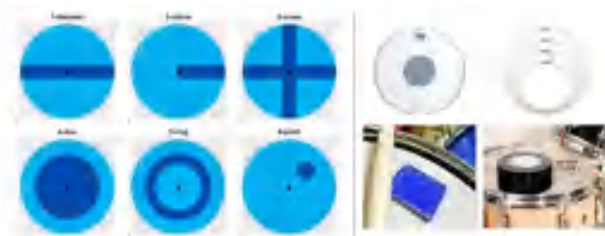


Figure 1.1 Pattern cases (left). Common dampening practices (right).

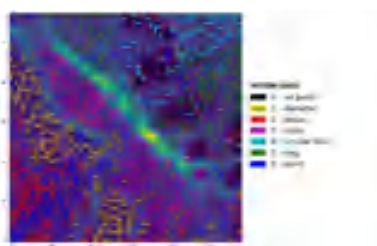


Figure 1.2 Trained SOM. Dark background colors reveal similarities, and light colors reveal strong neuron similarities.

This resulted in a large sound dataset, which was deemed appropriate for training deep neural networks to address the intended computational task. To explore the resulting dataset, for example, in terms of understanding whether similar damping schemes produce similar sounds, several clustering methods were leveraged. Initially, Self-Organizing Maps (SOMs) were used to map the distribution of the frequency ratios of sound overtones (i.e., characterizing sound texture) against the damping patterns on a 2D plane. As shown in Fig. 1.2 these representations revealed a distinguishing line between line patterns and circular patterns [8]. This fact motivated further investigation through additional clustering techniques, e.g. PCA [10], t-SNE [11, 12], and LDA [13], among others. These methods allowed visualizing high-dimensional data, namely the raw audio signal in two and three dimensions, thus permitting the identification of distinct sound clusters and providing insight into the influence of paste patterns and impact points on the resulting sound signals. An example of clustering membrane sounds is shown on Fig. 1.3. Each point represents a different sound signal and each color depicts a different damping pattern. For such a large dataset with high-dimensional parameter spaces, where each sound sample is associated with numerous parameters, conventional audio analysis methods fall short in providing a deeper understanding of the dataset, including the identification of interesting sounds, their complex relationships and data patterns that may be easily go unnoticed. To address these challenges, AudioInsight was developed as a demo application focused on drumheads. Through its interactive visualizations and clustering capabilities, it became possible to uncover complex, non-linear relationships between physical properties and perceptual features that might otherwise remain hidden. These insights not only advanced our research objectives but also demonstrated the potential of AudioInsight as a powerful tool for systematic EDA of large audio datasets in musical acoustics.



Figure 1.3 Clustering methods plots. From left to right: PCA, T-SNE, LDA.

2. The AudioInsight Application

The design of AudioInsight focuses on delivering a powerful, yet user-friendly interactive system for comprehensive data exploration and analysis, accessible to researchers, instrument manufacturers, and musicians. Its features include visual and audio analysis tools, clustering representations, audio previews, and feature graphs that help users to uncover patterns and correlations that are not obvious through regular methods, making it particularly valuable for machine learning tasks. For instrument manufacturers and musicians, AudioInsight serves as a valuable tool guiding instrument design and tuning. It enables users to explore and understand the acoustic properties of their instruments, search for similar sounds, and explore relationships as well as timbral discrepancies. The user interface of the application is organized into six pages. Except from a home page, the other pages present the dataset according to selected descriptive parameters. Users select their desired dataset file and choose specific parameters for analysis, through dropdown menus and checkboxes. For categorical parameters, which in the case of membranes are the paste patterns and the strike positions, the graphical representations can be filtered to display data distributions for specific labels. For continuous variables, like the mass of added paste and the fundamental frequency of the sounds, users can scale, zoom, and pan the graphs to focus on particular value ranges. The AudioInsight application is freely available online at: <http://musicolab.hmu.gr:8050>. In the following sections, we provide a brief description of the functionality of each page.

2.1 The dataset Page

The Dataset page (Fig. 2.1) features an interactive and customizable table for exploring the dataset contents, with options to filter and adjust the display of the

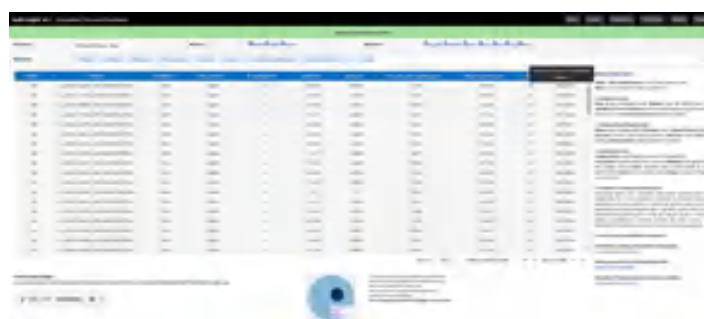


Figure 2.1 The Dataset Page

data. Rows correspond to dataset instances, i.e., sound files and columns to descriptive parameters. In this case, columns correspond to the physical parameters that describe the membrane and the damping material, such as strike position, mass of the applied paste, and more. The table supports data pagination and allows users to show or hide specific columns, as well as to sort, filter, and search for parameter values. Clicking on a row triggers audio playback of the corresponding sound file and displays its drumhead grid image, which visually represents the paste pattern applied to the drumhead. The right-side panel presents a description of the dataset and provides detailed information about the data being explored.

2.2 Distributions Page

The Distributions page (Fig. 2.2) helps users visualize and analyze the statistical distributions of various parameters within the sound dataset. This page allows users to select a parameter and display its distribution across the entire dataset or by filtering out categorical parameters, such as strike positions and pattern cases. For example, the page can display the distribution of paste mass when the distribution of paste mass when distributed in circular patterns, such as rings and discs. Hovering over the plot reveals the y-axis value and the range of x-axis values represented by each bar in the histogram. Users can customize the appearance of the plots through scaling, zooming, and panning, and they can also save the plot as an image to disk. A right-side panel provides context about the parameter being visualized, including its calculation formula and statistical metrics like minimum, maximum, median, and standard deviation. Using the Distributions page, researchers can assess whether the dataset is balanced with respect to different parameters, helping them weigh the suitability of the data for their investigation.

2.3 Correlations Page

The Correlations page (Fig. 2.3) offers tools for exploring and visualizing relationships between pairs of parameters in the sound dataset. It features an interactive scatter plot with a range of customization options. Users can select the parameters for the x and y axes and filter out specific values of categorical data. The plot updates in real time, allowing for immediate visualization of correlations. Additional features include a Kernel Density Estimation (KDE) line, histograms and colormaps based on a third parameter, which enhances the depth of the analysis.



Figure 2.2 The Distributions Page



Figure 2.3 The Correlations Page

Users can also toggle a heatmap view for density visualization. For example, in Fig. 2.3, the page illustrates a correlation plot showing how the additional mass applied via paste relates to the fundamental frequency (f_0) of the resulting sound. Each paste pattern case is represented by a different color on the plot. According to the diagram, various hypotheses can be formulated regarding how increasing the mass of the membrane alters its perceived pitch and how different patterns result in varying correlations between fundamental frequency (f_0) and mass. The plot supports zooming and panning, and provides hover functionality that allows users to view detailed information about individual data points.

2.4 Clusters Page

The Clusters page (Fig. 2.4) provides a tool for audiovisual navigation within the dataset by using advanced clustering techniques. It features a central plot showing the data points resulting from the applied clustering method on the input data set, that in this case are the raw values of wav audio data. The clustering plot can be viewed in 2D or 3D and the currently supported clustering methods include PCA, t-SNE, and others such as PaCMAP, UMAP, and LDA. Users can specify the number of files to be previewed and filtered according to categorical data. Hovering over data points on the plot triggers real-time audio playback of the corresponding sound file, providing an auditory dimension to the visual exploration. The right-side panel displays details about the parameters of each sound file, as well as information about the utilized clustering method. The Clusters Page is designed to combine visual, auditory, and textual information, for a multisensory experience of data exploration.

2.5 Analysis Page

The Analysis page (Fig. 2.5) is designed as a comprehensive tool for real-time sound analysis and digital signal processing. It combines the visualization of data clusters with a set of spectral analysis graphs. The page is split into two sections: a clustering plot area on the left and an analysis panel on the right. The interactive clustering plot allows for audio playback when hovering over a data point, while also performing an audio analysis of the corresponding sound file. The analysis panel displays the sound waveform, its Short-Term Fourier Transform (STFT) spectrogram, and a phase-space portrait visualization. Each updates in real-time as

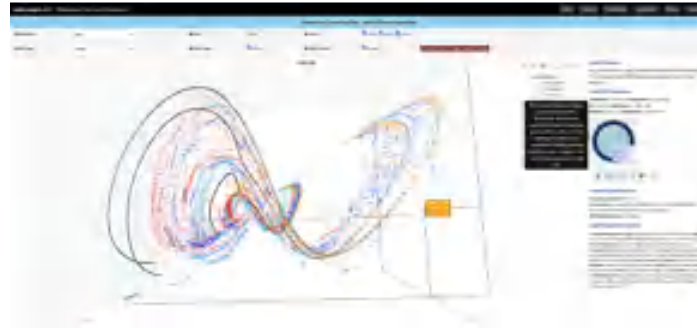


Figure 2.4 The Clusters Page

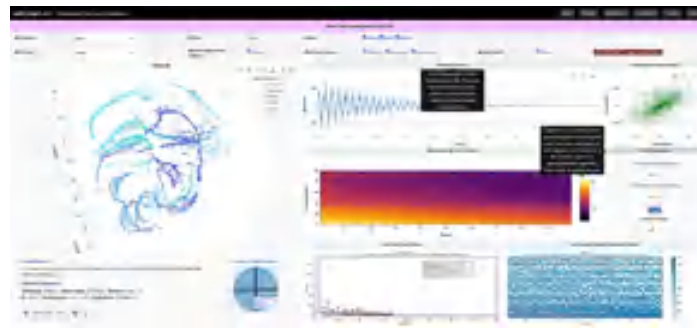


Figure 2.5 The Analysis Page

users explore different data points in the cluster area. Additionally, the analysis panel features an overtone visualization and an MFCC spectrogram. These specific visualizations are generated offline, prior to loading the dataset into the application.

3. Conclusions and future perspectives

AudioInsight presents an example of a web application aiding research in data-driven musical acoustics. Its development was motivated by our research on an inverse acoustic problem, that of computationally inferring how to damp or tune a membrane to produce a desired sound texture. Such computational problems require large amounts of data that are difficult to handle and challenging to assess in terms of accuracy, adequacy and balance for addressing the required task effectively. Through histograms for parameter distributions, scatter plots for parameter correlations and interactive clustering visualizations, the application allows gaining a deeper understanding of data by: (a) revealing areas where data may be sparse, congested, or inaccurate, and (b) uncovering complex, non-linear relationships between physical properties and perceptual features that might otherwise remain hidden within the dataset. By revealing such issues, researchers are guided to refine their datasets, whether by augmenting with more data, applying data augmentation techniques, or rejecting outliers with faulty parameter values. Through uncovering relationships, researchers can develop hypotheses that may lead to alternative data representations, such as audio features, to guide the analytical process for data

modeling. AudioInsight has been designed to allow loading alternative sound datasets without requiring re-engineering of its exploratory functionalities. Current development efforts are focused on the specification of a protocol describing the expected data hierarchies and parameter mappings through JSON files. To validate the specification, we are working on integrating a sound dataset of over 200,000 cymbal sounds from well-known manufacturers. In the future, we aspire that AudioInsight can serve as a central hub for researchers, musicians, and instrument manufacturers, facilitating knowledge sharing and collaboration on perceptually informed modifications in musical instrument design.

4. References

- [1] J.W. Tukey, "Exploratory Data Analysis." Addison-Wesley, Reading, MA (1977).
- [2] J.T. Behrens, "Principles and Procedures of Exploratory Data Analysis," *Psychological Methods*, vol. 2, no. 2, pp. 131-160 (1997).
- [3] C. Ahlberg and B. Shneiderman, "Visual Information Seeking: Tight Coupling of Dynamic Query Filters with Starfield Displays," in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (1994).
- [4] H. Hochheiser and B. Shneiderman, "Interactive Exploration of Time Series Data," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Information Visualization* (2003).
- [5] H.L.M. Lam, "Visual Exploratory Analysis of Large Data Sets: Evaluation and Application," T, University of British Columbia (2008).
- [6] M. Starakis and C. Alexandraki, "AudioInsight: Online Exploration of Large Audio Datasets for Musical Acoustics," in *2024 IEEE 5th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2)*, Erlangen, Germany, 2024, pp. 1-10.
- [7] C. Alexandraki, M. Starakis, P. Zervas, and R. Bader, "Inferring Drumhead Damping and Tuning from Sound Using Finite Difference Time Domain (FDTD) Models," *Acoustics*, vol. 5, no. 3, pp. 798-816 (2023).
- [8] C. Alexandraki, M. Starakis, R. Bader, and P. Zervas, "Machine Learning of Finite-Difference Time Domain (FDTD) Physical Modelling Sound Simulations of Drumhead Paste Pattern Distributions," in *Proc. European Acoustics Association Forum Acusticum 2023*, Torino, Italy, Sept. 2023, pp. 2217-2224.
- [9] R. Bader, "Finite-Difference Model of Mode Shape Changes of the Myanmar Pat Wain Drum Circle Using Tuning Paste," in *Proc. Meetings on Acoustics 2016*, AIP Publishing, New York, NY, USA, 2016, vol. 29, p. 035004.
- [10] T. Jolliffe and J. Cadima, "Principal Component Analysis: A Review and Recent Developments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202 (Apr. 2016).
- [11] G. Hinton and S. Roweis, "Stochastic Neighbor Embedding," in *Proceedings of the 15th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'02)*, Cambridge, MA, USA, 2002, pp. 857-864. MIT Press.
- [12] L. van der Maaten and G.E. Hinton, "Visualizing Data Using t-SNE," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 9, pp. 2579-2605 (2008).
- [13] R.A. Fisher, "The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems," *Annals of Eugenics*, vol. 7, pp. 179-188 (1936).



Κρουστική διέγερση ράβδου και ακουστικοποίηση στο πεδίο του χρόνου

Σπύρος Κουζούπης
skouzo@hmu.gr

Χρήστος Παναγιωτόπουλος
pchr@civil.auth.gr

Άγγελος Κόντος-Πανταζής
Kontos_A@hotmail.com

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο 74133, Κρήτη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μοντελοποίηση στο πεδίο του χρόνου του πλήκτρου ενός ιδιόφωνου μουσικού οργάνου, όπως του βιμπράφωνα ή της μαρίμπας, το οποίο διεγείρεται από μία μπαγκέτα με σφαιρική κεφαλή, πραγματοποιείται εφαρμόζοντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μπάρα του μουσικού οργάνου μοντελοποιείται ως μία δοκός τύπου Euler-Bernoulli, αφού έχει προηγηθεί βελτιστοποίηση του προφίλ της, ώστε να επιτευχθούν από μουσικής πλευράς κατάλληλοι λόγοι, μεταξύ των τριών χαμηλότερων ιδιοσυχνοτήτων της. Δεδομένου ότι τα μουσικά όργανα παίζονται συνήθως σε κλειστούς χώρους, αναζητείται ένα ρεαλιστικό ακουστικό αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του περιβάλλοντος χώρου. Αυτό περιλαμβάνει την δονητικο-ακουστική αλληλεπίδραση της ράβδου με το περιβάλλον. Το δυναμικό πρόβλημα αρχίζει να λαμβάνει χώρα από τη στιγμή που κρούεται η δοκός, για αυτό παρέχεται λεπτομερής ανάλυση της επίδρασης κατά την αρχική φάση του δυναμικού προβλήματος. Ο ήχος που προκύπτει από μία μόνο μπάρα καταγράφεται από εικονικούς αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται σε διάφορα σημεία εντός ενός κλειστού ή ενός ανοικτού χώρου. Επιπροσθέτως, εξετάζεται και το σενάριο όπου ένας διδιάστατος σωλήνας τοποθετείται κάτω από το πλήκτρο (που είναι ένας κοινός τρόπος για τη βελτίωση του ήχου σε πραγματικά μουσικά όργανα). Πραγματοποιούνται ακουστικοποιήσεις σε πολλαπλές τοποθεσίες εντός του χώρου και με διάφορους συνδυασμούς υλικών της μπάρας και της κεφαλής της μπαγκέτας. Αν και το βασικό δονητικο-ακουστικό πρόβλημα εξετάζεται σε δύο διαστάσεις, η ποιοτική αξιολόγηση των ληφθέντων σημάτων μέσω των εικονικών αισθητήρων, είναι αρκετά ικανοποιητική, όπως προκύπτει από τις δοκιμές ακρόασης.

Beam auralization in the time domain using the finite element method

ABSTRACT

Time-domain modeling of a mallet percussive musical instrument, like an aluminum vibraphone or a wooden marimba bar, struck by a spherical mallet head, is conducted using the finite element method. The bar is modeled as an Euler-Bernoulli beam. Eigenvalue optimization previously led to a non-uniform bar profile with the three lowest eigenfrequencies in proper musical ratios. Given that musical instruments are typically played in enclosed spaces, a realistic acoustic profile is sought by considering the impact of the surrounding room. This involves the vibro-acoustic interaction of the bar with the surrounding air. The dynamic problem is addressed as the beam is struck by a rounded mallet head. A detailed analysis of the impact during the initial phase of the dynamic issue is also provided. The resulting sound from a single bar is captured by virtual sensors positioned at various points within the room or in open space. Additionally, scenarios where a 2D tube is placed under the bar (a common method for sound sustain in real musical instruments) are explored. Auralizations are carried out at multiple locations within the room and with various combinations of bar and mallet head materials. While the primary vibro-acoustic problem is examined in 2D, qualitative assessment of the obtained sensor signals, via listening tests, reveals satisfactory outcomes.

1 Introduction

Mallet percussion instruments are classified as tuned idiophones, producing sound through the vibration of their struck sound bars. When the mallet strikes the sound bar, it activates primarily the vertical bending modes, with the eigenfrequencies of these modes corresponding to the predominant partials of the emitted sound. Because sound bars are inherently inefficient as radiators, many instruments incorporate cavity resonators to amplify the sound projection.

The vertical bending modes of sound bars are meticulously adjusted to achieve certain frequency ratios by incorporating specific undercuts, as uniform cross-section bars typically produce nonharmonic eigenfrequencies. The tuning process of marimba and xylophone bars underwent thorough examination by Bork [1], delving into several practical considerations. Orduña-Bustamente [2] and Petrolito and Legge [3] developed numerical techniques to optimize the undercuts for attaining desired harmonic ratios among the partials. Recent studies by Beaton and Scavone delved into iterative and genetic algorithms for optimization purposes [4].

Chaigne and Doutaut [5] introduced numerical simulations of xylophone bars employing a one-dimensional finite difference method, which also scrutinized the nonlinear interaction between the mallet and the sound bar through experiments and simulations. Doutaut and colleagues [6] expanded the model by incorporating a tubular resonator, considering it as a unidimensional system. They noted the negligible impact of the resonator's back-coupling effect on the bar, a characteristic specific to xylophone bars in higher frequency ranges, cautioning against generalizing this to all mallet percussion instruments. Henrique and Antunes [7] presented a modal simulation of sound bar vibrations, accounting for nonlinear interaction phenomena but overlooking acoustical radiation. Present authors have also dealt primarily with the profile shape optimization of the bars, [8, 9, 10].

The development of a physics-based numerical model for sound production in mallet percussion instruments poses several challenges. Addressing sound radiation in open or semi-open spaces necessitates a model capable of handling unbounded domains. Moreover, the nonlinear interaction between the mallet and sound bar complicates frequency domain solutions. This paper explores a broader examination of collision modeling in musical instruments and introduces a finite element (FE) method to address the mentioned challenges, demonstrating its efficacy in the time domain through various case studies involving different materials for the bar and the mallet, as well as different striking velocities and positions.

Mallets for the xylophone are typically made of polyester, rubber, or wood. Articulation is crucial in mallet selection. The marimba, glockenspiel, and vibraphone have resonance influenced by mallet choice, while the xylophone behaves differently. It has a short staccato response. The mallet's hardness alters the initial attack of a note. Harder mallets create a brighter, louder tone,

while softer ones like rubber produce a warmer, rounder tone. Wooden mallets are also a solid option. The size of the mallet's head affects articulation and dynamics. A smaller ball produces a thinner tone, while a larger one offers a fuller response from the bar. This principle applies to all mallet instruments.

2 Spatiotemporal consideration for the excitation of the instrument's bar

Percussion mallets are made from a diverse range of materials. In the following analysis, we will calculate various physical attributes, considering both standard and extreme scenarios, such as using an exceptionally hard or soft mallet head to strike either a hard (metal) or softer (wooden) bar. We will focus on three mallet materials: rubber, wood, and aluminum, and two bar materials: wood and aluminum. Notably, the effective mass of the mallets is approximately 20% higher than the actual mass of the mallet head, as demonstrated in some experiments [11].

Utilizing findings from contact theory as proposed by Landau [12], the Hertzian stiffness coefficient K can be approximated by considering two elastic spheres of distinct materials in contact (without accounting for any vibration of the spheres). If a spherical mallet head with radius R_M , Young's modulus E_M , and Poisson's ratio σ_M undergoes compression denoted by δ , then the interaction force F between the two solids can be expressed as

$$F = K \delta^{3/2} \quad (1)$$

where K for a flat beam is given by $K = \sqrt{R_M}/D$, and the combined flexural rigidity D depends on the Young's moduli and Poisson's ratios of both the beam E_B , σ_B and mallet E_M , σ_M as illustrated below:

$$D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \sigma_B^2}{E_B} + \frac{1 - \sigma_M^2}{E_M} \right) \quad (2)$$

The range of K values for a 1 cm radius mallet head after considering various mallet-bar material combinations is $8.9 \times 10^6 - 6.3 \times 10^9 \text{ N m}^{-3/2}$. The lower value corresponds to a rubber mallet head striking a hard wooden bar, while the higher value corresponds to a brass mallet head striking an aluminum bar. Since mallet heads are typically covered with felt or are threaded, accurately estimating the actual value of K can be challenging. In [11], the experimentally obtained value of K is $1.31 \times 10^9 \text{ N m}^{-3/2}$ for a boxwood head striking a xylophone bar (made of hard wood). Although wooden mallets are not commonly used in xylophone playing, plastic or rubber materials are more prevalent.

$$\mu \dot{\delta}^2 + \frac{4\sqrt{R_M}}{5D} \delta^{5/2} = \mu v_o^2 \quad (3)$$

For an aluminum beam with a mass of $M_B = 0.429 \text{ kg}$ struck by a wooden (padouk) spherical mallet head of radius $R_M = 1 \text{ cm}$ and mass $M_M = 0.0262 \text{ kg}$, traveling at a velocity of $v_o = 1 \text{ m/s}$, the compression evolution $\delta(t)$ can be determined by solving eq. (3). The interaction time is twice the time taken to reach maximum compression [12, 11]. This assumption holds when the force applied on the beam is symmetrical (in time) around its peak value. However, it is generally valid only for very long beams or when the boundary conditions are identical at both ends and the beam is struck at the midpoint. By integrating eq. (3) up to the maximum displacement we can approximate the interaction time as:

$$\tau = 3.218 \left(\frac{\mu^2}{K^2 v_o} \right)^{1/5} \quad (4)$$

However, based on the solution of eq. (3) and under the assumption of the mentioned symmetry, we can easily derive the maximum compression as follows:

$$\delta_{max} = \left(\frac{5\mu v_o^2}{4K} \right)^{2/5} \quad (5)$$

where K represents the Hertzian constant defined as $K = \sqrt{R_M}/D$. By combining eqs. (5) and (4), we can derive an approximation for the interaction time in terms of δ_{max} and v_o :

$$\tau = 2.943 \frac{\delta_{max}}{v_o} \quad (6)$$

Using eq. (5) and assuming a flat beam, the radius of the contact ‘area’ at the point of maximum force, as well as how the radius changes over time, can be described by the following relationships:

$$r_{max} = \sqrt{\delta_{max} R_M} \quad , \quad r(t) = \sqrt{\delta(t) R_M} \quad (7)$$

Since the contact area was assumed to be circular, the impact width Δx can be determined from the contact radius $r(t)$ and the deformation $\delta(t)$ by calculating the length of the circular cord. In our implementation, we maintain $\Delta x(t)$ at a constant value, set to twice the maximum contact radius $\Delta x = 2 r_{max}$. In other simulations involving impacts on musical instruments that we are familiar with, the load is usually either evenly distributed over a particular length [11] or applied at a specific point (node) [13, 14]. It has been assumed [5] that in most cases the size of the contact area has a minimal impact, although this necessitates further examination. When considering the parameters δ_{max} and velocity v_o within specific ranges, the estimated impact width falls within a defined range. In the following, we aim to determine the contact force $F(t)$ and the deflection of the beam $w(t)$ when the beam is struck with velocity v_o by a mallet of mass m with a spherical head. Assuming the validity of the Hertzian law for elastic bodies, the relative approach $\delta(t)$ is governed by

$$\delta(t) = \kappa F^{2/3}(t), \quad (8)$$

where $F(t)$ represents the contact force between the two bodies and κ is the Hertzian constant [12], which relies on the elastic moduli and contact geometries of the bodies involved. The relative approach is defined as the disparity between the displacement w_s of the striking sphere caused by the force $F(t)$ and the displacement w_o of the beam at the contact point, under the assumption that the sphere has mass M_s .

$$\delta(t) = w_s - w_o \quad (9)$$

Displacement w_s is given by:

$$w_s = v_o t - \frac{1}{M_s} \int_0^t F(\tau)(t - \tau) d\tau \quad (10)$$

and the relative approach according to eq. (9) becomes,

$$\delta(t) = v_o t - \frac{1}{M_s} \int_0^t F(\tau)(t - \tau) d\tau - w_o(t) \quad (11)$$

The response of the beam to the impulsive force $F(t)$ must be analyzed as an expansion in the normal modes based on the beam’s boundary conditions and the location of the impacting force. It is represented [15] as:

$$w_o(t) = \sum_m^\infty a_m g_m(x_o) \int_0^t F(\tau) \sin[\alpha_m(t - \tau)] d\tau \quad (12)$$

The constants a_m and eigenfunctions $g_m(x)$ are derived from the particular problem at hand while α_m denote the eigenvalues of the problem. These values can be found by solving a specific beam vibration problem with particular boundary conditions. In the end, all these elements lead to the

subsequent nonlinear second kind Volterra-type integral equation:

$$\begin{aligned} \kappa F^{2/3}(t) = v_o t - \frac{1}{M_s} \int_0^t F(\tau)(t - \tau)d\tau \\ - \sum_m^\infty a_m g_m(x_o) \int_0^t F(\tau) \sin[\alpha_m(t - \tau)]d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

After examining the literature on musical instruments, as far as the authors are aware, this specific formulation has not been cited or implemented. The resolution of this equation can be accomplished using numerical and approximate analytical approaches. During an iterative process for solving an equation like this, a trial function is typically selected for the force, and the integrals of the previous equation are calculated numerically to update the force value. However, this can sometimes result in inconsistencies at the trailing edges of the force pulse. To address this issue, we will apply the approach described in [15], where the force is assumed to change linearly during each small time increment dt . While the specifics of this technique are not reiterated here, we have applied this method to determine the contact force in scenarios involving a round shape (such as a cylinder or sphere) impacting a beam at a specific location.

When confronted with a non-uniform beam possessing an intricate profile, like the one present in an idiophone musical instrument, a similar strategy can be utilized. In this case, the numerically computed eigenmodes act as replacements for their analytical equivalents. For the case of a spherically shaped mallet striking a beam, eq. (13) becomes

$$\kappa F^{2/3}(t) = v_o t - \frac{1}{M_s} P(t) - \sum_m^\infty a_m g_m(x_o) Q(t) \quad (14)$$

where $P(t) = \int_0^t F(\tau)(t - \tau)d\tau$ and $Q(t) = \int_0^t F(\tau) \sin[\alpha_m(t - \tau)]d\tau$. The last expression relies on the eigenvalues of the problem at hand.

In order to clarify the procedure we consider the problem of a sphere striking at point x_o a simply supported uniform beam (possessing simple eigenfunctions). The equivalent equation to eq. (13) is the following,

$$\begin{aligned} \delta(t) = \kappa F^{2/3}(t) \\ = v_o t - \frac{1}{M_s} \int_0^t F(\tau)(t - \tau)d\tau - \sum_m^\infty \frac{X_m^2(x_o)}{\rho A \omega_m} \frac{\int_0^t F(\tau) \sin[\omega_m(t - \tau)]d\tau}{\int_0^L X_m^2 dx} \end{aligned} \quad (15)$$

where $X_m(x) = \sin(m\pi x/L)$, ρ , A and $\omega_m = \frac{m^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ are the eigenfunctions, the beam material density, the cross section area and the eigenfrequencies respectively.

Characteristic load shapes, estimated with the method mentioned above, are depicted in Fig. 2.1 when an aluminum mallet strikes with three different velocities on an aluminum optimized beam at position $x = 0.202$. Load shapes of this kind were utilized in the subsequent analyses.

3 Beam profile optimization process

Since we are interested in controlling the natural frequencies (e.g., eigenfrequencies) of idiophone bars, in this work we computed the dynamic characteristics of structural components with both the FEM and the boundary element method (BEM), a procedure developed elsewhere [10]. Our objective, through the application of appropriate boundary conditions, was to establish a robust body design that ensures the second and third modal frequencies of these systems exhibit predetermined relationships with their respective first modal frequencies. In this study, the resonator's shape remained unaltered.

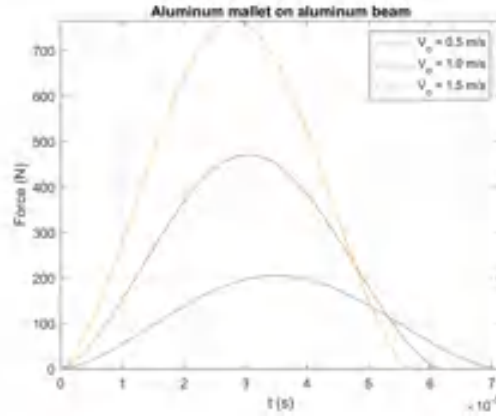


Figure 2.1 *Characteristic load shapes utilized in the subsequent analyses.*

While conducting work in a complete three-dimensional space is feasible and advantageous, we chose to limit our analysis to one-dimensional models for simplicity. It is widely acknowledged that idiophone bars predominantly operate through bending. Therefore, for the purposes of design and simulation, it is generally acceptable to focus on in-plane bending. After discretizing continuous beam profiles and applying the aforementioned methods to optimize eigenfrequencies in the ratios of $(1 : 4 : 9.8)$, the resultant beam was used in the subsequent analyses.

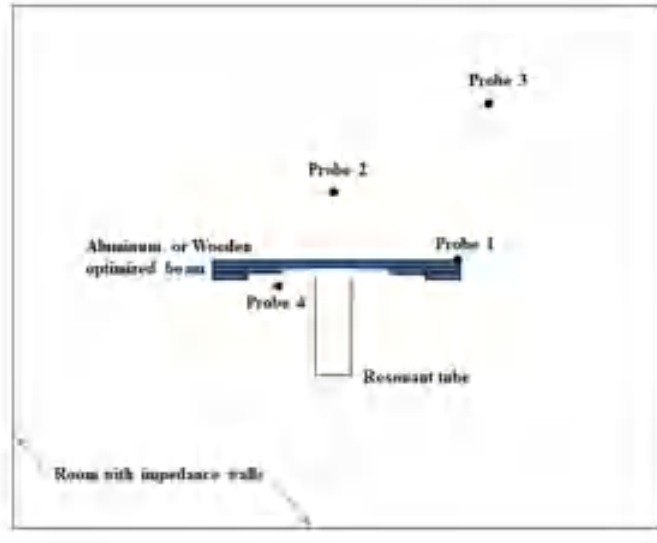


Figure 3.1 *Optimized beam in a confined space with a resonator underneath. Note that the bar, the 2D room and the resonant tube are not drawn to scale.*

4 Numerical experiments in a 2D domain

The optimized beam was positioned within a rectangular domain with dimensions: $L_x = 3\text{ m}$ and $L_y = 3.5\text{ m}$, as shown in Fig. 3.1. The length of the beam was $L = 0.5027\text{ m}$. It consists of 9 segments located at x positions of 0, 0.0521, 0.1022, 0.1517, 0.2018, 0.3009, 0.3510, 0.4005, 0.4506, 0.5027 m while the respective heights of the steps for an aluminum beam are: 0.010, 0.0075, 0.0066, 0.004, 0.0032 m . The initial step height of the wooden beam (adjusted to match the eigenfrequencies of the aluminum beam) is 0.014547 m , with subsequent segment heights maintaining the same ratios as the aluminum beam. The origin of the axes is at the beam's left end, so probes 1, 2, 3, 4 are positioned at (x, y) points of $(L, 0)$, $(L/2, L/4)$, $(L/2 + L_x/4, L_y/3)$, $(0, -0.12\text{ m})$ (Fig. 3.1). The resonant tube of length $L_t = 1.41\text{ m}$ and width $W = 0.15\text{ m}$ lies

beneath the beam with a clearance of 0.03 m . The load application region is slightly off-center between $0.2018 - 0.2020\text{ m}$. The wall impedance at the walls is $0.3 Z_o$, with Z_o representing air's characteristic impedance, and Rayleigh damping is applied to the beam.

Numerous numerical experiments were conducted involving various combinations. Two materials for the beam were used: wood and aluminum. The three materials for the mallet head were: aluminum, rubber, and wood and three mallet head velocity values v_o were used: $(0.5, 1.0, 1.5\text{ m/s})$. Experiments also included scenarios with artificial absorbing conditions at boundaries to simulate the open space problem as well as the introduction of a resonant tube to evaluate its effect. Results reported here include only the cases where the resonant tube is present and there is uniform absorption at the boundary walls with typical impedance values. All experiments involving acoustic-structure interaction were conducted in Comsol Multiphysics. 2-D triangle elements with fourth order (quartic) shape functions were utilized in the acoustic domain. In the beam analysis, 2-D finite elements were employed with distinct shape functions for axial and transversal degrees of freedom. Linear shape functions represented axial displacement, whereas cubic shape functions were used for bending. A typical power spectrum of the signal obtained from probe 1, after a rubber mallet head strikes a wooden beam at a velocity of 1 m/s at 0.2019 m from the beam's edge, is shown in Fig. 4.1.

The results from the numerical experiments conducted in this study, along with the generated sounds, have been appropriately archived in an online open-access repository. This repository can be accessed via the link provided below¹.

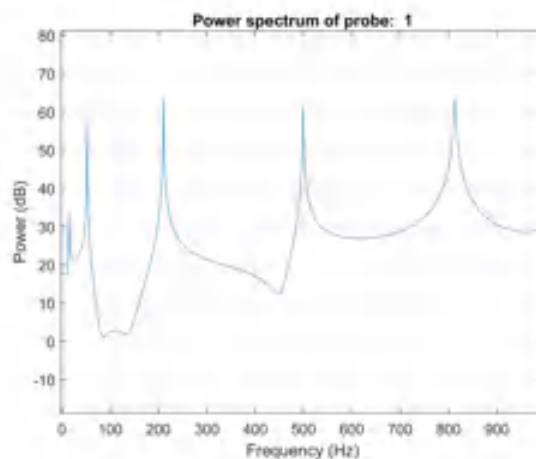


Figure 4.1 *Typical power spectrum of the signal obtained from probe 1, after a rubber mallet head strikes a wooden beam at a velocity of 1 m/s .*

5 Conclusions

In this study, we have successfully conducted time-domain modeling of mallet percussive musical instruments, specifically for aluminum vibraphone and wooden marimba bars, when struck by spherical mallet heads using the finite element method. By modeling the bar as an Euler-Bernoulli beam and optimizing eigenvalues to achieve proper musical ratios, we have obtained a non-uniform bar profile. Considering that musical instruments are often played in enclosed spaces, we further explored the realistic acoustic profile by examining the vibro-acoustic interaction of the bar with the surrounding air. Our analysis of the dynamical problem, particularly during the initial phase of impact, has provided valuable insights. Through the use of virtual sensors placed strategically within the room or open space, we captured the resulting sound from a single bar and explored scenarios involving a 2D tube placed under the bar for sound sustain, a common technique in real musical instruments. The conducted auralizations, recorded at multiple locations within the room and utilizing various combinations of bar and mallet head materials, have

¹<https://gitlab.com/KontosA/helina2024>

contributed to our understanding of the vibro-acoustic problem. While our examination primarily focused on two-dimensional analysis, qualitative assessments of sensor signals through listening tests have yielded satisfactory results. These findings facilitate the transition to three-dimensional implementation and provide opportunities for further research and enhancements in the design and acoustics of mallet percussion instruments, while also paving the way for potential improvements in the excitation aspect of the problem.

6 References

- [1] I. Bork, “Practical tuning of xylophone bars and resonators,” *Applied Acoustics*, vol. 46, pp. 103–127, 1995.
- [2] F. Orduña-Bustamante, “Nonuniform beams with harmonically related overtones for use in percussion instruments,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, pp. 2935–2941, 1991.
- [3] J. Petrolito and K. A. Legge, “Optimal undercuts for the tuning of percussive beams,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 102, pp. 2432–2437, 1997.
- [4] D. Beaton and G. P. Scavone, “Optimization of marimba bar geometry by 3D finite element analysis,” 2019.
- [5] A. Chaigne and V. Doutaut, “Numerical simulations of xylophones. I. time-domain modeling of the vibrating bars,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, pp. 539–557, 1997.
- [6] V. Doutaut, D. Matignon, and A. Chaigne, “Numerical simulations of xylophones. II. time-domain modeling of the resonator and of the radiated sound pressure,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, pp. 1633–1647, 1998.
- [7] L. Henrique and J. Antunes, “Optimal design and physical modelling of mallet percussion instruments,” *Acta Acustica*, vol. 89(6), pp. 948–963, 2003.
- [8] S. Kouzoupis, “Theoretical approach on the use of beams as musical idiophones,” in *Proceedings of the 9th HELINA Conference, (Hellenic Institute of Acoustics)*, University of Patras, 2018.
- [9] X. Παναγιωτόπουλος, Σ. Κουζούπης, Α. Κρυονερίτης και Α. Κόντος-Πανταζής, “Βελτιστοποίηση σχήματος για τον σχεδιασμό ιδιοφώνων και πειραματική διερεύνηση,” in *ΕΛ.ΙΝ.Α, Ακουστική 2022, Θεσσαλονίκη 14-17 Οκτωβρίου*, 2022.
- [10] C. G. Panagiotopoulos and S. Kouzoupis, “Tuning of idiophones using shape optimization on finite and boundary element 1D models,” *Applied Acoustics*, vol. 217, p. 109850, 2024.
- [11] A. Chaigne and V. Doutaut, “Numerical simulations of xylophones. i. time-domain modeling of the vibrating bars,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, no. 1, pp. 539–557, 1997.
- [12] L. Landau and E. Lifchitz, *Théorie de l'élasticité*. Mir, 1967.
- [13] P. Rucz, M. Á. Ulveczki, J. Angster, and A. Miklós, “Simulation of mallet percussion instruments by a coupled modal vibroacoustic finite element model,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 149, no. 5, pp. 3200–3212, 2021.
- [14] L. L. Henrique and J. Antunes, “Optimal design and physical modelling of mallet percussion instruments,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 89, no. 6, pp. 948–963, 2003.
- [15] G. Evans, B. Jones, A. McMillan, and M. Darby, “A new numerical method for the calculation of impact forces,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 24, no. 6, p. 854, 1991.



Συστηματική μελέτη των σφαιρικών κατευθυντικών ιδιοτήτων του λαούτου, της λάφτας και του ουτιού

Ιωάννης Μαλαφής*, Πηνελόπη-Μαρία Πιερρουτσάκου,
Κωνσταντίνος Μπακογιάννης, Αρετή Ανδρεοπούλου
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*ymalafis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη διερευνά τη σφαιρική κατευθυντικότητα και τα μοτίβα ακτινοβολίας του Λαούτου, της Λάφτας και του Ουτιού, παραδοσιακών αχλαδόσχημων νυκτών οργάνων από τη Μέση Ανατολή, την Τουρκία, την Ελλάδα και τις γύρω περιοχές, παρέχοντας πληροφορίες για τις ακουστικές ιδιότητες του ήχου που διαδίδουν σε έναν τρισδιάστατο χώρο. Η ανάλυση αποκάλυψε ότι όλα τα όργανα, ανεξάρτητα από τις παραλλαγές στη γεωμετρία και το υλικό τους, παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα ακτινοβολίας σε όλες τις ζώνες συχνοτήτων, δικαιολογώντας τη διαισθητική ταξινόμησή τους στην "οικογένεια των λαούτων". Παρ' όλα αυτά, είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις στην προβολή του ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις μεταξύ των τύπων οργάνων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε διαφορές στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και στο υλικό των χορδών. Παρατηρείται επίσης η επίδραση του σώματος του μουσικού στην κατευθυντικότητα.

Exploring the Directivity of the Lute, Lavta, and Oud Plucked String Instruments

ABSTRACT

This study investigates the spherical directivity and radiation patterns of the Lute, Lavta, and Oud, pear-shaped traditional plucked-string instruments from the Middle East, Turkey, Greece, and the surrounding areas, providing insights into the acoustic qualities of their propagated sound in a three-dimensional space. Instruments were categorized according to string material. The analysis revealed that all instruments, regardless of their variations in geometry and material, exhibit similar radiation patterns across all frequency bands, justifying their intuitive classification within the "Lute family". Nevertheless, variations in sound projection across all directions are evident between instrument types, which can be attributed to differences in construction details and string material. The impact of the musician's body on directivity is also observed.

Εισαγωγή

Η μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των μουσικών οργάνων αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο επιστημονικό αντικείμενο μελέτης καθώς βρίσκει άμεση εφαρμογή σε διαφόρους κλάδους όπως αυτοί της μουσικής ακουστικής, της ηχητικής μοντελοποίησης, της ακουστικής χώρων, της ηχοληψίας, της εικονικής/επαυξημένης πραγματικότητας κ.α. Ένα από τα χαρακτηριστικά αυτά, η κατευθυντικότητα των ηχητικών πηγών, βρέθηκε στις μέρες μας ξανά στο επίκεντρο με αφορμή τη στροφή της έρευνας και της βιομηχανίας προς περιβάλλοντα και εφαρμογές εικονικής/επαυξημένης πραγματικότητας και αυξημένης της ανάγκης για μαζική παραγωγή και καταγραφή ρεαλιστικού ηχητικού περιεχομένου. Με τον όρο κατευθυντικότητα περιγράφεται η ισχύς με την οποία κάθε ηχητική πηγή εκπέμπει ενέργεια προς όλες τις κατευθύνσεις στον περιβάλλοντα χώρο, [1] η οποία μεταξύ άλλων εξαρτάται από το είδος του μουσικού οργάνου, το σχήμα του, τα υλικά κατασκευής του, τη μέθοδο διέγερσης κλπ. Η διέγερση της ηχητικής πηγής γίνεται είτε μέσω κάποιου μηχανισμού [2], είτε με τη βοήθεια μουσικών [3].

Ωστόσο, ενώ τα ευρωπαϊκά μουσικά όργανα όπως όπως π.χ. η κιθάρα (κλασική, ακουστική) το βιολί, το πιάνο, το φλάουτο, κλπ έχουν μελετηθεί εκτενώς όσον αφορά στο ηχόχρωμα, στα φασματικά χαρακτηριστικά τους και στις κατευθυντικές αποκρίσεις τους, [4, 5, 6, 7], δεν συμβαίνει το ίδιο για μουσικά όργανα άλλων πολιτισμών, όπου οι πληροφορίες είναι πολύ περιορισμένες [8, 9]. Σε μια προσπάθεια να περιοριστεί αυτό το ερευνητικό κενό το Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT) του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του ΕΚΠΑ, έχει ξεκινήσει συστηματική έρευνα με στόχο τη μελέτη και παρουσίαση των ακουστικών χαρακτηριστικών των ελληνικών παραδοσιακών μουσικών οργάνων και της παραδοσιακής και βυζαντινής φωνητικής μουσικής [10, 11].

Ως αποτέλεσμα της εν λόγω έρευνας, η παρούσα εργασία εξετάζει τις κατευθυντικές ιδιότητες νυκτών αχλαδόσχημων παραδοσιακών έγχορδων οργάνων τα οποία απαντώνται στη χώρα μας και στην ευρύτερη λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής, εστιάζοντας στο στεριανό λαούτο, το πολιτικό λαούτο (λάφτα) και το ούτι. Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται για πρώτη φορά με συστηματικό τρόπο η σφαιρική κατευθυντικότητα των οργάνων αυτών συναρτήσει των δύο παραγόντων της: α) της ηχητικής προβολής (sound projection) και β) των μοτίβων εκπομπής (radiation patterns), με στόχο την αποτύπωση των ηχητικών και ηχοχρωματικών ομοιοτήτων και διαφορών τους στον τρισδιάστατο χώρο.

1. Μεθοδολογία

1.1 Συλλογή δεδομένων

Η εν λόγω μελέτη βασίζεται στην ηχογράφηση τεσσάρων (4) στεριανών λαούτων, τεσσάρων (4) πολιτικών λαούτων (λάφτες) και δύο (2) ουτιών, κατασκευασμένα από έγκριτους κατασκευαστές με πολυετή πείρα. Τα όργανα που

χρησιμοποιήθηκαν ποικίλουν σε ποιότητες. Οι βασικές τους διαφοροποιήσεις σχετίζονται με το σχήμα και το μέγεθος του ηχείου, το μήκος του μπράτσου και το είδος των χορδών που χρησιμοποιούν.



Σχήμα 1.1 Λαούτο (αριστερά), Ούτι (κέντρο), Πολίτικο Λαούτο ή Λάφτα (δεξιά)

Οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν από τρεις (3) επαγγελματίες μουσικούς εγνωσμένου κύρους, οι οποίοι έπαιζαν ως εξής: Μουσικός Α' Λαούτα και Λάφτες, Μουσικός Β' Ούτια Λαούτα Ούτια και Λάφτες, Μουσικός Γ' Λαούτα και Λάφτες.

Συνολικά ηχογραφήθηκαν 4 λαούτα από διαφορετικούς κατασκευαστές. Οι μεμονομένες νότες που καταγράφηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές (μεταλλικές) Λα, Ρε, Σολ, Ντο και σε κάθε χορδή οι νότες που παράγονται στο 5ο και 9ο τάστο. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό στο εκάστοτε όργανο.

Ηχογραφήθηκαν 4 λάφτες κατασκευασμένες από διαφορετικούς κατασκευαστές, οι οποίες βρίσκονται σε τονικότητες Σιb, Ντο και Ρε. Οι χορδές είναι clear nylon και wounded, διπλές σε ταυτοφωνία. Οι νότες που ηχογραφήθηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές του οργάνου, καθώς και το διάστημα 5^{ης} καθαρής σε κάθε χορδή. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό στο εκάστοτε όργανο.

Ηχογραφήθηκαν τέλος 2 ούτια. Οι χορδές είναι clear nylon και wounded, διπλές σε ταυτοφωνία και σε οκτάβες. Οι νότες που ηχογραφήθηκαν είναι οι ανοιχτές χορδές του οργάνου, καθώς και το διάστημα 5^{ης} καθαρής σε κάθε χορδή. Κάθε μουσικός εκτέλεσε επίσης και έναν αυτοσχεδιασμό διάρκειας 60'' έως 90'' στο εκάστοτε όργανο.

1.2 Ηχογράφιση και μετα-επεξεργασία δεδομένων

Οι ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ημι-ανηχοϊκό, ειδικά διαμορφωμένο ακουστικά χώρο διαστάσεων 10x7x5 m του εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT) του τμήματος Μουσικών Σπουδών (ΕΚΠΑ). Για την ηχογράφιση χρησιμοποιήθηκε διάταξη 29 πυκνωτικών μικροφώνων RODE-M5, τα οποία τοποθετήθηκαν συμμετρικά σε ημισφαιρικό γεωδαιτικό θόλο.

Δώδεκα (12) μικρόφωνα τοποθετήθηκαν στο οριζόντιο επίπεδο σε ίσες αζιμουθιακές αποστάσεις των 30° και από οκτώ (8) μικρόφωνα στα επίπεδα των +30° και -30° γωνία κλίσης σε ίσες αζιμουθιακές αποστάσεις των 45°. Το 29ο μικρόφωνο τοποθετήθηκε στην κορυφή του θόλου σε γωνία κλίσης 90°, ακριβώς

πάνω από το όργανο. Αναλυτικές πληροφορίες για την διαδικασία της ηχογράφησης και βαθμονόμησης του εξοπλισμού καθώς και για την μεταεπεξεργασία των δεδομένων της ηχογράφησης, περιλαμβάνονται στο ακόλουθο άρθρο [12].



Σχήμα 1.1 Η διάταξη του ημισφαιρικού κλωβού μέσω της οποίας διενεργήθηκαν οι ηχογραφήσεις.

Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στο να αποτυπώσει την κατευθυντικότητα των υπό μελέτη οργάνων σε ρεαλιστικές συνθήκες εκτέλεσης. Για τον λόγο αυτό, αφενός η διέγερση του εκάστοτε οργάνου δεν έγινε από κάποιον μηχανισμό αλλά από μουσικό, αφετέρου οι μουσικοί και τα όργανα δεν ήταν αυστηρά ακινητοποιημένα σε κάποια θέση αλλά τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ευθυγράμμιση της ηχητικής πηγής με τη μικροφωνική διάταξη καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων, επιτρέποντας ωστόσο στον μουσικό να πραγματοποιεί κινήσεις περιορισμένου εύρους, απαραίτητες για το παίξιμο του οργάνου. Επομένως, τα δεδομένα κατευθυντικότητας που συνελέχθησαν αφορούν το σύστημα μουσικό όργανο και οργανοπαίκτη/σώμα μουσικού [14]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ακρίβεια τοποθέτησης του οργάνου εντός της μικροφωνικής διάταξης, έτσι ώστε το σημείο νύξης της χορδής, το οποίο στα έγχορδα θεωρείται ως το ακουστικό κέντρο του οργάνου να βρίσκεται πάντα στο κέντρο της σφαίρας, σε ίσες αποστάσεις από τα μικρόφωνα. Αυτό επιτεύχθηκε με τη χρήση ακτίνων λέιζερ που στόχευαν στο κέντρο της ημισφαιρικής διάταξης, ενώ παρατηρητές εξασφάλιζαν ότι το όργανο παρέμενε ευθυγραμμισμένο καθ' όλη τη διάρκεια της ηχογράφησης. Αν υπήρχε οποιαδήποτε απόκλιση, η ηχογράφηση επαναλαμβανόταν. Επίσης, όσον αφορά στην κατεύθυνση του συστήματος μουσικό όργανο - οργανοπαίκτης δόθηκε η οδηγία στους μουσικούς να παίζουν με κατεύθυνση προς τα μπροστά (προς έναν θεωρητικό ακροατή που βρίσκεται στη θέση του μικροφώνου με συντεταγμένες 0° , 0° (αζιμούθια γωνία, γωνία κλίσης) κρατώντας το όργανο με φυσικό τρόπο.

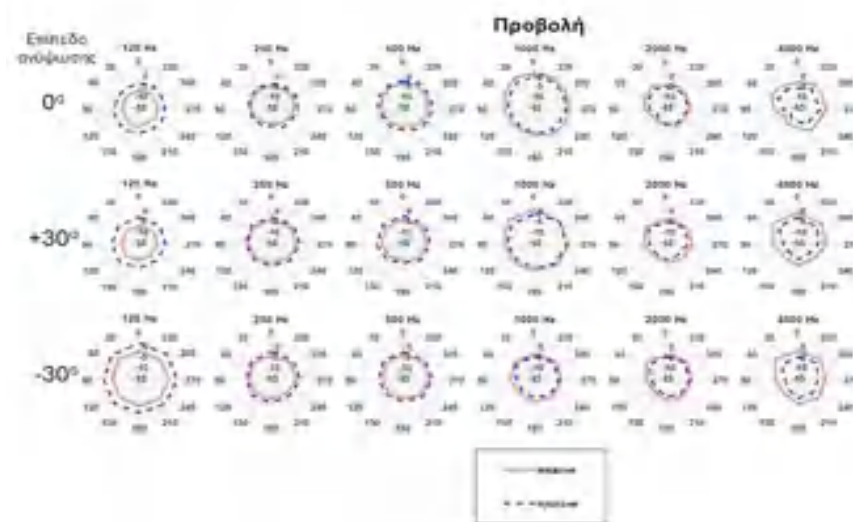
2. Αποτελέσματα

Η μελέτη της κατευθυντικότητας ηχητικών πηγών αφορά δύο συνιστώσες: α) την ηχητική προβολή (sound projection), δηλαδή το μέγεθος της ηχητικής ενέργειας σε κάθε γωνία καταγραφής ανά συχνотική ζώνη και β) το μοτίβο εκπομπής (radiation pattern), δηλαδή τη σχέση της εκπεμπόμενης ηχητικής ενέργειας μεταξύ γωνιών καταγραφής ανά συχνотική ζώνη. Δύο ηχητικές πηγές μπορεί να έχουν όμοια μοτίβα εκπομπής αλλά να διαφέρουν σημαντικά ως προς την ηχητική τους προβολή, έχοντας επομένως διαφορετικά μοτίβα κατευθυντικότητας. Συχνά ωστόσο, αναλόγως της ανάλυσης και των επιλογών κανονικοποίησης των δεδομένων η μελέτες κατευθυντικότητας επικεντρώνονται στη μία εκ των δύο συνιστωσών μη αναδिकνύοντας πλήρως τις κατευθυντικές ιδιότητες των υπό μελέτη πηγών [13].

Σε μια προσπάθεια παρουσίασης μιας ολοκληρωμένης μελέτης της κατευθυντικότητας των μουσικών οργάνων, η παρούσα μελέτη εστιάζει χωριστά σε κάθε μια από τις δύο συνιστώσες (ηχητική προβολή και μοτίβο εκπομπής). Για τον υπολογισμό των διαγραμμάτων ηχητικής προβολής τα δεδομένα βαθμονομήθηκαν με τον τρόπο που περιεγράφηκε στην Ενότητα 1 (Μεθοδολογία). Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα από τα 29 μικρόφωνα υπολογίστηκαν κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης (scaling factors) ώστε να προκύπτει σε όλα τα μικρόφωνα κοινή rms συνολική ενέργεια σε σήμα ροζ θορύβου εκπεμπόμενο από παντοκατευθυντική πηγή στο κέντρο της μικροφωνικής διάταξης. Για τον υπολογισμό των μοτίβων εκπομπής των οργάνων προστέθηκε ένα ακόμα βήμα στην επεξεργασία των ηχητικών δεδομένων, τα οποία κανονικοποιήθηκαν σε σχέση με την rms κάθε συχνотικής ζώνης του μικροφώνου που βρίσκεται στις 90° ακριβώς πάνω από το όργανο. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η καθαρότερη οπτικοποίηση των δεδομένων διατηρώντας ταυτόχρονα πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της ενέργειας ανά γωνία καταγραφής και συχνотική ζώνη. Η παράθεση των αποτελεσμάτων γίνεται σε πολικά διαγράμματα οκταβικών ζωνών με συχνотικά κέντρα από τα 125 Hz έως τα 4 kHz.

2.1 Σφαιρική κατευθυντικότητα - η περίπτωση της προβολής

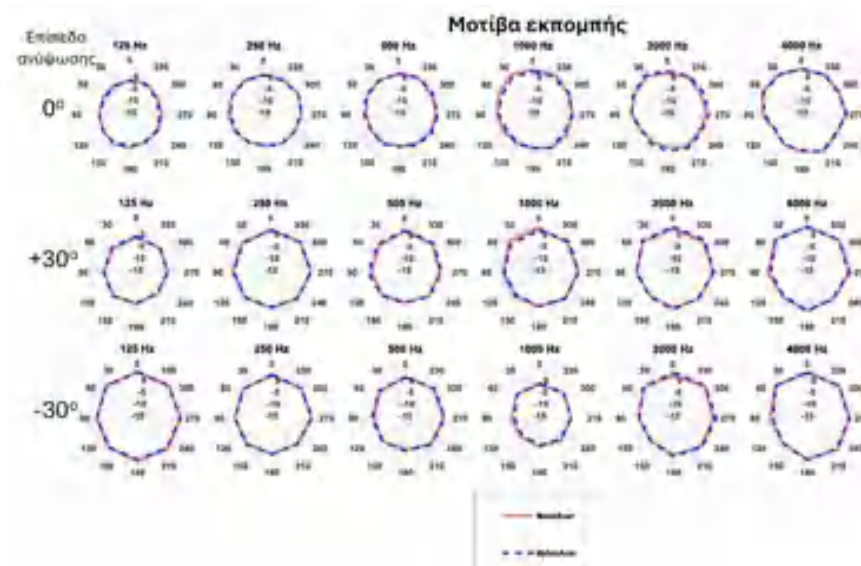
Στο σχήμα 2.1. απεικονίζεται σε πολικά διαγράμματα η προβολή του ήχου που εκπέμπεται από τα μουσικά όργανα, με μπλε γι' αυτά με μεταλλικές χορδές και κόκκινο με νάιλον χορδές. Παρατηρούμε ότι και στις δύο κατηγορίες οργάνων η ενέργεια αυξάνεται μέχρι την οκταβική ζώνη με συχνотικό κέντρο το 1 kHz, οπότε μεγιστοποιείται και ελαττώνεται εκ νέου. Επίσης, παρατηρούμε ότι μέχρι και την οκταβική ζώνη με κεντρική συχνότητα τα 500 Hz τα όργανα με νάιλον χορδές παρουσιάζουν πιο ευρεία προβολή σε σχέση με αυτά με μεταλλικές χορδές, το οποίο αντιστρέφεται σταδιακά από την οκταβική ζώνη του 1 kHz.



Σχήμα 2.1. Πολικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μέση προβολή των οργάνων με μεταλλικές και νάιλον χορδές (μπλε και κόκκινα αντίστοιχα) ανά οκταβική ζώνη στα τρία επίπεδα ανύψωσης.

2.2. Σφαιρική κατευθυντικότητα - η περίπτωση των μοτίβων εκπομπής

Στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται τα μέσα μοτίβα εκπομπής των ήχων που εκπέμπονται από όργανα με μεταλλική και νάιλον χορδή (κόκκινα και μπλε πολικά διαγράμματα αντίστοιχα). Παρατηρούμε ότι οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν πανομοιότυπα μοτίβα εκπομπής. Επίσης, η ενέργεια μεταδίδεται περισσότερο προς τα μπροστά σε σχέση με πίσω (διαφορά 2 έως 4 dB στις 0° σε σχέση με τις 180° αζιμούθιας γωνίας) με εξαίρεση την οκταβική ζώνη των 125 Hz, η οποία ως η πιο χαμηλή παρουσιάζει περισσότερο παντοκατευθυντική συμπεριφορά, όπως αναμενόταν. Τα πολικά διαγράμματα είναι στην πλειονηφία τους συμμετρικά δεξιά - αριστερά, με εξαίρεση τις συχνοτικές ζώνες των 2 kHz και 4 kHz, στις οποίες η πίσω αριστερά πλευρά παρουσιάζει μικρότερη ενέργεια σε σχέση με την πίσω δεξιά πλευρά γεγονός το οποίο αιτιολογείται από το σώμα του (δεξιόχειρα) μουσικού [14].



Σχήμα 2.2. Πολικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τα μέσα μοτίβα εκπομπής των οργάνων με μεταλλικές και νάιλον χορδές (μπλε και κόκκινα αντίστοιχα) ανά οκταβική ζώνη στα τρία επίπεδα ανύψωσης.

3. Επίλογος - Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συνδράμει στην ευρύτερη μελέτη της ελληνικής παραδοσιακής μουσικής, ειδικότερα δε στη μελέτη των συγκεκριμένων οργάνων και να δώσει κάποια πρώτα στοιχεία για το αχαρτογράφητο πεδίο της σφαιρικής κατευθυντικότητάς τους. Σκοπός της είναι να αποτυπωθεί το μοτίβο εκπομπής κάθε οργάνου καθώς και να προσδιοριστούν οι ομοιότητες και οι διαφορές ανάμεσα σε όργανα της ίδιας οικογένειας από διαφορετικούς κατασκευαστές αλλά και σε ομάδες οργάνων με κοινά χαρακτηριστικά π.χ. όργανα με μεταλλικές χορδές – όργανα με nylon.

Η ανάλυση της ηχητικής προβολής αποκάλυψε ότι τόσο οι νάιλον όσο και οι μεταλλικές χορδές παρουσιάζουν συχνοτικές τάσεις, με σταθερότητα στις χαμηλότερες συχνότητες, μια κορυφή στο 1 kHz και μια μείωση πέρα από αυτό το σημείο. Τα όργανα με χορδές νάιλον παρουσιάζουν ευρύτερη ηχητική προβολή στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ οι μεταλλικές χορδές υπερέχουν στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτές οι διαφορές αποδίδονται σε διαφορές στην κατασκευή του οργάνου, όπως το πάχος του καπακιού, το κούρδισμα των χορδών και ο χρόνος απελευθέρωσης του ήχου.

Τα μέσα διαγράμματα ακτινοβολίας για όργανα με νάιλον και μεταλλικές χορδές παρουσιάζουν παρόμοια σχήματα, υποδεικνύοντας συγκρίσιμα διαγράμματα ακτινοβολίας. Η μετάδοση ενέργειας είναι υψηλότερη στο μπροστινό μέρος από ό,τι στο πίσω μέρος, εκτός από τα 125 Hz, τα οποία είναι σχεδόν πανταχού παρόντα. Αυτή η προβολή με επίκεντρο το μπροστινό μέρος

αποδίδεται στον προσανατολισμό του οργάνου και στην απορρόφηση του ήχου από το σώμα του μουσικού. Η συμμετρία αριστερά-δεξιά γενικά απουσιάζει, ιδιαίτερα στο μπροστινό-αριστερό μέρος σε σύγκριση με το μπροστινό-δεξί μέρος, πιθανότατα λόγω κατασκευαστικών λεπτομερειών και της επιρροής του δεξιού χεριού. Ασυμμετρία παρατηρείται επίσης στο πίσω μέρος, όπου η πίσω αριστερή πλευρά έχει χαμηλότερες τιμές, ενδεχομένως λόγω της ακουστικής σκιάς που δημιουργείται από το σώμα του μουσικού.

Εκτιμούμε, ότι εκτός από το εγγενές επιστημονικό ενδιαφέρον μιας τέτοιας πρωτότυπης μελέτης, μπορούν να προκύψουν αξιόλογα συμπεράσματα με πρακτικές απολήξεις. Για παράδειγμα, η μελέτη αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη εργαλείων ηχογράφησης των εν λόγω οργάνων, την επιστημονική τεκμηρίωση στην τοποθέτησή τους σε ευρύτερα μουσικά σχήματα καθώς και την σωστή τοποθέτησή τους σε περιβάλλον studio ηχογράφησης βάση του μοτίβου εκπομπής τους. Επίσης, μπορεί να συνδράμει στη δημιουργία ψηφιακών βάσεων δεδομένων κατευθυντικότητας για χρήση σε ψηφιακά περιβάλλοντα ακουστικών προσομοιώσεων εκτεταμένης πραγματικότητας (XR).

4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό Έργο με τίτλο «Συναισθηματική Τεχνητή Νοημοσύνη στη Μουσική Έκφραση» υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση της Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 015111).



5. Αναφορές

- [1] Meyer, J., “Directional Characteristics,” *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*, pp. 129–177, 2009, doi:10.1007/978-0-387-09517-2_4.
- [2] Grothe, T. and Kob, M., “High resolution 3D radiation measurements on the bassoon,” in *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*, Detmold, Germany, pp. 139–145, 2019.
- [3] Pätynen, J. and Lokki, T., “Directivities of symphony orchestra instruments,” *Acta Acustica united with Acustica*, 96(1), pp. 138–167, 2010, doi:https://doi.org/10.3813/AAA.918265.
- [4] French, R. M., *Technology of the Guitar*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] Bissinger, G., “Structural acoustics of good and bad violins,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(3), pp. 1764–1773, 2008.
- [6] Chaigne, A., Cotté, B., and Viggiano, R., “Dynamical properties of piano soundboards,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), pp. 2456–2466, 2013.

- [7] Ackermann, D., Brinkmann, F., and Weinzierl, S., "A database with directivities of musical instruments," *Journal of the Audio Engineering Society*, 72, pp. 170–179, 2024.
- [8] Yang, W., Kwak, K.-h., and Seo, C.-k., "Subjective acoustic survey of Korean traditional wind instruments, piri and daegeum, in a concert hall using auralisation techniques," *Applied Acoustics*, 185, p. 108421, 2022.
- [9] Özgencil, Y. and Yüçgürük Akdağ, N., "An important parameter in concert hall design: Determination of directivity for instruments." *Megaron*, 17(4), 2022.
- [10] Bakogiannis Konstantinos and Dedousis Giorgos and Malafis Yannis and Andreopoulou, Areti "On the spherical directivity and formant analysis of the singing voice; a case study of professional singers in Greek Classical and Byzantine music," in *153rd Audio Engineering Society Convention*, pp. 1–12, 2022.
- [11] Dedousis, G., Bakogiannis, K., Andreopoulou, A., and Georgaki, A., "Examining the directivity characteristics of Greek sung vowels on formant frequencies," in *Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications: 13th International Workshop*, September, 12-13, 2023, p. 79, Firenze University Press, 2023.
- [12] Malafis Yannis et.al. *AES 157th Convention*, October 2024
- [13] Katz, Brian and d'Alessandro, Christophe, "Directivity measurements of the singing voice," in *International Congress on Acoustics (ICA 2007)*, pp. 1–6, 2007.
- [14] Bellows, S. D. and Leishman, T. W., "Modeling musician diffraction and absorption for artificially excited clarinet directivity measurements," in *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 46, AIP Publishing, 2022.



Αναγνώριση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και εξαγωγή μουσικής πληροφορίας από ηχογραφήσεις μπεντίρ.

Νικόλαος Βρύζας^{1,*}, Βασίλειος Μπουντουράκης², Αντώνης Παγώνης³

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

²Πανεπιστήμιο Aalto

³Pagonis Percussions

*nvryzas@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μπεντίρ είναι ένα παραδοσιακό μεμβρανόφωνο κρουστό όργανο, η κατασκευή και η τεχνική του οποίου βασίζεται στην προφορική παράδοση. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στη διερεύνηση εργαλείων, αρχιτεκτονικών και μοντέλων για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή πληροφορίας σχετικά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τη μουσική εκτέλεση μέσα από καταγραφές μπεντίρ. Χρησιμοποιείται ένα σύνολο ηχογραφήσεων από μπεντίρ διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και υλικών κατασκευής, παηγμένων με διαφορετικές τεχνικές και είδη χτυπημάτων. Αξιολογούνται μοντέλα αναγνώρισης των διαφορετικών μουσικών φθόγγων και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών, ενώ προτείνεται ένα σύστημα αυτόματης μουσικής μεταγραφής ηχογραφήσεων και η χρήση του συνόλου δεδομένων ως μια βιβλιοθήκη ήχων για τον προγραμματισμό εικονικού μουσικού οργάνου.

Construction attributes recognition and music information retrieval from frame drum recordings

ABSTRACT

The frame drum (bendir) is a traditional membrane percussion instrument, the construction and technique of which is based on oral tradition. This work aims to investigate tools, architectures and models for the automated extraction of information about the construction attributes and the musical performance through bendir recordings. A set of recordings of frame drums of different geometries and construction materials, played with different techniques and types of strikes, is used. Models for the recognition of different musical tones and construction attributes are evaluated, while a system for automatic music transcription of recordings and the use of the dataset as a sound library for programming virtual musical instruments are proposed.

1. Εισαγωγή

Το μπεντίρ είναι ένα παραδοσιακό μουσικό όργανο που συναντάται στη μουσική παράδοση πολλών περιοχών της Μεσογείου, Ανατολικής Ευρώπης και Ασίας. Πρόκειται για ένα κυκλικό μεμβρανόφωνο κρουστό. Αποτελείται από ένα κυκλικό στεφάνι, κατά κανόνα φτιαγμένο από ξύλο, και μία δερμάτινη (ή συνθετική σε πιο πρόσφατες προσεγγίσεις) μεμβράνη. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μπεντίρ μπορεί να απέχουν ως προς τις διαστάσεις (διάμετρο και βάθος του στεφανιού), την επιλογή είδους ξύλου, και το είδος του δέρματος. Οι τεχνικές της κατασκευής του στηρίζονται σχεδόν κατ'αποκλειστικότητα στην προφορική παράδοση.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε μία προσπάθεια αφενός συστηματοποίησης της διαδικασίας κατασκευής του μπεντίρ με τη χρήση νέων τεχνολογικών προσεγγίσεων, αφετέρου την αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης για την αυτοματοποίηση της εξαγωγής μουσικής πληροφορίας από ηχογραφήσεις μουσικών εκτελέσεων σε μπεντίρ. Το κίνητρο είναι η σύνδεση της λαϊκής παράδοσης με τις νέες τεχνολογικές δυνατότητες, η διερεύνηση των παραδοσιακών αντιλήψεων σχετικά με τις τεχνικές κατασκευής του οργάνου και η επέκταση των δυνατοτήτων του για τις ανάγκες ενός σύγχρονου μουσικού.

Η τυπική διαδικασία ακουστικής μελέτης μουσικών οργάνων περιλαμβάνει παράλληλα με τις ακουστικές μετρήσεις την υποκειμενική αξιολόγηση μέσω της αντιληπτικής ικανότητας χρηστών [1]. Σε αυτή την περίπτωση είναι κομβική η θέσπιση μιας κοινής γλώσσας με περιγραφείς που μπορούν να είναι μετρήσιμοι από τους μηχανικούς ήχου και αντιληπτοί από τους μουσικούς ή τους ακροατές [2]. Κοινά ακουστικά χαρακτηριστικά μπορούν να παρουσιάζονται με διαφορετική ορολογία στα πειράματα ακρόασης [3]. Τα πειράματα ακρόασης είναι πολύ σημαντικά γιατί σε πολλές περιπτώσεις φαίνεται η αδυναμία ειδικών του πεδίου να αντιληφθούν μεταβολές σε εύκολα μετρήσιμα μεγέθη, όπως στις θεμελιώδεις συχνότητες κρουστών οργάνων [4].

Το πεδίο της εξαγωγής μουσικής πληροφορίας από μουσικές ηχογραφήσεις, αφορά την αυτόματη δημιουργία παρτιτούρας από μουσικές εκτελέσεις. Στην περίπτωση των κρουστών οργάνων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει, εκτός από τη χρονική εύρεση των ηχητικών συμβάντων κρούσης (onsets) [5], η αναγνώριση του συγκεκριμένου κρουστού οργάνου σε κάθε χτύπημα (Automatic Drum Transcription - ADT) [5]-[8]. Σε ένα τυπικό σετ τυμπάνων (drum set), υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός διαφορετικών κρουστών που πρέπει να αναγνωριστούν, τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις σε ένα μοντέλο ταξινόμησης μηχανικής μάθησης [6], [7]. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι χρήσιμο να υπάρχουν ευρύτερα συστήματα ταξινόμησης που να επιτρέπουν την αναγνώριση ενός εκτεταμένου σετ κρουστών. Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια τυπική επιλογή για την αναγνώριση κρουστών [5]-[8]. Στην περίπτωση του μπεντίρ, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, το σχήμα ταξινόμησης δεν αφορά έναν αριθμό από διακριτά μουσικά όργανα, αλλά διαφορετικές τεχνικές παιξίματος του ίδιου του οργάνου.

Η εργασία δομείται ως εξής: Στην ενότητα 2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του οργάνου και της τεχνικής του που είναι υπό διερεύνηση, καθώς και το σύνολο δεδομένων που έχει δημιουργηθεί για την ανάλυσή τους. Στην ενότητα 3 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες εφαρμογές και τα εργαλεία, καθώς και

η αξιολόγησή τους. Στην ενότητα 4 συνοψίζονται τα συμπεράσματα και παρατίθενται οι μελλοντικές ερευνητικές επεκτάσεις

2. Βασικές χαρακτηριστικές παράμετροι σε μία καταγραφή μπεντίρ

Κατά την ανάλυση του προβλήματος, αναγνωρίστηκαν δύο βασικοί άξονες που καθορίζουν την ακουστική συμπεριφορά σε μία καταγραφή μπεντίρ. Το πρώτο αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οργάνου και το δεύτερο τον τρόπο παιξίματος και τις διαφορετικές τεχνικές.



Σχήμα 2.1 Δύο μπεντίρ με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

2.1 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και παράμετροι

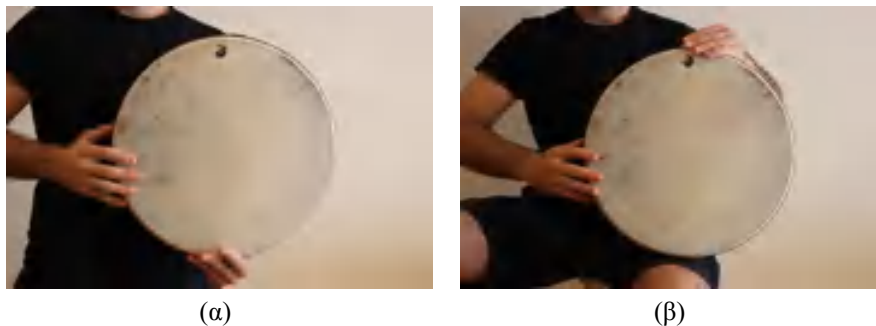
Καθώς η κατασκευή του μπεντίρ βασίζεται στην προφορική παράδοση και αποτελεί στοιχείο πολιτιστικής κληρονομιάς μεταξύ διαφορετικών λαών και περιοχών, δεν υπάρχει κάποια αυστηρά καθορισμένη παραδοχή για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οργάνου. Στην πιο απλή εκδοχή του, πρόκειται για ένα ξύλινο στεφάνι στο οποίο είναι στερεωμένη μία δερμάτινη μεμβράνη. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι πιθανό το στεφάνι να έχει υποδοχές στις οποίες τοποθετούνται μικρά μεταλλικά κύμβαλα, οι ζίλιες. Οι τρόποι πρόσδεσης της μεμβράνης στο στεφάνι μπορούν να διαφέρουν και επηρεάζουν τον τρόπο κουρδίσματος του οργάνου σε συγκεκριμένη τονικότητα.

Στην απλή περίπτωση του μπεντίρ με μεμβράνη, χωρίς ζίλιες, τα βασικά χαρακτηριστικά που μπορούν να παραμετροποιηθούν αφορούν τη γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής. Ως προς τη γεωμετρία, μπορούμε να έχουμε όργανα με διαφορετική διάμετρο της μεμβράνης και βάθος του στεφανιού. Τα υλικά αφορούν τα ξύλα που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του στεφανιού και το δέρμα της μεμβράνης. Σε πολλά σύγχρονα όργανα, μπορεί να επιλεγόνται και συνθετικά

υλικά. Οι έμπειροι οργανοπαίχτες έχουν προτιμήσεις αξιολογούν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς την εργονομία, το οπτικό, αλλά και το ακουστικό αποτέλεσμα.

2.2 Τεχνικές παιξίματος

Μία παράμετρος που διαφοροποιεί τον ήχο του μπεντίρ είναι η θέση και το αντίστοιχο κράτημα του οργάνου. Στην όρθια θέση, το όργανο κρατιέται από τη λαβή σε ελεύθερη θέση με το ένα χέρι, ενώ το άλλο χρησιμοποιείται για τα χτυπήματα. Στην καθιστή θέση, το όργανο εφάπτεται στο σώμα του/της οργανοπαίκτη/τριας, πράγμα που επηρεάζει και την ακουστική του απόκριση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Κράτημα του μπεντίρ σε (α) όρθια και (β) καθιστή θέση

Το βασικό λεξιλόγιο του οργάνου αποτελείται από τρία χαρακτηριστικά χτυπήματα, τα οποία έχουν διακριτό ήχο και χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μουσικών μοτίβων, το ντουμ, το τεκ και το σλαπ. Το χτύπημα τεκ είναι μία κρούση κοντά στο στεφάνι του οργάνου, ενώ το χτύπημα ντουμ είναι μια κρούση ενδιάμεσα στο στεφάνι και το κέντρο της μεμβράνης. Στο χτύπημα σλαπ, όλη η επιφάνεια της παλάμης χτυπάει τη μεμβράνη και παραμένει σε επαφή με τη μεμβράνη μετά το χτύπημα. Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται τα τρία χαρακτηριστικά χτυπήματα.



Σχήμα 2.3 Χτυπήματα (α) ντουμ (β) τεκ (γ) σλαπ

2.3 Σύνολο δεδομένων καταγραφών δειγμάτων

Για τις ανάγκες της έρευνας σχετικά με την εξαγωγή πληροφορίας για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τη μουσική εκτέλεση, δημιουργήθηκε ένα

σύνολο δεδομένων με πολλαπλές ετικέτες, που μπορεί να αξιοποιηθεί σε διαφορετικά προβλήματα. Στην πρώτη έκδοση του συνόλου, ηχογραφήθηκαν έξι μπεντίρ διαφορετικών χαρακτηριστικών. Τα μπεντίρ ηχογραφήθηκαν στο στούντιο οπτικοακουστικής παραγωγής του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών ΜΜΕ του Τμήματος Δημοσιογραφίας του ΑΠΘ χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα δύο μικρόφωνα, ένα δυναμικό μικρόφωνο Shure SM57 και ένα πυκνωτικό Rode NT1000. Κάθε μπεντίρ ηχογραφήθηκε και στις δύο θέσεις παιξίματος με περίπου 50 δείγματα για κάθε είδος χτυπήματος. Στη συνέχεια η βάση εμπλουτίστηκε με επιπλέον ηχογραφήσεις σε διαφορετικούς χώρους και με διαφορετικές συσκευές ηχογράφησης. Έτσι δημιουργήθηκε μία βάση ~15000 δειγμάτων πολλαπλών ετικετών, επισημειωμένα ως προς α) τη διάμετρο β) το βάθος γ) το ξύλο του στεφανιού δ) τη θέση παιξίματος (όρθια ή καθιστή), ε) το χτύπημα (ντουμ, τεκ, σλαπ) και, στ) το μικρόφωνο καταγραφής.

3. Τεχνικές και εφαρμογές εξαγωγής πληροφορίας από τις καταγραφές

3.1 Αναγνώριση κατασκευαστικών χαρακτηριστικών

Το σύνολο δεδομένων που δημιουργήθηκε αξιοποιήθηκε για τη διεξαγωγή πειράματος ακρόασης MUSHRA [9]. Εννιά εθελοντές με ειδικευση είτε στη μουσική είτε στην Ηλεκτροακουστική απάντησαν ένα σετ ερωτήσεων σε σχέση με την αναγνώριση τριών βασικών χαρακτηριστικών που συνηθίζονται στη βιβλιογραφία στα πειράματα υποκειμενικής αξιολόγησης (brightness, reverberance, harmonicity). Η μόνη παράμετρος που εμφάνισε στατιστικά σημαντική επίδραση στην κατανομή των απαντήσεων είναι η διάμετρος [9].

3.2 Μεταγραφή μουσικής πληροφορίας και εικονικά μουσικά όργανα

Η δεύτερη εφαρμογή που προτείνεται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας αφορά τη μεταγραφή της μουσικής πληροφορίας από καταγραφές μουσικών εκτελέσεων. Στην πράξη μας ενδιαφέρει:

- Ο χρονικός εντοπισμός των ηχητικών συμβάντων - χτυπημάτων (onset detection)
- Για κάθε χτύπημα, η αναγνώριση του είδους χτυπήματος (ντουμ, τεκ, σλαπ)
- Η αναγνώριση της θέσης παιξίματος (όρθια καθιστή). Αυτό πραγματοποιείται για κάθε χτύπημα αλλά αναμένεται να είναι το ίδιο για το σύνολο των χτυπημάτων (χρονική ολοκλήρωση).
- Η αναγνώριση του κουρδίσματος (pitch) του οργάνου. Όμοια, πραγματοποιείται για κάθε χτύπημα αλλά αναμένεται να είναι το ίδιο για το σύνολο των χτυπημάτων (χρονική ολοκλήρωση).

Για την αναγνώριση των χτυπημάτων και της θέσης παιξίματος έχουν εκπαιδευτεί δύο μοντέλα διδιάστατων Συνελκτικών Νευρωνικών Δικτύων που δέχονται ως είσοδο τα φασματογραφήματα κλίμακας Μελ 56 ζωνών για κάθε χτύπημα. Η ακρίβεια αναγνώρισης είναι της τάξης 94.5% για την αναγνώριση χτυπήματος και 89.2% για την αναγνώριση θέσης [10]. Για την περίπτωση θέσης, προτείνεται η χρονική ολοκλήρωση για το σύνολο της καταγραφής.

Η εξαγωγή της παραπάνω πληροφορίας επιτρέπει δύο βασικές εφαρμογές:

1. Αυτόματη εξαγωγή μουσικής παρτιτούρας από καταγραφή
Μπορεί να καταγραφούν τα χτυπήματα και οι χρόνοι εντοπισμού για τη μεταγραφή της μουσικής εκτέλεσης σε μουσική σημειογραφία

2. Χρήση των δειγμάτων της βάσης ως εικονικό όργανο
Ουσιαστικά ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα οποιοδήποτε μπεντίρ ως αισθητήρα εισόδου και έπειτα να επιλέξει από τη βάση την αναπαραγωγή της μουσικής εκτέλεσης με δείγματα από όργανα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (γεωμετρικών, υλικών). Ένα επιπλέον όφελος είναι ότι μπορεί έτσι σε έναν οποιοδήποτε χώρο, με όργανο οποιασδήποτε ποιότητας κατασκευής και οποιοδήποτε μικρόφωνο να δημιουργήσει ένα τελικό αρχείο ήχου με ηχογραφήσεις σε στουντιακές συνθήκες, καλής ακουστικής χώρου και χρήσης επαγγελματικού εξοπλισμού, με όργανα επαγγελματικών προδιαγραφών.

4. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία για την αναγνώριση της επίδρασης διαφορετικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών στην ακουστική συμπεριφορά του παραδοσιακού μεμβρανόφωνου κρουστού οργάνου μπεντίρ, καθώς και μοντέλα αναγνώρισης των διαφορετικών χτυπημάτων της μουσικής εκτέλεσης. Προτείνεται ένα σύστημα για τη μεταγραφή της μουσικής πληροφορίας καταγραφών μπεντίρ, καθώς και τη χρήση του ως είσοδο για τη σύνθεση μουσικής με χρήση εικονικού μουσικού οργάνου.

Στις μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις βρίσκεται η δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος που απευθύνεται σε κατασκευαστές και έχει ως σκοπό την υποστήριξη του σταδίου του ελέγχου ποιότητας, και ενός περιβάλλοντος για μουσικούς που να μπορούν να αξιοποιήσουν τις προτεινόμενες δυνατότητες. Απαιτείται ένα στάδιο διερεύνησης της αξιοπιστίας αναγνώρισης σε καταγραφές πραγματικού κόσμου σε διαφορετικές συνθήκες. Για την ευρωστία του συστήματος σχεδιάζεται η διεύρυνση της βάσης με ηχογραφήσεις σε διαφορετικές συνθήκες, αλλά και μέσω συνθετικής επαύξησης των υπαρχόντων δεδομένων.

5. Αναφορές

- [1] Fritz, C. and Dubois, D., “Perceptual evaluation of musical instruments: State of the art and methodology,” *Acta Acustica united with Acustica*, **101**(2), pp. 369–381, (2015)
- [2] Fritz, C., Blackwell, A. F., Cross, I., Woodhouse, J., and Moore, B. C., “Exploring violin sound quality: Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, **131**(1), pp. 783–794 (2012)
- [3] Brent, W., *Physical and perceptual aspects of percussive timbre*, University of California, San Diego (2010)
- [4] Toulson, R. and Hardin, M., “Evaluating the accuracy of musicians and sound engineers in performing a common drum tuning exercise,” in *Audio Engineering Society Convention 149*, Audio Engineering Society (2020)

- [5] Wu, C. W., Dittmar, C., Southall, C., Vogl, R., Widmer, G., Hockman, J., ... & Lerch, A. "A review of automatic drum transcription." *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, **26(9)**, 1457-1483 (2018)
- [6] Vogl, R., Widmer, G., & Knees, P. "Towards multi-instrument drum transcription." *arXiv preprint arXiv:1806.06676*. (2018)
- [7] Cartwright, M., & Bello, J. P. "Increasing drum transcription vocabulary using data synthesis." In *Proc. International Conference on Digital Audio Effects (DAFx)* (pp. 72-79) (2018, September)
- [8] Blaszkę, M., & Kostek, B. "Musical instrument identification using deep learning approach." *Sensors*, **22(8)**, 3033 (2022)
- [9] Vryzas, N., Bountourakis, V., & Pagonis, A. "Towards a systematic approach to the design of the traditional bendir drum." In *Audio Engineering Society Convention 154*. Audio Engineering Society (2023)
- [10] Vryzas, N., Bountourakis, V., & Pagonis, A. "From live frame drum performance to music notation: a data-driven approach." In *Audio Engineering Society Convention 156*. Audio Engineering Society (2024)



Μορφές και λειτουργίες στους αθηναϊκούς θεατρικούς χώρους της σύγχρονης εποχής

Νίκος Μπάρκας*, Ιρίς Καλογεράκη, Λυδία Παπαγεωργίου, Ελένη Ραυτοπούλου,
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
*nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας διαχρονικής έρευνας (από το 2018) του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ και αφορά τη μορφή και τη λειτουργία των θεατρικών χώρων στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών.

Η έρευνα περιλαμβάνει στοιχεία από ένα δείγμα περίπου 40 θεατρικών χώρων, με συνολικά 16 παραμέτρους, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η θεατρική μορφή, πιθανές ανακαινίσεις ή παρεμβάσεις με αλλαγή χρήσης στο κτίριο, η χωρητικότητα, η προσβασιμότητα, οι ηχομονωτικές ενισχύσεις και η ακουστική διόρθωση.

Όπως φαίνεται, η πλειονότητα των ενεργών θεατρικών χώρων έχει μικρό μέγεθος και βρίσκονται στο κέντρο ή σε περιφερειακές γειτονιές της Αθήνας, ωστόσο όσον αφορά τις υποδομές και τις πρωτοποριακές διατάξεις, το πρόβλημα των αθηναϊκών θεάτρων είναι μάλλον ποιοτικό κι όχι ποσοτικό.

Forms and functions in the contemporary Athenian theaters

ABSTRACT

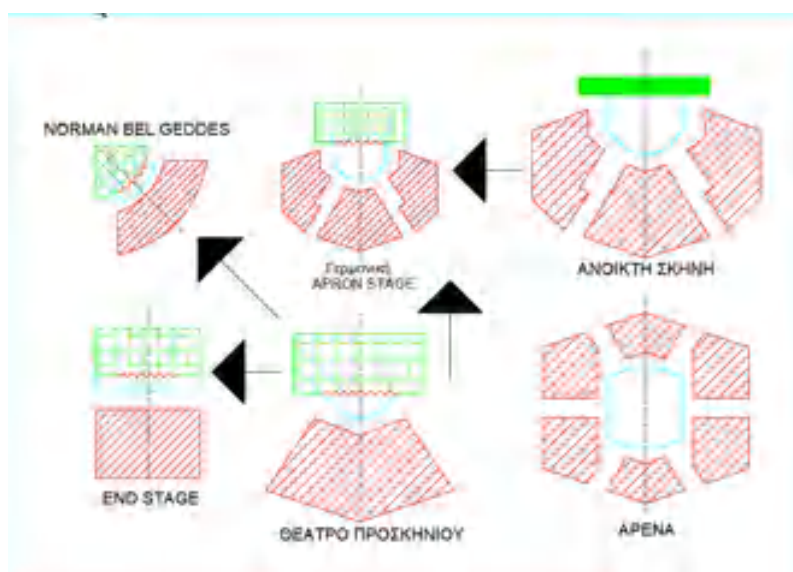
The announcement is part of a long-term research (since 2018) of the Department of Architectural Engineering of the Democritus University of Thrace and concerns the form and the function of theater spaces in the greater Athens area.

The research includes data from a sample of approximately 40 theater spaces, with a total of 16 parameters, including the theatrical form, possible renovations or change of use in the building, the seats capacity, the accessibility, the interventions for sound insulation and the acoustic correction.

As a conclusion, the majority of active theaters are small in size and located in the center or in peripheral neighborhoods of Athens, however in terms of infrastructure and innovative forms, the problem of Athenian theaters is rather qualitative and not quantitative.

Εισαγωγή

Η μορφή του θεατρικού χώρου διαμορφώνεται ανάλογα με το κοινωνικό – πολιτιστικό πλαίσιο και τα τεχνικά δεδομένα κάθε εποχής. Οι προβληματισμοί στις αρχές του 20ου αιώνα, για το ξεπέρασμα της θεατρικής εποχής μπαρόκ και της μορφής του θεάτρου προσκηνίου, οδήγησαν στο σχεδιασμό νέων θεατρικών μορφών, όπως το θέατρο ανοικτής σκηνής, το κυκλικό θέατρο και το ευμετάβλητο θέατρο, αλλά και παραλλαγών της τυπικής μορφής μπαρόκ, όπως οι αμερικάνικες εκδοχές End Stage, Bell Geddes, αλλά και η γερμανική Apron Stage. [1], [2]



Εικόνα 1. Τύποι και παραλλαγές θεατρικών μορφών

Στην Ελλάδα δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχη εξέλιξη λόγω της μακράιωνης Τουρκοκρατίας. Μετά την επανάσταση της ανεξαρτησίας ο σχεδιασμός του νεοελληνικού θεάτρου ακολούθησε, είτε τη μορφή του στεγασμένου ευρωπαϊκού θεάτρου (που ευδοκίμούσε ήδη στα νησιά του Ιονίου), είτε τη μεσαιωνική παράδοση των υπαίθριων, λαϊκών θεαμάτων. Η μάντρα, περικλειστο θερινό θέατρο με στεγασμένη σκηνική εξέδρα ιταλικού τύπου, ήταν ο κυρίαρχος τύπος θεατρικού χώρου, μέχρι τη μικρασιατική καταστροφή. [3]

Η ένωση των Επτανήσων με την Ελλάδα (1864) έδωσε το έναυσμα της οικοδόμησης στεγασμένων θεατρικών χώρων, σε απόκλιση από την παραδοσιακή ελληνική αρχιτεκτονική. Παράλληλα όμως, η καθυστέρηση της σύνδεσης του νεοελληνικού θεάτρου με τον ρεαλισμό, το κυρίαρχο ευρωπαϊκό ρεύμα εκείνης της εποχής, οδήγησε τη θεατρική παραγωγή σε ατροφία, με αποτέλεσμα την αδυναμία διατήρησης επαγγελματικών θιάσων, σε σταθερή βάση. Σε μια εμφανή προσπάθεια των κατά τόπους αστών (σε πόλεις όπως η Σύρος, η Αθήνα, ο Πειραιάς και η Πάτρα) να μιμηθούν ιδεολογικά και αισθητικά τις πλούσιες μητροπόλεις της Ευρώπης, άρχισαν να οικοδομούνται τα νεοκλασικά χειμερινά θέατρα της νεότερης

Ελλάδας. Λειτουργήσαν κατά βάση με περιοδεύοντες μουσικούς θιάσους και ξένο ρεπερτόριο, αφήνοντας στην αφάνεια τη γηγενή θεατρική ζωή. Από τα τέλη του 19ου αιώνα, η Αθήνα έγινε το κέντρο της νεο-ελληνικής σκηνής, με επίκεντρο της θεατρικής ζωής την περιοχή της Ομόνοιας. Το κωμειδύλλιο, το νέο μουσικό-θεατρικό είδος που άνθισε, ανέδειξε θεατρικούς συγγραφείς και ηθοποιούς, αλλά προσέλκυσε και νέο θεατρικό κοινό. Παράλληλα πύκνωσαν οι υπαίθριες λαϊκές σκηνές, στις νέες, μικροαστικές και εργατικές συνοικίες. [4]

Η μικρασιατική καταστροφή επέφερε μια περίοδο κρίσης και στο νεοελληνικό θέατρο. Στον απόηχο της ακμής του μοντέρνου κινήματος, οι αρχιτεκτονικοί προβληματισμοί στην Ελλάδα περιστράφηκαν γύρω από εναλλακτικά θέματα όπως οι θεατρικές ανέσεις, ο τεχνικός εξοπλισμός και η αναστήλωση των θεατρικών μνημείων της αρχαιότητας. Όμως κατά τις δεκαετίες του μεσοπολέμου, οι οικοδομικές εφαρμογές φάνηκε να παρακάμπτουν το θέατρο, καθώς οι επενδύσεις στην ψυχαγωγία και κατά συνέπεια οι νέες αρχιτεκτονικές μορφές επικεντρώθηκαν στις κινηματογραφικές αίθουσες, ενώ οι μάντρες με τις υπαίθριες, πρόχειρες εγκαταστάσεις συνέχισαν να συγκεντρώνουν το λαϊκό κοινό, που πλήθηνε με την έλευση των προσφύγων. [3]

1. Η σύγχρονη θεατρική ζωή

Κατά την περίοδο 2000-15, οι ενεργές αθηναϊκές θεατρικές σκηνές αυξήθηκαν κατά 153%, ενώ το 70% των σκηνών που λειτουργήσαν μετά το 2000 ιδρύθηκαν την περίοδο της οικονομικής ύφεσης (2008-14). Το μεγαλύτερο ποσοστό (47%) των αθηναϊκών θεάτρων έχει μικρή χωρητικότητα (μέχρι 200 θέσεις). Ποσοστό 70% των μικρών θεάτρων λειτουργήσε μετά το 2000 και εντοπίζονται κυρίως γύρω από το κέντρο (Κυψέλη, Μεταξουργείο, Βοτανικό, Ψυρρή, Γκάζι, Εξάρχεια, Κεραμικό), Από αυτούς, οι μεγαλύτεροι χώροι εντοπίζεται στις παραδοσιακές θεατρικές πιάτσες (κέντρο, Κυψέλη), ενώ τα θέατρα μεσαίας χωρητικότητας (400-700 θέσεων) είναι μάλλον παλιότερα (πριν το 1970). Μετά το 2000, ποσοστό 57% των σκηνών στα όρια του Δήμου Αθηναίων φιλοξενούνται σε ανακαινισμένα ή ανακατασκευασμένα θέατρα. Στις χωρικές τάσεις της περιόδου 2000-14, εμφανίζεται μια ήπια αύξηση στο κέντρο και τις περιμετρικές περιοχές του, αισθητή ενίσχυση σε προϋπάρχουσες εναλλακτικές πιάτσες (Μεταξουργείο, Γκάζι, Κυψέλη) και ανάδειξη νέων κέντρων (Βοτανικός, Κεραμικός, Νέος Κόσμος, Ταύρος). Αντίθετη τάση εμφανίζουν τα θερινά θέατρα, των οποίων η λειτουργία θεωρείται πιά επιχειρηματικά ασύμφορη, εξαιτίας κυρίως των πιέσεων που ασκεί η αγορά ακινήτων. [5]

2. Η μεθοδολογία της έρευνας

Η ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας διαχρονικής έρευνας που βρίσκεται σε εξέλιξη από το 2018 στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. Περιλαμβάνει στοιχεία από τις πτυχιακές έρευνες της Ίριδας Καλογεράκη (2024) και των Λυδίας Παπαγεωργίου - Ελένης Ραυτοπούλου (2018-19). Κατά την διάρκεια αυτών των ερευνών καταγράφηκαν σε ημερολόγια παρατηρήσεις από επιτόπιες επισκέψεις και σημειώσεις από τις συζητήσεις με τους υπεύθυνους των θεάτρων. Σημαντικές ήταν οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη συλλογή των στοιχείων, σε σχέση με

τις διάσπαρτες τοποθεσίες των θεάτρων, το ωράριο ανοίγματος εκτός λειτουργίας, καθώς τη συχνή αδυναμία των υπευθύνων να δώσουν επαρκείς απαντήσεις.

Σε κάθε θεατρικό χώρο διακινήθηκε ερωτηματολόγιο με κοινές παραμέτρους έρευνας. Τα στοιχεία των ερευνών καταγράφηκαν σε πρωτότυπες καρτέλες. Στις παραμέτρους περιλαμβάνονται : όνομα, περιοχή, έτος κατασκευής/ ανακατασκευής, αρχιτέκτονες, θεατρικός τύπος, πιθανή αλλαγή χρήσης του κτιρίου, εμβαδόν και χωρητικότητα, μέγεθος σκηνής, κατανομή του χώρου σε επιμέρους χρήσεις για τους ηθοποιούς, τους τεχνικούς και το κοινό, προσβασιμότητα και οικοδομικές παρεμβάσεις για ακουστική και ηχομόνωση.

Η παρούσα ανακοίνωση περιλαμβάνει στοιχεία από περίπου 40 θεατρικούς χώρους (σε σύνολο περίπου 100 ενεργών θεάτρων την τελευταία 5ετία). Πρόκειται για τα θέατρα (σε ορισμένα εκ των οποίων συστεγάζονται πολλαπλές σκηνές) : Αλκμήνη, Altera Pars, Άλφα Ιδέα, Από Μηχανής, Αποθήκη, Arrayo Nuevo, Αυλαία, Βαφείο, Βολονάκη, Coronet, Γκλόρια, Εμπορικών, Επί Κολωνώ, Ιλίσια, Κάππα, Καρέζη, Κάτω από τη Γέφυρα, Μεταξουργείο, Νέου Κόσμου, Οδού Κυκλάδων, Ολβίο, Παλαιό Ελαιουργείο Ελευσίνας, ΠΛ.ΥΦ.Α, Πόρτα, Πρόβα, Στοά, Studio Μαυρομιχάλη, Τρένο στο Ρουφ, Vault, Φούρνος, Χυτήριο.[4], [6]

3. Σφαιρική αξιολόγηση του δείγματος

3.1. Χωροθέτηση

Οι περισσότεροι θεατρικοί χώροι του δείγματος βρίσκονται στις κεντρικές περιοχές της Αθήνας. Εναλλακτικά ή πειραματικά θέατρα εντοπίζονται σε περιφερειακές θεατρικές πιάτσες ή συνοικιακές θέσεις με εύκολη πρόσβαση. Αντίθετα, ελάχιστα θέατρα εγκαθίστανται μακριά από κάποια στάση μετρό.

3.2. Προσβασιμότητα

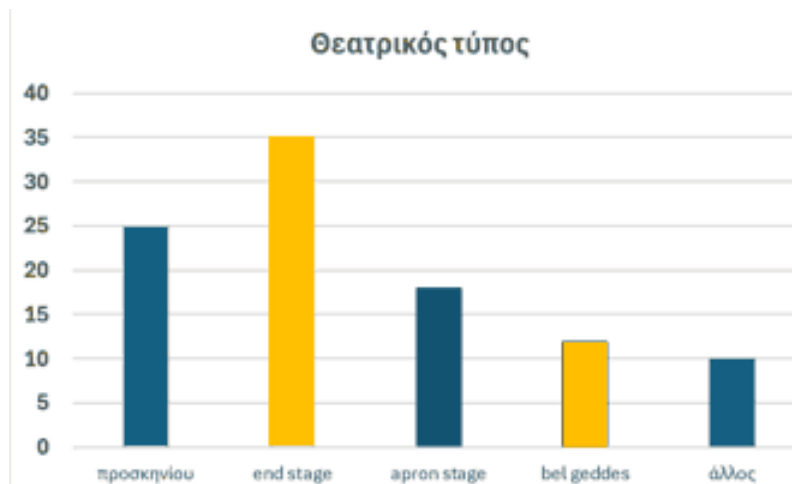
Σημαντικό τμήμα του δείγματος είναι θεατρικοί χώροι ανακαινισμένοι σχετικά πρόσφατα, οι οποίοι ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις πρόσβασης και προσπέλασης. Ωστόσο σε ποσοστό περίπου 50% του δείγματος, εντοπίσαμε πρόβλημα πρόσβασης των ΑΜΕΑ στο σύνολο των επιπέδων του χώρου (κυρίως έλλειψη ράμπας και ιδιαίτερου WC).

3.3. Θεατρική μορφή

Η πλειονότητα των χώρων του δείγματος (ιδίως οι ανακαινισμένοι) διαθέτουν αμφιθεατρική διάταξη καθισμάτων. Μόνο 4 θέατρα διατηρούν τον υφιστάμενο εξώστη (στον τύπο του κινηματοθεάτρου), ενώ στα υπόλοιπα, όπου υπήρχε εξώστης ο χώρος του μετατράπηκε σε 2^η ανεξάρτητη σκηνή.

Όσον αφορά τη σκηνή, οι περισσότεροι χώροι διατηρούν τον τύπο προσκηνίου (25%) ή την τυπική παραλλαγή End Stage (35%). Ακόμη καταμετρήθηκαν οι εναλλακτικές παραλλαγές προσκηνίου τύπου Bell Gedes (12%) και γερμανικής Apron Stage (18%), ενώ ελάχιστοι χώροι ανήκουν στον τύπο της ανοικτής ή ευμετάβλητης σκηνής (10%).

Φαίνεται δηλαδή πως, οι αθηναϊκοί θεατρικοί χώροι δεν χαρακτηρίζονται από ποικιλομορφία, ούτε αποκλίνουν από την κατεστημένη τυπολογία.



Εικόνα 3.1 Οι θεατρικοί τύποι του δείγματος

3.4. Χωρητικότητα και εξυπηρετήσεις

Το δείγμα περιλαμβάνει πολύ μικρά θέατρα (ποσοστό 30%, μέχρι 100 θέσεις) ή μικρά θέατρα (ποσοστό 40%, από 100 μέχρι 250 θέσεις). Καταμετρήθηκαν επίσης θέατρα μεσαίας χωρητικότητας (ποσοστό 25%, από 250 ως 500 θέσεις).

Συνήθως πρόκειται για μικρές σκηνικές εξέδρες, με ελάχιστα ή ανύπαρκτα παρασκήνια και πολύ μικρούς χώρους τεχνικών (ποσοστό 75%). Το συνολικό μέγεθος κάθε χώρου επηρεάζει τις εξυπηρετήσεις των ηθοποιών (από 1 ενιαίο καμαρίνι μέχρι 9 καμαρίνια ανά θέατρο), ενώ συνήθως οι συντελεστές διαθέτουν κάποιο ανεξάρτητο φουαγιέ. Αντίθετα, οι υγροί χώροι βρίσκονται σε μάλλον ικανοποιητική αναλογία ως προς τη χωρητικότητα (συνήθως 2 WC γυναικών και 2 WC αντρών για το κοινό, ανεξάρτητο WC για ΑΜΕΑ και κοινόχρηστα WC για τους ηθοποιούς ή ανεξάρτητα WC σε κάθε καμαρίνι).

3.5. Άλλες χρήσεις

Ορισμένα θέατρα, για οικονομικούς λόγους, εξυπηρετούν στο φουαγιέ του κοινού ευκαιριακές μουσικές εκδηλώσεις, συσσεγάζονται με κάποια Δραματική Σχολή ή φιλοξενούν θεατρικά σεμινάρια και εκπαιδευτικά προγράμματα, ενώ τα μαθήματα της υποκριτικής και κίνησης διεξάγονται στην κύρια θεατρική αίθουσα.

3.6. Παρεμβάσεις για ηχομόνωση και ακουστική διόρθωση

Λόγω μεγέθους, αλλά και διαθέσιμου προϋπολογισμού κατά την ανακατασκευή, εντοπίστηκαν ελάχιστες παρεμβάσεις για την ακουστική διόρθωση του θεατρικού χώρου (ποσοστό 20%), κυρίως προσθήκη ηχο-απορροφητικών επενδύσεων στα πίσω και πίσω πλάγια τοιχώματα της αίθουσας.

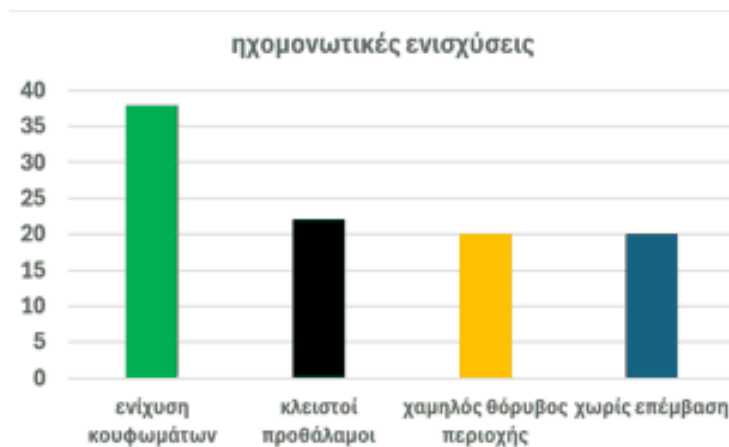
Όσον αφορά την ηχοπροστασία, συχνά η υφιστάμενη διαμόρφωση προσέφερε επάλληλους, κλειστούς προθαλάμους (ποσοστό 22%), ή εντοπίζονται περιορισμένες

ηχομονωτικές ενισχύσεις (ποσοστό 38%, κυρίως αλλαγές σε πόρτες και κλείσιμο παραθύρων), ενώ εμφανώς δεν διαθέτουν ηχομόνωση (ποσοστό 20%) ή επιβιώνουν χάρη στους χαμηλούς θορύβους της περιοχής εγκατάστασης (ποσοστό 20%).

Αυτά τα δεδομένα έρχονται σε ευθεία αντίθεση με τα στοιχεία αντίστοιχης έρευνας που περιορίστηκε σε ορισμένα τυπικά, εμπορικά θέατρα του κέντρου. [7]



Εικόνα 3.2. Παρεμβάσεις ακουστικής διόρθωσης στα θέατρα του δείγματος



Εικόνα 3.3. Ηχομονωτικές ενισχύσεις στα θέατρα του δείγματος

4. Συμπέρασμα – επίλογος

Όπως διαπιστώνουμε, η Αθήνα διαθέτει ένα μεγάλο πλήθος θεατρικών σκηνών, κεντρικά και περιφερειακά, με ποικιλία μορφών και διατάξεων. Οι συντελεστές

τους ενδιαφέρονται είτε για εμπορικές, είτε για εναλλακτικές ή πειραματικές λειτουργίες. Τα θέατρα έχουν μικρή χωρητικότητα, αλλά ανεξαρτήτως μεγέθους έχουν φουαγιέ με bar, χώρους αναμονής και διαχωρισμένους χώρους υγιεινής για ηθοποιούς και θεατές. Ορισμένα διαθέτουν πρόσθετη σκηνή ή εξυπηρετούν άλλες, σχετικές λειτουργίες. Σταδιακά προσαρμόζονται στις απαιτήσεις προσβασιμότητας και αποκτούν σύγχρονο εξοπλισμό, μολονότι δεν διαθέτουν επικαιροποιημένες τεχνικές υποδομές.

Γεγονός είναι πως η Αθήνα διαθέτει πλούσια κι ενεργή θεατρική ζωή. Το πλατύ φάσμα των θεατρικών λειτουργιών δημιουργεί το αίσθημα ενός στέρεου θεατρικού υπόβαθρου που βοηθά να ξεπεραστούν οι περίοδοι των οικονομικών κρίσεων (ίσως καλύτερα από την περίοδο της κατοχής) κι εμφανίζει μια ισχυρή πολιτιστική παράδοση.

Ωστόσο τυπολογικά και τεχνικά εντοπίζονται αρκετά προβλήματα που δίνουν μια εικόνα ένδειας και στασιμότητας. Πρόκειται για ένα πολύ-παραμετρικό φαινόμενο, με θετικές πτυχές όσον αφορά τις επιχειρηματικές / αυτοδιαχειριζόμενες προσπάθειες οικονομικής επιβίωσης και συντήρησης των εγχώριων θεατρικών δυνάμεων, αλλά κι αρνητικές πτυχές όσον αφορά τη διαιώνιση ξεπερασμένων ή κατεστημένων αρχιτεκτονικών αντιλήψεων. Φαίνεται δηλαδή πως, το πρόβλημα της θεατρικής Αθήνας είναι μάλλον ποιοτικό, κι όχι ποσοτικό.

5. Αναφορές

- [1] Χρ. Γ. Αθανασόπουλος *«Προβλήματα στις εξελίξεις του σύγχρονου θεάτρου»* εκδόσεις Σιδέρη, Αθήνα (1976)
- [2] Ν. Μπάρκας *«Θεατρικός χώρος και τεχνολογία»* ψηφιακές σημειώσεις του μαθήματος, eclass.duth.gr, Ξάνθη (ανακτήθηκε 10/7/24)
- [3] Ελ. Φεσσά-Εμμανουήλ *«Η αρχιτεκτονική του νεοελληνικού θεάτρου: 1720-1940»*, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 1990, didaktorika.gr (ανακτήθηκε 9/10/19)
- [4] Λ. Παπαγεωργίου – Ελ. Ραυτοπούλου *«Μορφές μικρών θεατρικών χώρων στην Αθήνα»*, Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική έρευνα - Διάλεξη, Τ.Α.Μ.- Δ.Π.Θ. Ξάνθη, 2020
- [5] Α. Δέφνερ - Γ. Λάλου - Ευ. Ψαθά *«Θέατρα»*, www.athenssocialatlas.gr, (ανακτήθηκε 9/10/19)
- [6] Ιρ. Καλογεράκη *«Χώροι εναλλακτικού θεάτρου στην Αθήνα»*, Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική έρευνα - Διάλεξη, Τ.Α.Μ.- Δ.Π.Θ. Ξάνθη, 2024
- [7] Αλ. Σωτηροπούλου κ.α. *«Θεατρικές σκηνές στην μεταπολεμική Ελλάδα του μοντερνισμού»*, 9ο Συνέδριο Ακουστικής ΕΛΙΝΑ, Πάτρα, 2018 (ανακτήθηκε 3/7/24)



Διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ιερού Ναού Παναγίας Καπνικαρέας

Γιώργος Γουβιανάκης, Ασπασία Κόκκαλη, Πηνελόπη-Μαρία Πιερρουτσάκου,
Αρετή Ανδρεοπούλου*

Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*a.andreopoulou@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ακουστική ανάλυση του Ιερού Ναού Παναγίας Καπνικαρέας, με σκοπό την καταγραφή και διατήρηση του ακουστικού του αποτυπώματος. Η διαδικασία βασίστηκε σε επιτόπιες ακουστικές και φυσικές μετρήσεις καθώς και στη χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic για την ανάπτυξη ενός πλήρως βαθμονομημένου ακουστικού μοντέλου του χώρου. Βάσει προκαταρκτικών αναλύσεων, προσδιορίστηκαν τα ακουστικά χαρακτηριστικά του Ναού σε δύο συνθήκες πληρότητας (0% και 100%), με τα αποτελέσματα να συνάδουν με τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές. Μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνουν περαιτέρω μετρήσεις για την ακριβέστερη βαθμονόμηση του συστήματος και για την ενσωμάτωση στοιχείων θορύβου περιβάλλοντος.

On the investigation of the acoustic characteristics of the Greek Orthodox church of Panagia Kapnikarea

ABSTRACT

This study explores the acoustic properties of the Orthodox Church of Panagia Kapnikarea, in order to record and digitally preserve its unique acoustic profile. The research combines in-situ acoustic measurements with CATT-Acoustic modeling to develop a fully calibrated model of the space. Preliminary analyses revealed the acoustic characteristics of the Church under two occupancy conditions (0% and 100%), with results aligning closely with the existing literature. Future steps will involve more comprehensive in-situ acoustic measurements as a way to enhance model accuracy, as well as the integration of environmental noise parameters to refine the understanding of the church's acoustic profile.

Εισαγωγή

Η μελέτη της ακουστικής χώρων ενδιαφέροντος όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση κόσμου, όπως θέατρα και χώροι λατρείας, είναι μείζονος σημασίας προκειμένου αφενός να κατανοηθεί ο αντίκτυπος συγκεκριμένων αρχιτεκτονικών επιλογών στην ακουστική τους, αφετέρου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή ακουστική εμπειρία για τους ακροατές. Τέτοιες μελέτες υλοποιούνται είτε μέσω ακουστικών μετρήσεων και αναλύσεων [3] είτε συνδυάζοντας τη μέθοδο αυτή με ακουστικές προσομοιώσεις [1, 4, 2].

Η ανάλυση της ακουστικής εκκλησιών και καθεδρικών ναών έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνών. Στον ελλαδικό χώρο, ωστόσο, οι μελέτες ακουστικών χαρακτηριστικών ελληνορθόδοξων και βυζαντινών ναών είναι αρκετά περιορισμένες. Από τις πιο πρόσφατες είναι η [7] κατά την οποία μετρήθηκαν τα ακουστικά χαρακτηριστικά οκτώ βυζαντινών εκκλησιών της Θεσσαλονίκης με σκοπό τη διερεύνηση του θεμελιώδους ρόλου που διαδραματίζει ο ήχος στον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον χώρο καθώς και η ηχητική διέγερση των ιερών σε εκκλησίες που χτίστηκαν σε διαφορετικές περιόδους, ακολουθώντας διαφορετικά σχέδια. Επιπλέον, μελέτες με υπολογιστικές ακουστικές προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί τόσο σε Καθεδρικούς [13] όσο και Ορθόδοξες εκκλησίες, με πιο γνωστό παράδειγμα, την ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και για διάφορες χρήσεις του Ναού [15, 9] ανά τους αιώνες.

Οι μελέτες αυτές βασίζονται σε ακουστικά βαθμονομημένα μοντέλα, τα οποία προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια και αποτυπώνουν στον μέγιστο δυνατό βαθμό τα ακουστικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες των χώρων που εξετάζουν. Μέσω τέτοιων μοντέλων αναδεικνύεται ο αντίκτυπος των ιδιαίτερων αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών και των αρχιτεκτονικών τροποποιήσεων στην ακουστική, καθιστώντας έτσι εφικτή τόσο την αντικειμενική όσο και την υποκειμενική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των χώρων αυτών, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη ακουστική εμπειρία του εκάστοτε ακροατή [1]. Τα εργαλεία ακουστικών προσομοιώσεων επιτρέπουν επίσης την εικονική αναπαράσταση των ακουστικών χαρακτηριστικών χώρων ενδιαφέροντος τόσο στην τωρινή τους κατάσταση, όσο και σε παρελθοντικές και πιθανές μελλοντικές τους καταστάσεις, αφενός διατηρώντας αναλλοίωτο το ακουστικό τους αποτύπωμα, αφετέρου προβλέποντας τον αντίκτυπο πολυάριθμων χωρικών μεταμορφώσεων τους στον χρόνο [2].

Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην καταγραφή και στην ανάδειξη των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, με σκοπό τη συστηματική μελέτη και την ψηφιακή διατήρηση του ακουστικού του αποτυπώματος. Η ακουστική μελέτη υλοποιήθηκε στο λογισμικό CATT-Acoustic, ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία [13] και βασίστηκε σε επιτόπιες ακουστικές και φυσικές μετρήσεις χώρου.

1 Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας

Ο Ι.Ν. των Εισοδίων της Θεοτόκου, ή αλλιώς Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας όπως είναι ευρέως γνωστός στις μέρες μας, βρίσκεται στην οδό Ερμού στο κέντρο της

Αθήνας. Είναι ένας από τους καλύτερα σωζόμενους βυζαντινούς ναούς, ο οποίος από το 1934 βρίσκεται στην κυριότητα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Αποτελείται από τρεις επιμέρους κτιριακές δομές, οι οποίες ανεγέρθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ο αρχικός ναός οικοδομήθηκε περί τα 1050 μ.Χ. σε ρυθμό τετρακίονιο σταυροειδή εγγεγραμμένο με τρούλο Αθηναϊκού τύπου. Στο εσωτερικό του ναού έχουν ενσωματωθεί στοιχεία όπως αρχαίοι κίονες και αρχαία και παλαιοχριστιανικά γλυπτά, καθώς έχει χτιστεί πάνω στα θεμέλια αρχαιοελληνικού ναού. Το Ιερό Βήμα έχει τριμερή μορφή με δύο παραβήματα εκατέρωθεν του κεντρικού. Λίγο μετά την οικοδόμηση του κυρίως ναού προστέθηκε στη βόρεια πλευρά το Παρεκκλήσιο της Αγίας Βαρβάρας. Στη δυτική πλευρά κατά μήκος των δύο ναών, υπήρχε ανοιχτή στοά η οποία κλείστηκε και μετατράπηκε σε εξωνάρθηκα, όταν ο ναός περιήλθε στην κυριότητα του Πανεπιστημίου. Με το πέρασμα των χρόνων οι παραπάνω τρεις ανεξάρτητοι λειτουργικά χώροι ενοποιήθηκαν, δημιουργώντας έναν ενιαίο με ιδιόμορφα αρχιτεκτονικά στοιχεία, τα οποία ευθύνονται για τα ιδιαίτερα ακουστικά χαρακτηριστικά του.

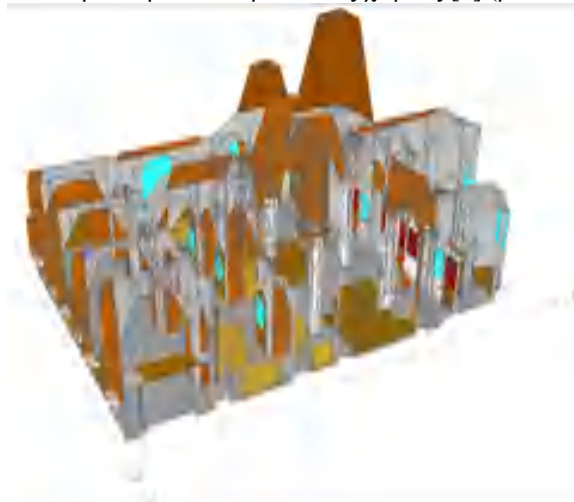


Εικόνα 1.1 I.N. Εισοδίων της Θεοτόκου, Αθήνα

Τέσσερις αρχαίοι κίονες με παλαιοχριστιανικά κιονόκρανα διακοσμούν το εσωτερικό του ναού, οι οποίοι στηρίζουν τον τρούλο και τις ανίδες του. Διάφορες περίπλοκες δομές όπως τρούλοι, ημικυκλικές κόγχες που σχηματίζονται στους τοίχους εντός του Ιερού Βήματος, καμάρες και ανίδες σε διάφορα σημεία εντός του χώρου συμπληρώνουν την εικόνα ενός περίτεχνου αρχιτεκτονικά κτίσματος και συμβάλλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση των ακουστικών χαρακτηριστικών του. Ο κυρίως ναός διαθέτει μαρμάρινο τέμπλο το οποίο μάλλον μιμείται το αντίστοιχο που κοσμούσε τον ναό στα βυζαντινά χρόνια, ενώ το παρεκκλήσι της Αγίας Βαρβάρας ξύλινο. Το κτίσμα συνολικά είναι πλήρως τοιχογραφημένο. Οι αγιογραφίες που κοσμούν το εσωτερικό του ακολουθούν κατά κύριο λόγο την βυζαντινή τεχνοτροπία με εξαίρεση τον εξωνάρθηκα οι αγιογραφίες του οποίου αποτελούν έργο αγνώστου καλλιτέχνη και ακολουθούν περισσότερο το στυλ μιας δυτικής τεχνοτροπίας.

2 Δημιουργία και Βαθμονόμηση Μοντέλου Γεωμετρικής Ακουστικής

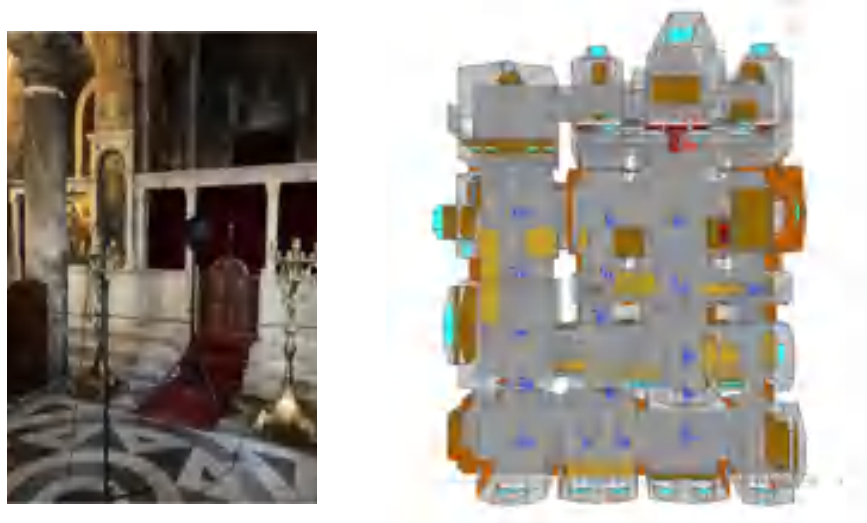
Ελλείπει λεπτομερών σχεδίων κάτοψης και τομών, η δημιουργία του μοντέλου γεωμετρικής ακουστικής (GA) του Ιερού Ναού στο λογισμικό CATT-Acoustic βασίστηκε σε επιτόπιες λεπτομερείς μετρήσεις του χώρου, φωτογραφίες, και παλαιά σχέδια που ήταν διαθέσιμα στο αρχείο του πανεπιστημίου. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας, ο χώρος χωρίστηκε σε τέσσερις επιμέρους ζώνες: εξωνάρθηκας, παρεκκλήσι Αγίας Βαρβάρας, κυρίως Ναός και Ιερά. Η κάθε ζώνη μοντελοποιήθηκε ξεχωριστά, και σταδιακά ενώθηκαν σε ένα ενιαίο κτίσμα, δημιουργώντας την ιδιαίτερη και χαρακτηριστική γεωμετρία του χώρου. Υπολογίζοντας όλες τις επιμέρους ζώνες, το μέγεθος του κτίσματος είναι 2.660 m^3 , με μέγιστες διαστάσεις L: 16.56 m, W: 13.8 m, H: 11.64 m. Προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ μιας ακριβούς ακουστικής μοντελοποίησης του χώρου και μιας ρεαλιστικής υπολογιστικής απόδοσής του, αποφεύχθηκε η δημιουργία μιας υπερβολικά λεπτομερούς γεωμετρικής αναπαράστασης του Ναού. Διατηρήθηκαν, ωστόσο, κατά το δυνατόν οι κύριες αρχιτεκτονικές δομές του χώρου, ακολουθώντας τις διαδικασίες μοντελοποίησης που περιγράφονται στο [13]. Ως εκ τούτου, το απλοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο που προέκυψε αποτελείται συνολικά από 990 επίπεδα (planes), τα οποία καλύπτονται από 11 διαφορετικά υλικά και έχουν ταυτοποιηθεί ως τα συνηθέστερα σε λατρευτικούς χώρους [9] (βλ. Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής του Ναού

Η μοντελοποίηση συνοδεύτηκε από σειρά ακουστικών μετρήσεων εντός του Ναού. Ως σήμα διέγερσης, χρησιμοποιήθηκε λογαριθμικό sine-sweep, διάρκειας 5 δευτερολέπτων και συχνотικού εύρους 200 Hz - 5000 Hz. Για τη διεξαγωγή των ακουστικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα πολυεδρικό ηχείο Bruel & kjaer 4296 και ένα μετρητικό μικρόφωνο MM1 t.bone. Επιλέχθηκαν δύο θέσεις εκπομπής για την ηχητική πηγή, μία μπροστά και μία πίσω από το τέμπλο του κυρίως ναού, αντιπροσωπεύοντας τις κύριες θέσεις του Ιερέα κατά τη διάρκεια της Θείας Λειτουργίας, καθώς και 17 θέσεις δεκτών κατανεμημένες ομοιόμορφα στον χώρο. Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν τόσο για το ιδιαίτερο ακουστικό ενδιαφέρον που

παρουσιάζουν όσο και επειδή αποτελούν ρεαλιστικές θέσεις ακρόασης εντός του Ναού. Οι κρουστικές αποκρίσεις καταγράφηκαν στο περιβάλλον Matlab με χρήση του εργαλείου ScanIR [5]. Οι εν λόγω ακουστικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου αφενός να καταστεί εφικτή η βαθμονόμηση του γεωμετρικού μοντέλου για περαιτέρω μελέτες και ακουστικές προσομοιώσεις και αφετέρου να καταστεί δυνατή η σύγκριση των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου με εκείνα άλλων ναών που έχουν μελετηθεί αποκλειστικά βάσει ακουστικών μετρήσεων [7].



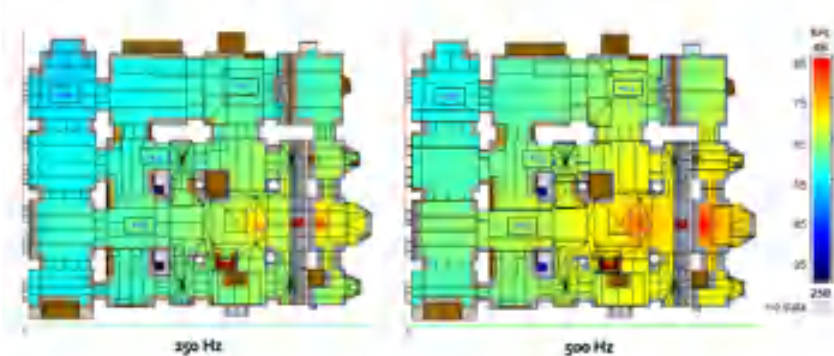
*Εικόνα 2.2 αριστερά) Ηχομετρήσεις στο εσωτερικό του Ναού
δεξιά) Κάτοψη του Ναού όπου φαίνονται οι 2 θέσεις ηχητικής διέγερσης (A0 και A1)
και οι 17 θέσεις ηχομέτρησης*

Το μοντέλο γεωμετρικής ακουστικής βαθμονομήθηκε συγκρίνοντας τα προσομοιωμένα ακουστικά χαρακτηριστικά με τις φυσικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο. Στόχος ήταν να ελαχιστοποιηθούν οι διαφορές μεταξύ των ακουστικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων, διασφαλίζοντας έτσι ότι η προσομοίωση μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικές παρατηρήσεις και αποτελέσματα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην μεθοδολογική προσέγγιση των Postma et. al [13], και περιελάμβανε τη σταδιακή προσαρμογή των συντελεστών απορρόφησης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, βάσει της βιβλιογραφίας [10, 9] έως ότου να ελαχιστοποιηθούν οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων για βασικές ακουστικές παραμέτρους.

3 Ακουστική Ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε, η δημιουργία του ακουστικά βαθμονομημένου μοντέλου του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας στο λογισμικό CATT-Acoustic επιτρέπει πλέον την αναλυτική και εις βάθος μελέτη των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου, ακόμα

και σε καταστάσεις πέραν εκείνων των επιτόπιων ηχομετρήσεων. Το παρόν κείμενο, χάρη συντομίας, θα παρουσιάσει προκαταρκτικές αναλύσεις των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ναού σε 2 ακραίες καταστάσεις πληρότητας: α) 0% (άδειος ναός) και β) 100% (πλήρως γεμάτος ναός) σύμφωνα με τον Vorländer [14], επιτρέποντας με τον τρόπο αυτόν και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα άλλων δημοσιευμένων πηγών [15]. Η ανάλυση εστιάζει σε 2 θέσεις διέγερσης (A0 και A1) εμπρός και πίσω από την Ωραία Πύλη του κεντρικού Ναού και 4 θέσεις ακρόασης εντός του Ναού (03, 08, 12, και 15), οι οποίες επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικές καθώς βρίσκονται είτε σε μονοπάτι απευθείας ήχου από την πηγή, είτε σε ηχητική σκιά (βλ. Εικόνα 2.2) .



Εικόνα 3.1 Κατανομή ηχητικής ενέργειας εντός του Ναού στις οκταβικές συχνотικές ζώνες των 250 Hz και 500 Hz

3.1 Κατανομή ηχητικής ενέργειας

Στην Εικόνα 4.1 αποτυπώνεται η κατανομή της ηχητικής ενέργειας (dB SPL) στο εσωτερικό του Ναού σε 2 οκταβικές συχνотικές ζώνες ενδιαφέροντος, τα 250Hz και τα 500 Hz, για τις 2 προαναφερθείσες θέσεις διέγερσης και τις 4 θέσεις ακρόασης. Οι εν λόγω συχνотικές ζώνες επιλέχθηκαν καθώς στην ομιλούσα και την άδουσα φωνή, οι οποίες αποτελούν τις 2 βασικές ηχητικές πηγές διέγερσης σε ορθόδοξους ναούς, περιλαμβάνουν τις θεμελιώδεις συχνότητες και τους πρώτους αρμονικούς των μεταδιδόμενων ηχητικών σημάτων. Η συχνотική ζώνη των 125 Hz η οποία για τους ίδιους λόγους θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης, δεν περιλαμβάνεται στις αναλύσεις καθώς βρίσκεται εκτός του συχνотικού εύρους των επιτόπιων ηχομετρήσεων του Ναού και κατά συνέπεια της βαθμονόμησης του ακουστικού μοντέλου (βλ. Ενότητα 2).

Όπως παρατηρείται, θέσεις στο εσωτερικό του Ναού οι οποίες βρίσκονται σε απευθείας διαδρομή ήχου (03 και 12), λαμβάνουν ικανοποιητική ποσότητα ηχητικής ενέργειας από την πηγή A0 (μπροστά από την Ωραία Πύλη), ενώ όσες βρίσκονται σε “ηχητική σκιά” (08 και 15) έχουν απώλεια ηχητικής ενέργειας έως και 20 dB SPL. Αντιθέτως, η ηχητική πηγή A1, η οποία βρίσκεται εντός του Ιερού, δεν δύναται να διεγείρει επαρκώς τον χώρο του Ναού, πέρα από το ίδιο το Ιερό. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνεται και βιωματικά κατά τη διάρκεια της Θείας λειτουργίας, όταν ομιλίες και ψαλμωδίες εντός του Ιερού, οι οποίες δεν λαμβάνουν ηλεκτρακουστική ενίσχυση,

δεν γίνονται εύκολα καταληπτές σε θέσεις εκτός αυτού. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν τόσο για τη συχνοτική ζώνη των 250 Hz όσο και των 500 Hz.

3.2 Χρόνος Αντήχησης, Ευκρίνεια και Διακριτότητα

Στους Πίνακες 3.2.1 και 3.2.2 συγκεντρώνονται οι βασικές ακουστικές παράμετροι του Ναού: Χρόνος Αντήχησης (T20, T30 και EDT), Ευκρίνεια (C50 και C80) και διακριτότητα (D50) για τις 5 οκταβικές συχνοτικές ζώνες από 250 Hz έως 4000 Hz, για 2 καταστάσεις πληρότητας (0% και 100%) και τις 2 υπό εξέταση θέσεις διέγερσης A0 και A1, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, οι χρόνοι αντήχησης μεταξύ των δύο καταστάσεων πληρότητας διαφέρουν από 1 s έως 2,5 s, αναλόγως της συχνοτικής ζώνης, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται στις συχνοτικές ζώνες από 1000 Hz και πάνω. Ανάλογοι χρόνοι T20 και T30 έχουν διαπιστωθεί και σε άλλους ορθόδοξους ναούς παρόμοιων διαστάσεων και όγκου [16, 12, 11].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ οι παρατηρούμενοι χρόνοι αντήχησης είναι αντίστοιχοι και στις 2 θέσεις διέγερσης A0 και A1, οι παράμετροι της ευκρίνειας και τις διακριτότητας αλλάζουν σημαντικά μεταξύ των 2 καταστάσεων. Όπως είναι αναμενόμενο, σε έναν λατρευτικό χώρο μικρών διαστάσεων, όπως είναι ο Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, οι τιμές Ευκρίνειας (C50 και C80) και διακριτότητας (D50) κυμαίνονται εντός των αποδεκτών ορίων ανεξαρτήτως κατάστασης πληρότητας, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται μπροστά από την Ωραία Πύλη (A0), όταν δηλαδή βρίσκεται στον ίδιο χώρο με τις θέσεις ακρόασης. Ωστόσο, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται εντός του χώρου του Ιερού (βλ. Πίνακα 3.2.2), οι εν λόγω τιμές βρίσκονται κάτω από τα ευρέως αποδεκτά όρια, δηλώνοντας τη δυσκολία καταληπτότητας του μεταδιδόμενου σήματος.

Πίνακας 3.2.1 Ακουστικές Παράμετροι Ναού για καταστάσεις πληρότητας 0% (Empty) και 100% (Full) από τη θέση διέγερσης A0

Empty /Full	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T20	2,55 / 1,56 s	2,78 / 1,19 s	3,36 / 1,04 s	2,85 / 1,01 s	2,30 / 0,88 s
T30	2,46 / 1,53 s	2,90 / 1,20 s	3,30 / 1,08 s	2,87 / 1,04 s	2,28 / 0,92 s
EDT	2,69 / 2,13 s	3,15 / 0,93 s	3,36 / 1,09 s	2,99 / 0,95 s	2,29 / 0,88 s
C50	-7,35 / -6,07 dB	-3,91 / 2,37 dB	-5,96 / 2,07 dB	-4,33 / 2,54 dB	-3,31 / 3,08 dB
C80	-3,55 / -3,32 dB	-2,34 / 5,24 dB	-3,63 / 4,27 dB	-2,87 / 5,07 dB	-1,20 / 6,01 dB
D50	15,56 / 19,84 %	28,92 / 63,30 %	20,24 / 61,72 %	26,94 / 64,22 %	31,80 / 67,01 %

Πίνακας 3.2.2 Ακουστικές Παράμετροι Ναού για καταστάσεις πληρότητας 0% (Empty) και 100% (Full) από τη θέση διέγερσης A1

Empty /Full	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
T20	2,46 / 1,57 s	3,03 / 1,24 s	3,46 / 1,15 s	2,82 / 1,00 s	2,32 / 0,90 s
T30	2,44 / 1,53 s	3,02 / 1,24 s	3,41 / 1,14 s	2,88 / 1,02 s	2,31 / 0,91 s
EDT	3,00 / 2,11 s	2,96 / 1,40 s	3,51 / 1,28 s	3,25 / 1,18 s	2,43 / 1,08 s
C50	-10,11 / -9,53 dB	-10,15 / -5,01 dB	-11,48 / -6,74 dB	-10,77 / -3,72 dB	-9,62 / -4,35 dB
C80	-4,73 / -6,24 dB	-6,65 / -1,53 dB	-7,89 / -2,02 dB	-6,54 / 0,51 dB	-5,68 / 0,23 dB
D50	8,89 / 10,03 %	8,81 / 23,99 %	6,64 / 17,48 %	7,73 / 29,79 %	9,83 / 26,84 %

4 Επίλογος - Συμπεράσματα

Η μελέτη παρουσίασε τη διαδικασία μελέτης των ακουστικών χαρακτηριστικών του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας, η οποία βασίστηκε τόσο σε επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις χώρου, όσο και στη δημιουργία ενός πλήρως βαθμονομημένου ακουστικού μοντέλου με τη χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic. Η προκαταρκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, ανέδειξε τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου σε 2 συνθήκες πληρότητας. Τα αποτελέσματα συνάδουν με αντίστοιχα της βιβλιογραφίας και αποδεικνύουν τις κατάλληλες ακουστικές συνθήκες που διαμορφώνονται, όταν η πηγή διέγερσης βρίσκεται στον κυρίως χώρο του Ναού.

Μελλοντικά βήματα θα περιλαμβάνουν πιο συστηματικές ακουστικές μετρήσεις εντός του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας οι οποίες θα επιτρέψουν αφενός μια πιο πλήρη βαθμονόμηση του εικονικού ακουστικού μοντέλου, για μεγαλύτερο εύρος συχνότητων, αφετέρου την εισαγωγή στο μοντέλο του επιπέδου των θορύβων περιβάλλοντος και βάθους, οι οποίοι αναμένεται να αλλάξουν έως ένα βαθμό τα ακουστικά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

5 Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών καθώς και το προσωπικό του Ι.Ν. Παναγίας Καπνικαρέας που κατέστησαν εφικτή και διευκόλυναν την πρόσβασή στον χώρο του Ναού. Επίσης, ευχαριστούμε θερμά τους συναδέλφους φοιτητές του μαθήματος “Μελέτη και προσομοίωση ακουστικών χαρακτηριστικών χώρων λατρείας” του Τμήματος Μουσικών Σπουδών, ΕΚΠΑ χωρίς τη βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν εφικτές οι επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις του χώρου και η εικονική μοντελοποίησή του.

6 Αναφορές

- [1] Alonso, A., Sendra, J. J., Suarez, R., & Zamarreño, T. (2014). Acoustic evaluation of the cathedral of Seville as a concert hall and proposals for improving the acoustic quality perceived by listeners. *J. of Building Performance Simulation*, 7(5), 360-378.
- [2] Alonso, A., Suarez, R., & Sendra, J. J. (2017, August). Virtual reconstruction of indoor acoustics in cathedrals: The case of the Cathedral of Granada. In *Building Simulation* (Vol. 10, pp. 431-446). Tsinghua University Press.
- [3] Álvarez-Morales, L., Giron, S., Galindo, M., & Zamarreno, T. (2016). Acoustic environment of Andalusian cathedrals. *Building and Environment*, 103, 182-192.
- [4] Álvarez-Morales, L., Zamarreño, T., Girón, S., & Galindo, M. (2014). A methodology for the study of the acoustic environment of Catholic cathedrals: Application to the Cathedral of Malaga. *Building and Environment*, 72, 102-115.
- [5] Boren, B., & Roginska, A. (2011, October). Multichannel impulse response measurement in matlab. In *Audio Engineering Society Convention 131*. Audio Engineering Society.
- [6] Brezina, P. (2015). Measurement of intelligibility and clarity of the speech in romanesque churches. *Journal of Cultural Heritage*, 16(3), 386-390
- [7] Gerstel, S. E., Kyriakakis, C., Raptis, K. T., Antonopoulos, S., & Donahue, J. (2018). Soundscapes of Byzantium: The Acheiropoietos basilica and the cathedral of Hagia Sophia in Thessaloniki. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, 87(1), 177-213.
- [8] Gül, Z. S., Çalışkan, M., Tavukçuoğlu, A., & Xiang, N. (2018). Assessment of acoustical indicators in multi-domed historic structures by non-exponential energy decay analysis. *Acoustics Australia*, 46, 181-192.
- [9] Gül, Z. S. (2019, July). Acoustical impact of architectonics and material features in the lifespan of two monumental sacred structures. In *Acoustics*, 1(3), 493-516.
- [10] Kosała, K. (2016). Calculation models for acoustic analysis of St. Elizabeth of Hungary Church in Jaworzno Szczakowa. *Archives of Acoustics*, 41(3), 485-498
- [11] Kosała, K., & Małecki, P. (2018). Index assessment of the acoustics of Orthodox churches in Poland. *Applied Acoustics*, 130, 140-148.
- [12] Małecki, P., Wiciak, J., & Nowak, D. (2017). Acoustics of the Orthodox Churches in Poland. *Archives of acoustics*, 42(4), 579-590.
- [13] Postma, B.N., & Katz, B.F. (2015). Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations. *Virtual Reality*, 19, 161-180.
- [14] Vorländer, M. (2020). *Auralization*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer International Publishing.
- [15] Weitze, C. A., Rindel, J. H., Christensen, C. L., & Gade, A. C. (2002, September). The acoustical history of Hagia Sophia revived through computer simulation. In *Forum Acusticum*. Citeseer.



Ακουστική & Ηλεκτροακουστική αναβάθμιση Αμφιθεάτρου διαλέξεων στην Ιατρική σχολή του Α.Π.Θ.

Κωνσταντίνος Μπαξεβάνης

Μελετητής Α/Υ

Telmaco S.A.

kostas.baxevanis@telmaco.gr

Μιχάλης Καλλίρης

Μηχανολόγος Μηχ.

BEng-MSc

michael.kalliris@gmail.com

Γεώργιος Καλλίρης

Καθηγητής ΑΠΘ

ΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ

gkal@jour.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ακουστική και ηλεκτροακουστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την αναβάθμιση του αμφιθεάτρου-Α χωρητικότητας 500 θέσεων, της Ιατρικής Σχολής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Μετά την επιτόπια αποτίπωση των διαστάσεων του χώρου, τέθηκαν οι απαιτήσεις, πραγματοποιήθηκαν ηλεκτροακουστικές μετρήσεις της υπάρχουσας κατάστασης και κατασκευάστηκε 3-διάστατο μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης προκειμένου να εκτιμηθούν οι καθορισμένες ακουστικές παράμετροι πριν και μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων. Προτάθηκαν ήχο-απορροφητικά πάνελ με πιστοποιημένους συντελεστές απορρόφησης και επιλογές τοποθέτησης με κύριο στόχο την μείωση των μακρινών ανακλάσεων. Για την απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων, έγινε πρόταση τοποθέτησης απορροφητών μεμβράνης στο πίσω μέρος των ήχο-απορροφητικών πάνελ. Για την εγκατάσταση συστήματος ενισχυμένου ήχου, έγινε σχεδιασμός σε λογισμικό προσομοίωσης του κατασκευαστή. Οι θέσεις των ηχητικών πηγών, επιλέχθηκαν με βάση την υπάρχουσα γεωμετρία του χώρου και τις δυνατότητες στήριξης των ηχητικών πηγών. Με την χρήση του λογισμικού, ελέγχθηκαν οι επιλεγμένες θέσεις των ηχητικών πηγών και με βάση την κατευθυντικότητα τους έγιναν οι υπολογισμοί προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη και κατά το δυνατόν ομοιόμορφη κάλυψη. Για την εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκαν ενισχυτές με ενσωματωμένο ψηφιακό επεξεργαστή του ίδιου κατασκευαστή. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών κατασκευής των ακουστικών παρεμβάσεων και της εγκατάστασης του μεγαφωνικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν εκ νέου, μετρήσεις ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των λύσεων που προτάθηκαν και υλοποιήθηκαν.

Acoustic & Electroacoustic renovation of a Lecture-theater at the Medical School of Aristotle University

ABSTRACT

This paper presents the acoustic and electro-acoustic study carried out for the purpose of upgrading the 500-seat amphitheater-A at the Medical School of the Aristotle University of Thessaloniki. After the on-site mapping of the dimensions of the space, the requirements were set, electro-acoustic measurements of the existing situation were carried out and a 3-dimensional acoustic simulation model was constructed to estimate the defined acoustic parameters before and after the implementation of the interventions. Sound-absorbing panels with certified absorption coefficients and mounting options were proposed with the main objective of reducing distant reflections. For the absorption of low frequencies, a proposal was made to place membrane absorbers on the back of the sound-absorbing panels. For the installation of the sound system, design was done in the manufacturer's simulation software. The

positions of the sound sources were chosen based on the existing geometry of the space and the possibilities of supporting the sound sources. Using the software, the selected positions of the sound sources were checked and based on their directivity, the calculations were made to achieve the maximum and as uniform as possible coverage. Amplifiers with an integrated digital processor from the same manufacturer were used for the installation. After the completion of the construction works of the acoustic interventions and the installation of the loudspeaker system, measurements were carried out again to establish the effectiveness of the solutions proposed and implemented.

Εισαγωγή

Το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) είναι το μεγαλύτερο Πανεπιστήμιο στην Ελλάδα, και η Ιατρική Σχολή του είναι μία από τις πιο φημισμένες και ιστορικές σχολές. Η Ιατρική Σχολή χρησιμοποιεί τις αίθουσες διδασκαλίας, τα εργαστήρια αλλά και τα αμφιθέατρα για την διεξαγωγή μαθημάτων. Ένα από τα αμφιθέατρα, Το αμφιθέατρο-Α χωρητικότητας 500 θέσεων της Σχολής είναι ένας σημαντικός χώρος για τις ακαδημαϊκές δραστηριότητες των φοιτητών και των καθηγητών. Χρησιμοποιείται για διαλέξεις, παρουσιάσεις, εξετάσεις και άλλες εκδηλώσεις που σχετίζονται με το πρόγραμμα σπουδών. Υπήρχε η απαίτηση ώστε το αμφιθέατρο να είναι εξοπλισμένο με σύγχρονα οπτικοακουστικά μέσα, προκειμένου να εξυπηρετεί τις ανάγκες της διδασκαλίας και των παρουσιάσεων. Για την υλοποίηση του παραπάνω αιτήματος, υλοποιήθηκαν 2 μελέτες α) Ακουστικής και β) Ηλεκτροακουστικής με απώτερο στόχο την δημιουργία καλύτερων συνθηκών ακρόασης και καταληπτότητας του λόγου στις διαλέξεις αλλά και βέλτιστης μουσικής ακρόασης στις εκδηλώσεις.

1. Ακουστική Μελέτη

Αρχικά έγινε επιτόπια αποτύπωση των διαστάσεων του χώρου και τέθηκαν οι απαιτήσεις σύμφωνα με το DIN 18041 – Education (DIN 18041 - May 2004, chapter 4.3.2) και το διάγραμμα των Knudsen and Harris for Speech auditoria [1], με βάση τον όγκο του και την χρήση για την οποία προορίζεται. Συγκεκριμένα από την αποτύπωση προέκυψαν τα εξής δεδομένα: Μέγιστη διάσταση 28 m, μέγιστο ύψος 11 m, όγκος 2826.78 m³, αριθμός θέσεων 500 και εμβαδόν ακροατηρίου 210 m². Για τον δεδομένο όγκο 2826.78 m³ ο μέσος χρόνος αντήχησης που προκύπτει από το διάγραμμα για την περίπτωση της δεδομένης χρήσης (Speech auditoria, Knudsen and Harris) είναι: $RT_{60}=0.9$. Επίσης σύμφωνα με το DIN 18041 – Education (DIN 18041 - May 2004, chapter 4.3.2) και για τον δεδομένο όγκο, προκύπτει το διάγραμμα ανοχών RT_{60} [2] που απεικονίζεται στην εικόνα 1.1.

Επιπλέον, προτείνεται ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (speech transmission index): $STI \geq 0.6$. Τέλος, για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της παρέμβασης προτείνεται να μελετηθεί η βελτίωση του λόγου απευθείας προς αντηχητικό πεδίο D/R ratio μέσω της βελτίωσης της ακουστικής παραμέτρου Clarity C50 (dB).



Εικόνα 1.1. Διάγραμμα ανοχών RT60 σύμφωνα με το DIN 18041 - Education [2].

1.1 Μετρήσεις της υπάρχουσας κατάστασης

Πραγματοποιήθηκαν ηλεκτροακουστικές μετρήσεις της υπάρχουσας κατάστασης και διαπιστώθηκε ότι οι ακουστικές παράμετροι του χώρου απέχουν σημαντικά από τις απαιτήσεις που είχαν τεθεί. Στην εικόνα 1.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πριν από τις παρεμβάσεις.



Εικόνα 1.2 Μετρήσεις RT60 της υπάρχουσας κατάστασης πριν από τις παρεμβάσεις T20 (κόκκινο) και EDT (κυανό).

Ενδεικτικά οι τιμές του STI που υπολογίστηκαν, πριν από τις παρεμβάσεις (STI:0.48-0.52), και σύμφωνα με το διάγραμμα αναφοράς, που προαναφέρεται, (Knudsen and Harris for Speech auditoria), δεν ήταν αποδεκτές. Αντίστοιχα, μη αποδεκτές ήταν και οι τιμές του RT60 που μετρήθηκαν (RT60: 2-1.8 sec) καθώς και η ακουστική παράμετρος ευκρίνειας C50. Οι παραπάνω δείκτες υπολογίστηκαν με μετρήσεις σάρωσης ημιτόνων που πραγματοποιήθηκαν, με χρήση φορητού εξοπλισμού μετρήσεων. Ο φορητός εξοπλισμός ήταν όμοιος στις μετρήσεις πριν αλλά και μετά την υλοποίηση-παρέμβασή της μελέτης. Τα τεχνικά στοιχεία του εξοπλισμού μετρήσεων ήταν, λογισμικό REW [3] σε φορητό υπολογιστή με κάρτα ήχου babyface pro FS (RME), ενισχυτές ισχύος EV Q66, 2x600 @ 4 Ohm, 1x ηχείο, EV ZX5, βαθμονομητής Class 2 με Serial No.2304045 και μετρητικό μικρόφωνο Earthworks M23R.

1.2 Μοντέλο Ακουστικής Προσομοίωσης

Στην συνέχεια κατασκευάστηκε 3-διάστατο μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης [4] προκειμένου να εκτιμηθούν οι καθορισμένες ακουστικές παράμετροι πριν και μετά την εφαρμογή των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Να σημειωθεί ότι όταν η ομάδα ανέλαβε την μελέτη ακουστικής αναβάθμισης τα καθίσματα είχαν ήδη αλλάξει και

είχαν τοποθετηθεί καθίσματα με υφασμάτινη ταπετσαρία κάτι το οποίο λήφθηκε υπόψη στην προσομοίωση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της υπάρχουσας κατάστασης ήταν σε συμφωνία με τους υπολογισμούς της προσομοίωσης πριν τις παρεμβάσεις με μέσο χρόνο αντήχησης $RT60@500\text{Hz}=1.8\text{s}$.

1.3 Προτάσεις Ακουστικών Παρεμβάσεων

Επιλέχθηκαν ήχο-απορροφητικά πάνελ με πιστοποιημένους συντελεστές απορρόφησης σύμφωνα με το DIN EN ISO 354 έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή τους στο 3-διάστατο μοντέλο και η εκτίμηση της επίδρασης που θα είχε η χρήση τους. Για τις θέσεις τοποθέτησης των ήχο-απορροφητικών πάνελ προτάθηκαν δύο επιλογές οι οποίες είχαν ως κύριο στόχο την μείωση των μακρινών ανακλάσεων οι οποίες δεν συνεισφέρουν στην καταληπτότητα του λόγου, ενώ οι υπάρχουσες κοντινές στην έδρα ανακλαστικές επιφάνειες δεν επενδύθηκαν προκειμένου να υπερισχύσουν οι πρώιμες ανακλάσεις. Επιλέχθηκε το πορώδες ήχο-απορροφητικό υλικό Basotect® G+ (open-cell foam made of melamine resin) σε πάχος 50mm με τους συντελεστές απορρόφησης μετρημένους σε θάλαμο αντήχησης σύμφωνα με το DIN EN ISO 354.

Με σκοπό την επιπλέον απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων, έγινε εκτίμηση τοποθέτησης απορροφητή μεμβράνης, τοποθετημένου σε απόσταση από τον τοίχο. Οι απορροφητές μεμβράνης, τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος των ήχο-απορροφητικών πάνελ και η επίδραση αποτυπώθηκε στους υπολογισμούς της προσομοίωσης. Επιπρόσθετα η συνολική απορροφητική διάταξη ενισχύθηκε περαιτέρω στις χαμηλές συχνότητες με την προσθήκη ενός απορροφητή τύπου μεμβράνης πίσω από το πορώδες υλικό ο οποίος είναι κατασκευασμένος από hardboard πάχους 4-5 mm και επιφανειακής πυκνότητας 4 kg/m^2 με συχνότητα συντονισμού στην περιοχή 67.1-80.5 Hz. Με την προσθήκη του παραπάνω απορροφητή χαμηλών συχνοτήτων τύπου πάνελ και την τοποθέτηση του πορώδους υλικού σε απόσταση 100 mm από τον τοίχο η συνολικός συντελεστής ήχο-απορρόφησης της διάταξης διαμορφώθηκε σύμφωνα με το πιο κάτω διάγραμμα (εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3. Συντελεστές απορρόφησης της διάταξης του επιλεγμένου ήχο-απορροφητικού υλικού μαζί με τον απορροφητή μεμβράνης χαμηλών συχνοτήτων.

1.3 Ακουστικές παράμετροι πριν την προτεινόμενη ακουστική βελτίωση

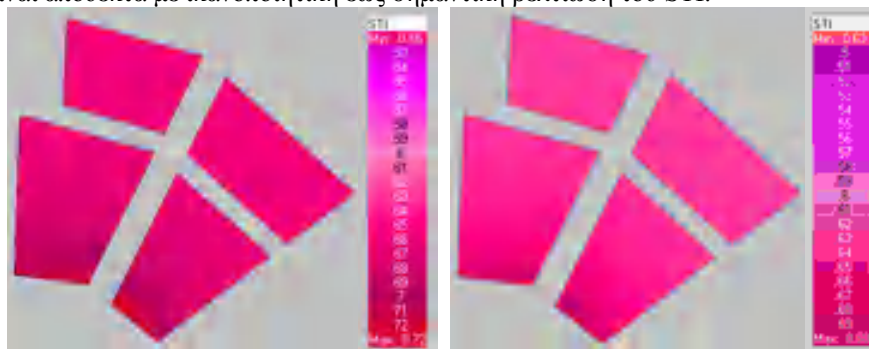
Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 1.4) απεικονίζεται η κατανομή του δείκτη STI στις επιφάνειες που καταλαμβάνει το ακροατήριο για την περίπτωση του αμφιθεάτρου χωρίς καμία ακουστική επένδυση στους τοίχους. Είναι προφανές ότι οι τιμές του STI (0.48-0.52) δεν είναι αποδεκτές.



Εικόνα 1.4. Ο δείκτης STI πριν την εφαρμογή των παρεμβάσεων.

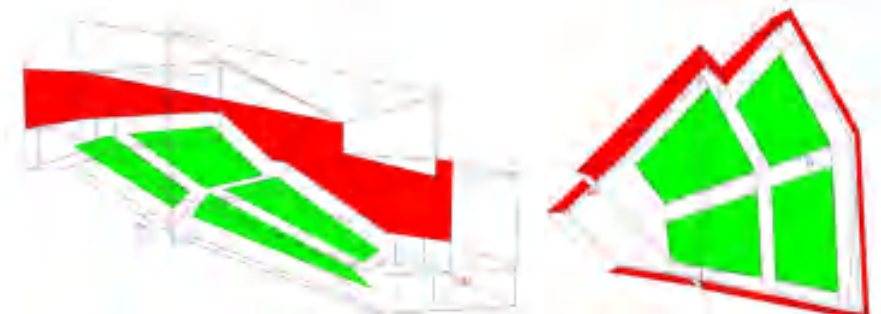
1.4 Ακουστικές παράμετροι μετά την εφαρμογή της ακουστικής βελτίωσης

Για την τοποθέτηση της διάταξης των πάνελ σε συνδυασμό με τους απορροφητές μεμβράνης όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξετάστηκαν δύο επιλογές. Στην εικόνα 1.5. εμφανίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο επιλογές τα οποία είναι αποδεκτά με ικανοποιητική έως σημαντική βελτίωση του STI.



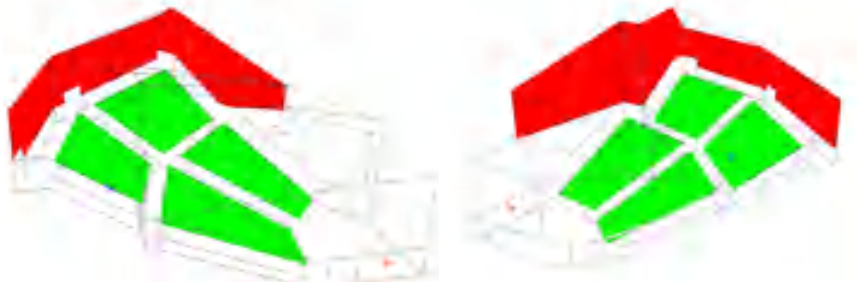
Εικόνα 1.5. Ο δείκτης STI μετά την εφαρμογή των παρεμβάσεων. Δεξιά: Επιλογή 1. Αριστερά: Επιλογή 2.

Η πρώτη προσομοίωση (επιλογή 1 βλέπε εικόνα 1.6) μετά από εφαρμογή ακουστικής βελτίωσης αφορά τοποθέτηση των πάνελ στον τοίχο πίσω από το ακροατήριο και στους δύο πλευρικούς τοίχους από το ύψος των 2 μέτρων έως το ύψος της οροφής. Το συνολικό εμβαδόν των ήχο-απορροφητικών πάνελ: 344 m². Ο δείκτης STI βελτιώνεται σημαντικά με μέγιστη τιμή 0.72 και ελάχιστη τιμή 0.66



Εικόνα 1.6 Η προτεινόμενη τοποθέτηση των πάνελ σύμφωνα με την επιλογή 1.

Η επιλογή 2 (εικόνα 1.7) αφορά την τοποθέτηση των πάνελ από ύψος 1.20 m έως το ύψος της οροφής στον τοίχο πίσω από το ακροατήριο και μόνο στο πίσω μέρος των πλευρικών τοίχων σύμφωνα με την διάταξη του πιο κάτω σχεδίου. Το συνολικό εμβαδόν των ήχο-απορροφητικών πάνελ είναι 230 m². Ο STI είναι και σε αυτή την επιλογή σημαντικά βελτιωμένος με τιμές από 0.63-0.68.



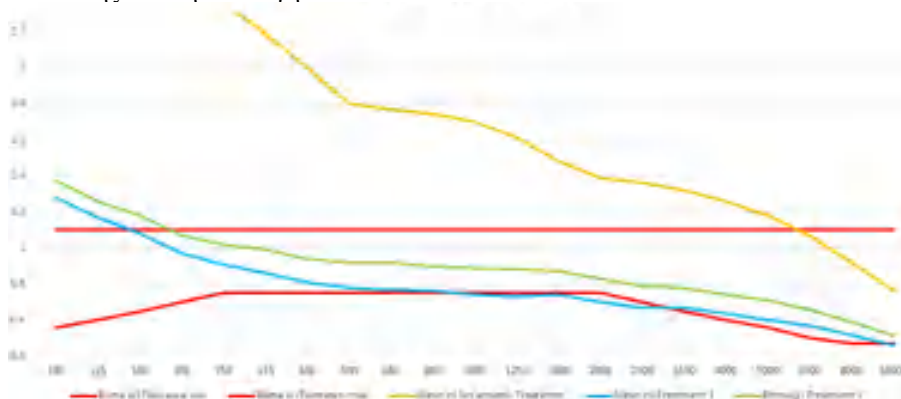
Εικόνα 1.7 Η προτεινόμενη τοποθέτηση των πάνελ σύμφωνα με την επιλογή 2.

Στον πίνακα 1 καταγράφεται η βελτίωση του λόγου απευθείας προς αντηχητικό πεδίο D/R ratio μέσω της βελτίωσης της ακουστικής παραμέτρου Clarity C50 (dB).

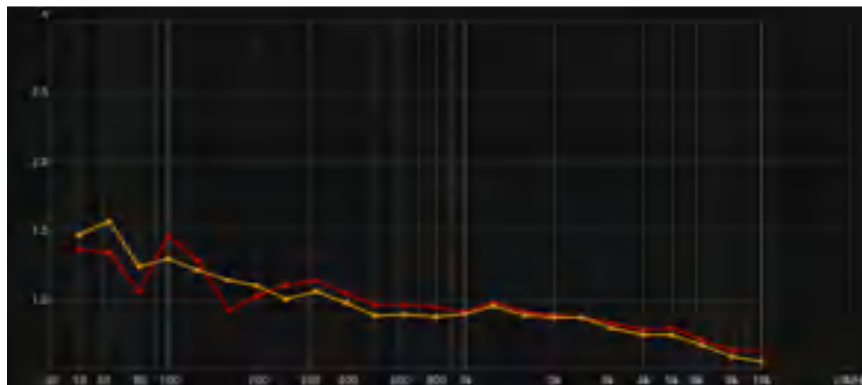
Πίνακας 1. Βελτίωση του Clarity C50 μετά τις παρεμβάσεις.

	MAX Clarity C50 dB	MIN Clarity C50 dB
Πριν τις ακουστικές παρεμβάσεις	-1.2	-3.37
Μετά – επιλογή 1	4.51	1.5
Μετά – επιλογή 2	4.58	0.35

Συγκρίνοντας τους χρόνους αντήχησης (εικόνα 1.8) πριν την εφαρμογή της ακουστικής βελτίωσης (με κίτρινο) και μετά την εφαρμογή (επιλογή 1 – γαλάζιο και επιλογή 2 - πράσινο) και βλέποντας που βρίσκονται τα όρια ανοχών που έχουν τεθεί με κόκκινο συμπεραίνεται ότι: 1. Χωρίς καμία ακουστική παρέμβαση δηλαδή χωρίς καμία επένδυση στους τοίχους ο χρόνος αντήχησης είναι υπερβολικός και φυσικά εκτός ορίων. 2. Η επιλογή 2 υπερέρχει της επιλογής 1 αλλά και οι δύο επιλογές είναι αποδεκτές. 3. Όσο αφορά τον δείκτη STI η βελτίωση που προκύπτει και με τις δύο επιλογές είναι σε αποδεκτά όρια. 4. Η επιλογή 1 απαιτεί μεγαλύτερο εμβαδόν επένδυσης από την επιλογή 2.



Εικόνα 1.8 Συγκριτικά χρόνων αντήχησης από τις προσομοιώσεις.



Εικόνα 1.9 Χρόνοι αντήχησης από τις τελικές μετρήσεις.

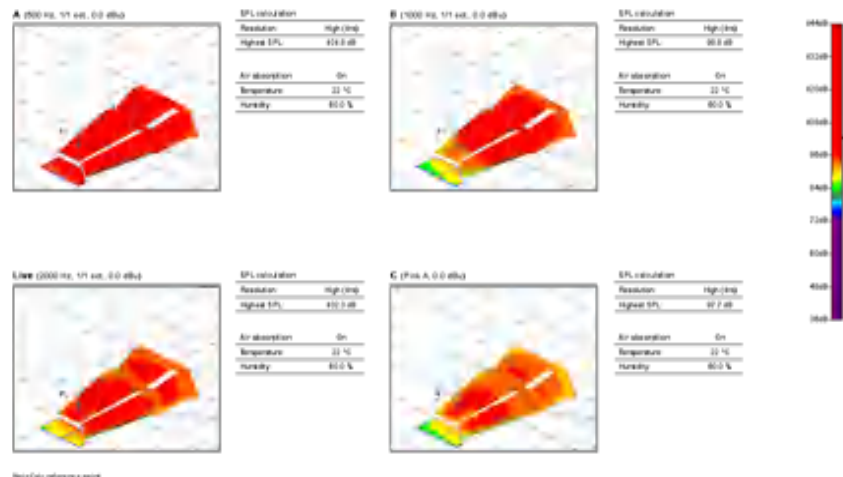


Εικόνα 1.10 Ο χώρος πριν (επάνω) και μετά (κάτω) από τις ακουστικές παρεμβάσεις.

2. Ηλεκτροακουστική Μελέτη

Στο κεντρικό κτίριο της Ιατρικής υπάρχουν 2 αμφιθέατρα (Αμφ.Α & Αμφ. Β) τα οποία εξυπηρετούν 500 και 300 άτομα, αντίστοιχα [5]. Για το αμφιθέατρο Α, στην αρχή προτάθηκαν συστοιχίες ηχητικών πηγών τύπου Array, αλλά λόγω του α) κόστους, β) όγκου και γ) βάρους απορρίφθηκαν. Έτσι η μελέτη τροποποιήθηκε ώστε να εγκατασταθούν ηχεία σημειακής εκπομπής, τα οποία θα καλύπτουν τις απαιτήσεις του τμήματος, δηλαδή α) συνέδρια, β) εκδηλώσεις λόγου με χρήση παρουσίασης από ψηφιακά μέσα. Για την ορθότητα της λύσης και την καταληπτότητα, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μοντελοποίηση του χώρου σε λογισμικό εξομοίωσης του οικείου οίκου [6], ώστε να επιλεγθούν τα κατάλληλα ηχεία. Έτσι προέκυψε η προμελετημένη θέση των

ηχείων, πράγμα το οποίο ήταν σημαντικό για τις κατασκευές στήριξης. Επίσης η λύση εμπεριείχε και τελικούς ενισχυτές αντίστοιχους για τα ηχεία, με προκαθορισμένες ρυθμίσεις για κάθε ένα ηχείο. Με όλα τα παραπάνω θα μπορούσαμε να περιορίσουμε της παραμέτρους αστοχίας, πριν την εγκατάσταση.



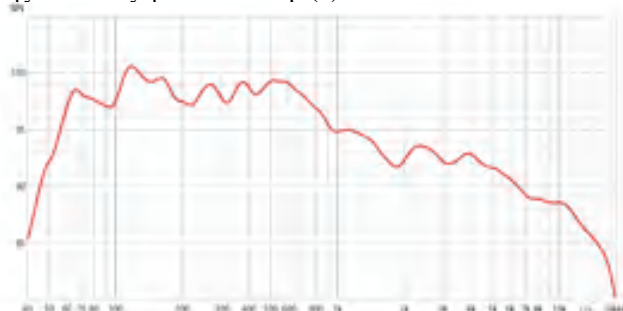
Εικόνα 2.1 D&B app, ArrayCalc. Αρχική πρόταση καταληπτότητα στο συχνотικό εύρος των 500Hz, 1KHz, 2KHz & Pink noise με φίλτρο (A)

Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι το αμφιθέατρο είχε ακανόνιστη γεωμετρία. Η μεγάλη κλίση των καθήμενων, η μη ύπαρξη συμμετρίας και οι γωνίες του ταβανιού, έκαναν την εγκατάσταση ακόμα πιο δύσκολη. Για την ορθότητα της μελέτης και την διόρθωση των θέσεων των ηχείων έπρεπε να γίνουν ακουστικές μετρήσεις κατά την εγκατάσταση.

3. Μετρήσεις

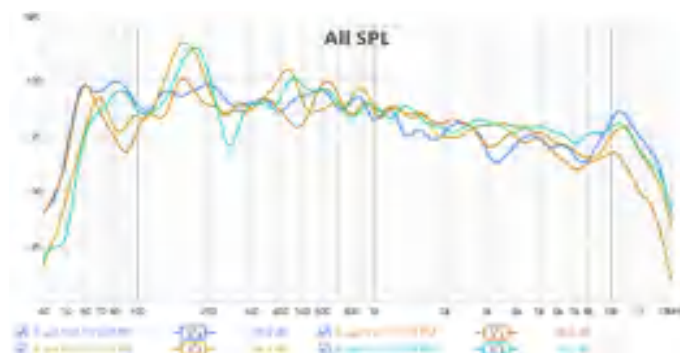
Για να επιτευχθεί η μέγιστη καταληπτότητα στο κοινό, έγιναν μετρήσεις κατά την διάρκεια της εγκατάστασης (21/09/2022). Έγιναν διορθώσεις και επιβεβαίωση της θέσης και της κλίσης των ηχείων, έπειτα έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις, παραμετροποιήσεις στους ενισχυτές. Τα τεχνικά στοιχεία του εξοπλισμού των μετρήσεων κατά την εγκατάσταση ήταν: α) Πηγή LAPTOP με κάρτα ήχου duet (Apogee), β) Ενισχυτές Ισχύος D&B 30D, 4x1600 @40hm γ) 2x ηχεία, D&B 12S-D (ως κύρια ηχεία) δ) 2 x ηχεία, D&B 10S-D. ως ηχεία Delay. ε) Βαθμονομητή Class 2 με Serial No.2304045 και ζ) Μετρητικό Μικρόφωνο DBx RTA M. Οι μετρήσεις έγιναν με την χρήση του λογισμικού Room Eq Wizard [3] σε τέσσερα σημεία στην αίθουσα, on axes μπροστά από κάθε ηχείο, αλλά και στην μέση στον κεντρικό διάδρομο του κοινού. Η ώρα έναρξης των μετρήσεων 11:45π.μ και περατώθηκαν την ώρα 12:45π.μ. Πριν από τις μετρήσεις έγινε βαθμονόμηση και περάστηκε το αντίστοιχο preset στον ενισχυτή για το κάθε ηχείο. Ο θόρυβος Βάθους μετρήθηκε στα 48dBspl(a) (είναι η καταμέτρηση θορύβου χωρίς την χρήση του ηλεκτροακουστικού

συστήματος & χωρίς την χρήση κλιματιστικού). Ενώ με την χρήση κλιματιστικού, ο θόρυβος εντός της αίθουσας ήταν 58.2dBspl(a).



Εικόνα 3.1. Μέτρηση απόκρισης συχνοτήτων στο κέντρο της αίθουσας με σύστημα Telmaco πριν την διαμόρφωση ακουστικής της αίθουσας.

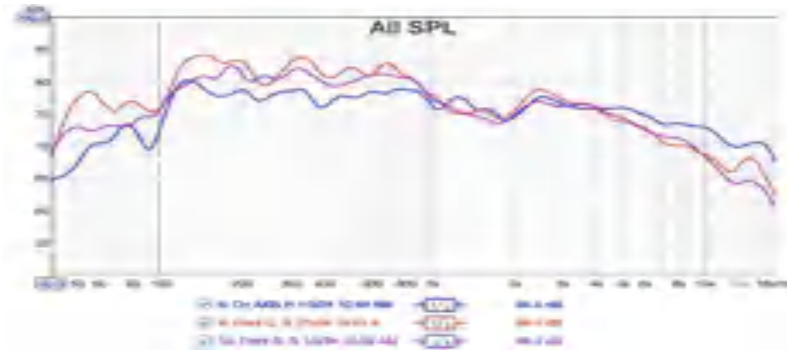
Μετά το πέρας των μετρήσεων έγινε παραμετροποίηση των ενισχυτών, με την χρήση Equaliser αλλά και Delay time. Για να βελτιώσουμε το ηχητικό αποτέλεσμα στον χώρο χρησιμοποιήσαμε “Low Cut” φίλτρο ώστε να περιοριστούν οι χαμηλές συχνότητες αλλά και ένα “Band pass” φίλτρο στην περιοχή των 200 Hz. Επίσης χρησιμοποιήσαμε Delays 15.7 και 17.1 ms, στα αντίστοιχα, ηχεία Sp 3 και Sp 4, τα οποία λειτουργούν πάνω από το ακροατήριο για τους καθήμενους στο πίσω μέρος της αίθουσας.



Εικόνα 3.2. Μέτρηση απόκρισης συχνοτήτων στο σε κάθε ηχείο, συστήματος Telmaco πριν την διαμόρφωση ακουστικής της αίθουσας.



Εικόνα 3.3. Μέτρηση απόκρισης συχνότητων στο διάδρομο μεταξύ μπροστινού και πίσω διαζώματος, συστήματος Telmaco μετά τις ακουστικές παρεμβάσεις.



Εικόνα 3.4. Μέτρηση απόκρισης συχνότητων: 6) On Axis με το ηχείο και 9-10 μπροστινών θέσεων, του συστήματος Telmaco μετά τις ακουστικές παρεμβάσεις

Συμπεράσματα/Παρατηρήσεις

- Έχει μειωθεί, σε συμφωνία με τον αρχικό στόχο, ο χρόνος αντήχησης (RT60) στις χαμηλές συχνότητες από 3,2 σε 1,2 s
- Έχει μειωθεί, σε συμφωνία με τον αρχικό στόχο, ο χρόνος αντήχησης (RT60) στις μεσαίες συχνότητες από 1,5 σε 1-0.9 s
- Είναι απολύτως φυσιολογική η ανομοιογένεια των μετρήσεων, με πιο έντονη στις μπροστά θέσεις του κοινού. Η μη ύπαρξη front field ηχείων επιβάλλει τις υψηλές συχνότητες να παρουσιάζουν μείωση 7dB διαφορά. Αυτό το φαινόμενο βοηθάει την χρήση συνεδριακού συστήματος στις μπροστά σειρές του αμφιθεάτρου.
- Η μέτρηση στην μέση της αίθουσας (διάδρομος) δεν έχει ομοιογένεια. Το αμφιθέατρο χρησιμοποιήθηκαν Eq φίλτρα, και delays, και μειωθήκαν εμφανώς οι έντονες διακυμάνσεις των χαμηλών συχνότητων.

Αναφορές

- [1] Knudsen, V.O. and Harris, C.M. (1988) *Acoustical designing in architecture*. Woodbury: Acoustical Society of America.
- [2] *Amrev - the reverberation time calculator - calculate how much absorption you need amcoustics*. Available at: <https://amcoustics.com/tools/amrev/> (Accessed: 16 October 2024).
- [3] Mulcahy, J. *REW room acoustics and Audio Device Measurement and Analysis Software, Room EQ Wizard Room Acoustics Software*. Available at: <https://www.roomeqwizard.com/> (Accessed: 16 October 2024).
- [4] *EASE 5 Second Edition | Ahnert Feistel Media Group*. Available at: <https://www.afmg.eu/en/ease> (Accessed: 16 October 2024).
- [5] *Οπτικοακουστικές Υποδομές και υπηρεσίες ΑΠΘ* (no date) AUTH IT Center. Available at: <https://avclass.auth.gr/> (Accessed: 16 October 2024).
- [6] *ARRAYCALC* (2024) *d&b audiotechnik*. Available at: <https://www.dbaudio.com/global/en/products/software/arraycalc/> (Accessed: 16 October 2024).



Διερεύνηση των ακουστικών συνθηκών, στον χώρο της Εκκλησίας του Δήμου, στην αρχαία Πνύκα στην Αθήνα, ανάλογα με τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες.

Καραμπατζάκης Παναγιώτης
 Αρχιτέκτων Μηχανικός – Σύμβουλος ακουστικής, Επιστημονικός συνεργάτης
 εργαστηρίου Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας ΑΠΘ
info@nestos.net, pkar38@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει την διαδικασία ανάλυσης και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πρόγνωση ακουστικών παραμέτρων (κυρίως του STI), κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες, του χώρου της Πνύκας στο λόφο του Φιλοπάππου στην Αθήνα, κατά, τις τρεις φάσεις κατασκευής της (I, II και III φάσεις). Πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διεπιστημονικής συνεργασίας, για την κατασκευή χώρου εικονικής, επαυξημένης, πραγματικότητας για εκπαιδευτικούς λόγους, στο τμήμα Rhetoric του Department of Writing Studies, του University of Minnesota-Twin Cities των Η.Π.Α. και αφορούσε την επαφή των φοιτητών με την διαδικασία της ρητορικής, μπροστά σε κοινό, κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και διαφορετική πληρότητα, κατά τα τρία στάδια κατασκευής της Πνύκας.

Εξετάστηκαν 3 διαφορετικές καιρικές καταστάσεις και έγινε σύνδεση των καιρικών συνθηκών (κυρίως του ανέμου) με τον θόρυβο βάθους που καθοριζόταν από αυτές. Η ακουστική ανάλυση των χώρων, έγινε, με το λογισμικό Catt V9/Tuct2 σε 3διάστατα μοντέλα HY. Εξετάστηκε η παράμετρος STI [2], επηρεαζόμενη από τον θόρυβο βάθους ο οποίος καθορίστηκε με μία προσεγγιστική αντιστοίχιση με τις καιρικές συνθήκες, σε δύο καταστάσεις πηγής, μία παράλληλη του διανύσματος aim point της πηγής, προς τον κύριο άξονα του χώρου και μία σε αυτή του διανύσματος aim point κάθετου στον κύριο άξονα του χώρου. Οι ενδιάμεσες γωνίες του διανύσματος aim προέκυψαν από εσωτερική παρεμβολή των δύο ακραίων καταστάσεων.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, απεικονίστηκαν σε χάρτες STI, βαθμολογημένα σε 5 κατηγορίες κατά τα σχετικά πρότυπα [2].

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, πέραν των ακουστικών συμπερασμάτων, προέκυψαν και συμπεράσματα που άπτονται της «στρατηγικής» συμπεριφοράς ενός ρήτορα, στο βήμα και των δυνατικών επιπτώσεων της «στρατηγικής» αυτής, στην πολιτική ή/και την δικαιοσύνη, της περιόδου λειτουργίας της, στην αρχαία εποχή.

Study of the acoustic conditions in the "Ekklesia tou Dimou" area at the ancient Pnyka Hill in Athens, with a focus on the prevailing weather conditions.

ABSTRACT

The present study presents the processing methodology followed and the conclusions derived from the prediction of acoustic parameters (mainly the STI) under special conditions of the Pnyka site on Filopappos Hill in Athens during the three phases of its construction in the ancient era (I, II, and III phases).

It was part of an interdisciplinary collaboration to create a virtual, augmented reality model for educational purposes in the Rhetoric Department of the Department of Writing Studies, University of Minnesota-Twin Cities, USA. It was related to the student's interaction with the rhetoric process in front of an audience under different weather conditions and different audience sizes.

Three (3) different types of weather conditions were examined, and a connection has been established between the various weather conditions (mainly wind speed) and their corresponding background noise.

The acoustic analysis used Catt V9/Tuct2 software in 3D computer models.

The STI parameter has been examined in relation to background noise; the latter has been determined by an approximate correlation with weather conditions for two different source scenarios: in the first case, the source's aim vector is parallel to the central axis of the space, and in the second case, it is perpendicular to the central axis of the space. The results of the intermediate angles of the aim vector were obtained by internal interpolation of the two extremes.

The analysis results were presented on STI maps and graded into five categories according to the relevant standards.

The analysis of the results, in addition to the acoustics-related conclusions, also provided findings related to the "strategic" behaviour of an orator on the stage and the potential effects of this "strategy" in politics and/or justice during the period of its implementation, i.e., during the ancient era.

1. Ιστορικά στοιχεία

Η Πνύκα (λόφος Φιλοπάππου), ένας χαρακτηριστικό και σημαντικό τοπόσημο στην αρχαία Αθήνα, χρησιμοποιήθηκε ως κρίσιμος χώρος για τη συνέλευση των πολιτών στην εποχή της αρχαίας Αθηναϊκής Δημοκρατίας, αντανακλώντας την πολιτική και ρητορική δυναμική της κλασικής Αθήνας.

Οικοδομικά η Πνύκα εξελίχθηκε σε 3 ξεχωριστές φάσεις την Ιη (γύρω στα 500π.χ.) την ΙΙη (γύρω στα 400π.χ.) και την ΙΙΙη (γύρω στα 330π.χ.)

Η σημασία της, υπογραμμίζεται από τον ρόλο του ως τόπου διεξαγωγής της «Εκκλησίας του Δήμου» (Αθηναϊκής Συνέλευσης), όπου οι πολίτες πολλές φορές τον χρόνο, συγκεντρώνονταν για να συζητήσουν και να αποφασίσουν για ζητήματα της Πόλης-Κράτους των Αθηνών και άλλες φορές, στην ίδια τοποθεσία για την συνεδρίαση της Ηλιαίας, προκειμένου να αποδώσει δικαιοσύνη κ.α.

Ο πληθυσμός που συγκεντρωνόταν, ανέρχονταν κατά τις πηγές από 500 μέχρι και 15000.



Εικόνα 1.1 οι 3 φάσεις της Πνύκας φάση I 5^ο αιώνας π.Χ. , φάση II ~404π.Χ. , φάση III 2^ο μισό 4^ο αιώνα. [3]

Τα αρχαιολογικά ευρήματα αποκάλυψαν ότι η Πνύκα δεν ήταν μόνο ένας πολιτικός χώρος αλλά και ένας τόπος τελετουργικής, θρησκευτικής (Katz, 1984) και κοινοτικής ενασχόλησης. Ο λόφος συνδέθηκε με διάφορες αστικές λειτουργίες και χρησίμευε ως χώρος συγκέντρωσης που ενθάρρυνε τη δημόσια ζωή στην Αθήνα . Αυτή η σύνδεση με τις κοινοτικές δραστηριότητες τονίζεται περαιτέρω από την παρουσία συστημάτων διαχείρισης νερού, τα οποία ανακαλύφθηκαν κατά τις ανασκαφές. [7] Η ενσωμάτωση των φυσικών πόρων στο αστικό τοπίο της Αθήνας, ιδιαίτερα στην Πνύκα, απεικονίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος και της αστικής ζωής στην αρχαία Ελλάδα.

Η Πνύκα, παράλληλα με την Αγορά, αντιπροσώπευε την καρδιά της έννοιας της εμπλοκής των πολιτών, όπου λάμβανε χώρα ο δημόσιος λόγος και η λήψη αποφάσεων.

Αυτή η δυαδικότητα της Πνύκας τόσο ως πολιτικού όσο και ως κοινωνικού χώρου υπογραμμίζει τη σημασία της στην ανάπτυξη δημοκρατικών ιδεωδών, τα οποία είχαν μόνιμες επιπτώσεις στους δημόσιους χώρους σε σύγχρονα πλαίσια.

Συνοπτικά, η Πνύκα αποτελεί μαρτυρία των δημοκρατικών πρακτικών της αρχαίας Αθήνας, που χαρακτηρίζεται από τα αρχιτεκτονικά της χαρακτηριστικά που υποστήριζαν τη δημόσια ρητορική, τον ρόλο της στις κοινοτικές διεργασίες και τη σημασία της ως «τόπος συμμετοχής» των πολιτών. [8]

Τα αρχαιολογικά στοιχεία και τα ιστορικά κείμενα δείχνουν πώς ο συγκεκριμένος λόφος ήταν κεντρικός στον πολιτικό και κοινωνικό ιστό της αθηναϊκής ζωής, διαμορφώνοντας την κουλτούρα που θα επηρέαζε τη δημοκρατική σκέψη για τους επόμενους αιώνες. [9]

2. Σχετικά με το project «BEMA».

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παρούσα έρευνα αποτελεί ένα μικρό τμήμα της συνολικής έρευνας / ανάπτυξης του «ψηφιακού εργαλείου», «BEMA» [5] στα πλαίσια διεπιστημονικής, διαπανεπιστημιακής, συνεργασίας, για την κατασκευή χώρου εικονικής ή/και επαυξημένης, πραγματικότητας για εκπαιδευτικούς λόγους, στο τμήμα Rhetoric του Department of Writing Studies, του University of Minnesota-Twin Cities των Η.Π.Α. και αφορούσε την επαφή των φοιτητών με την διαδικασία της ρητορικής, μπροστά σε κοινό, με μαθηματικούς αλγόριθμους πλήρωσης, επιλογή αρχιτεκτονικής φάσης, κλιματολογικών συνθηκών (3 επίπεδα ανέμου, Calm – light air, Moderate breeze, Strong breeze)¹.

Η συμμετοχή του συγγραφέα του παρόντος άρθρου, συνέβη κατά την 2^η από τις 3 φάσεις του προγράμματος “BEMA”.



Εικόνα 2.1 και 2.2 ο ομιλητής βλέπει την απεικόνιση του χάρτη STI και Εικόνα 2.2 Ο ομιλητής βλέπει το κοινό. Κατά την ομιλία του ομιλητή, καταγράφεται το ποσοστό (σε χρόνο και σε μέσο όρο) των ακροατών που άκουσαν την ομιλία στα 5 επίπεδα STI [3]

Ένα από τα ζητούμενο της εφαρμογής «BEMA» ήταν η χαρτογράφηση της καταληπτότητας που αντιστοιχεί στις περιοχές ακρόασης ενώ ο ομιλητής κινείται στο βήμα ή στρέφει τους 3 άξονες της κεφαλής του (συνολικά 6 βαθμοί ελευθερίας της κεφαλής), σε ανάλογες κατευθύνσεις.

Κατά τον χειρισμό του “BEMA” ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις 3 φάσεις κατασκευής του χώρου, τον πληθυσμό (με διαφορετικά μοντέλα πλήρωσης και τις καιρικές συνθήκες).

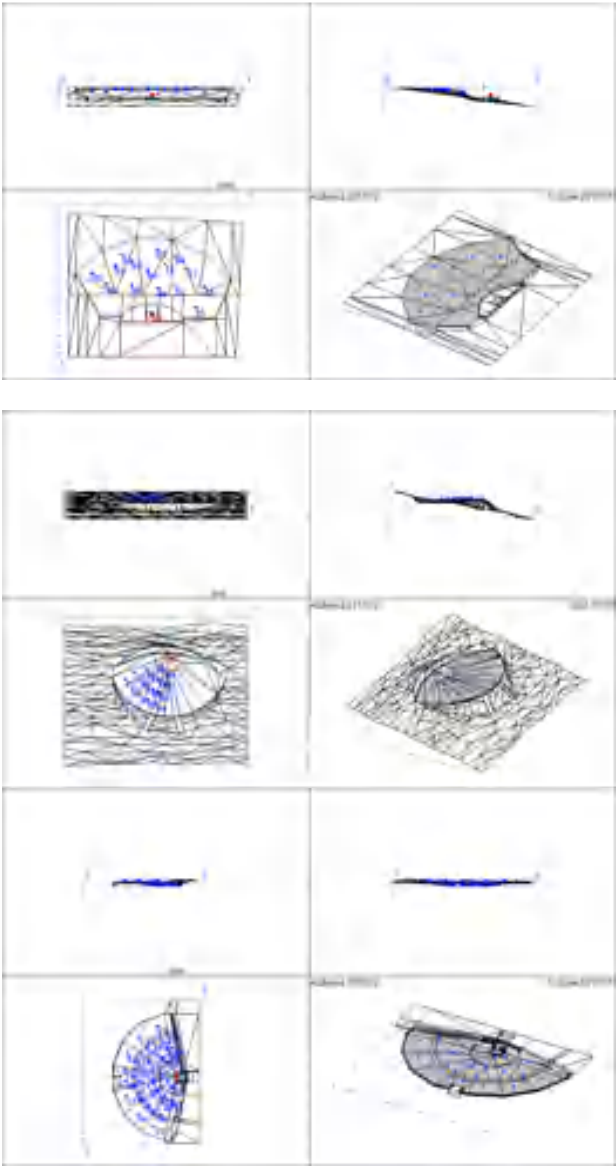
Από τους υπολογισμούς του τρισδιάστατου μοντέλου προέκυψαν τιμές σε κάναβο 1x1m για όλη την πλατεία ακρόασης της Πνύκας για τις δύο γωνίες πηγής. Οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη αφορούν όλο τον χώρο της πλατείας, γεμάτο, από ακροατές (1.04 άτομα/m²).

Η εκπαιδευτική αποστολή του έργου «BHEMA» είναι να δώσει στους φοιτητές την εμπειρία της αγόρευσης μπροστά σε μεγάλο κοινό, για μεγάλα χρονικά διαστήματα (πχ 30 λεπτών ή μίας ώρας) και τις δυσκολίες ή τα κέρδη που μπορεί να προκύψουν κατά την διαδικασία. [10].

3. Το υπολογιστικό μοντέλο της ακουστικής

3.1 Σχετικά με το μοντέλο

Αρχικά σχεδιάστηκαν τα μοντέλα των 3^{ων} φάσεων κατασκευής της Πνύκας, κατά το πρωτόκολλο που απαιτεί το λογισμικό Catt/Tuct [6] και εξήχθησαν τα 3 ακουστικά γεωμετρικά μοντέλα (GA). Για τον σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκαν οι σχεδιαστικές προτάσεις που προκύπτουν από στοιχεία της αρχαιολογικής έρευνας και δυνητικά, ίσχυαν κατά τον χρόνο και την φάση λειτουργίας του χώρου. Τα στοιχεία αυτά προτείνουν δεδομένα τα οποία διαφέρουν από την σημερινή γεωμετρία του χώρου. Ο σχεδιασμός των τριών φάσεων βασίστηκε στα στοιχεία αυτά.



Εικόνα 3.1 το μοντέλο της φάσης I, II και III

Τα υλικά και οι συντελεστές α (ανά 1/3 οκτάβας, 125Hz-4KHz) που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

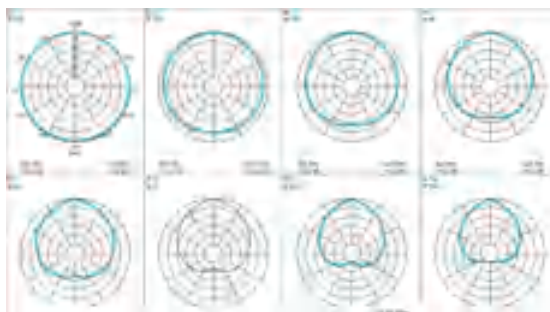
	125	250	500	1K	2K	4K
Λαξευμένο Μάρμαρο	3	3	3	5	7	5
Χώμα ²	15	25	40	55	60	60

Ακατέργαστος βράχος	2	3	4	5	4	3
Ακροατήριο (1,04άτομα/m ²) [1]	16	29	55	80	92	90
Χτισμένη πέτρα	3	3	3	5	7	5

Οι τρεις παραπάνω φάσεις I, II, και III επεξεργάστηκαν, με 0% και με 100% πληρότητα, με την πλατεία του χώρου να υπολογίζεται έχοντας την ακουστική απορρόφηση ακροατηρίου ή/και χώματος. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται ο χώρος υπολογισμένος πλήρως από ακροατήριο.

Σημειώνεται ότι οι συντελεστές απορρόφησης α του χώματος πλησιάζουν αυτές του ακροατηρίου. (Evans, 1940)

Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατευθυντική και εξομοίωνε στην εκπομπή ανθρώπου που ομιλεί παράλληλα με το έδαφος κειτόντας μπροστά.



Εικόνα 3.2 Τα πολικά γραφήματα της πηγής σε οριζόντια και κατακόρυφη κατανομή, ανά συχνότητα.

Η στάθμη της πηγής καθορίστηκε στην κατάσταση Natural, Loud κατά τις οδηγίες του ANSI S3.5 δηλαδή σε στάθμες L_{p1m_a} : 58,0 64,0 70,3 70,7 65,9 59,9 48,9 37,8 dB(A) (125-16k Hz).

Εξετάστηκε η παράμετρος STI [2] και ταξινομήθηκε σε 5 χαρακτηριστικές περιοχές (Excellent, Good, Fair, Poor, Bad) κατά το πρότυπο και τα αποτελέσματα προέκυψαν σε μορφή χάρτη κατανομής, πίνακα (που αντιστοιχεί σε χωρική κατανομή κανάβου 1x1m) και γραφήματος στατιστικής κατανομής.

3.2 Σχετικά με τις συνθήκες περιβάλλοντος των υπολογισμών.

Η παράμετρος STI επηρεάζεται καθοριστικά από τον θόρυβο βάθους, και υποδεικνύει την καταληπτότητα σε κάποιο δέκτη, συνυπολογίζοντας τον θόρυβο βάθους της περιοχής

Προκειμένου να αναλυθούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες που δυνητικά επικρατούσαν κατά την χρήση του χώρου της Πνύκας, έγιναν οι παρακάτω παραδοχές.

Ως καθοριστικότερο καιρικό στοιχείο, που ταυτόχρονα επιτρέπει την χρήση του χώρου, θεωρήθηκε ο άνεμος.

Από την εμπειρία είναι γνωστό πως οι στάθμες θορύβου που προκύπτουν από τις ριπές του ανέμου σε ελεύθερο φυσικό περιβάλλον, προέρχονται, κυρίως από την διάδραση των ριπών με τα στοιχεία του περιβάλλοντος παρά από τις ίδιες τις ριπές του ανέμου και στις περισσότερες περιπτώσεις, καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά

πρόσπτωσης στον τελικό αισθητήρα (π.χ. αυτί ή μικρόφωνο) . Για τον παραπάνω λόγο, μία γενική σχέση της έντασης ή της ταχύτητας του ανέμου είναι πολύ δύσκολο, αν όχι ακατόρθωτο, να συνδεθεί απόλυτα, με την στάθμη θορύβου που παράγει, μιας και η στάθμη θορύβου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του χώρου όπως π.χ. η γεωμετρία, τα υλικά, η βλάστηση, το ανάγλυφο κλπ αλλά και από τα χαρακτηριστικά των ριπών.

Για να ξεπεραστεί το παραπάνω πρόβλημα, υιοθετήθηκε μία εμπειρική γενικότητα η οποία δέχεται τρεις στάθμες ανέμου [4], α) Calm – light air (0-2 Beaufort), β) Moderate breeze (4-5 Beaufort), γ) Strong breeze (>6 Beaufort), συνδεδεμένες (εμπειρικά) με τρεις στάθμες θορύβου, για την ένταση ανέμου α) <30dB(A) , για την β) <43dB(A) και για την γ) <50dB(A). Η παραπάνω αντιστοίχιση ενδεχόμενα να διαφέρει αν μετρηθεί σε διαφορετικά σημεία, αλλά σε κάθε περίπτωση δίνει μία κλίμακα εντάσεων η οποία είναι πρόσφορη για συγκριτικά συμπεράσματα.

Εξαιτίας του τεράστιου όγκου αποτελεσμάτων, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται χαρακτηριστικά δείγματα.

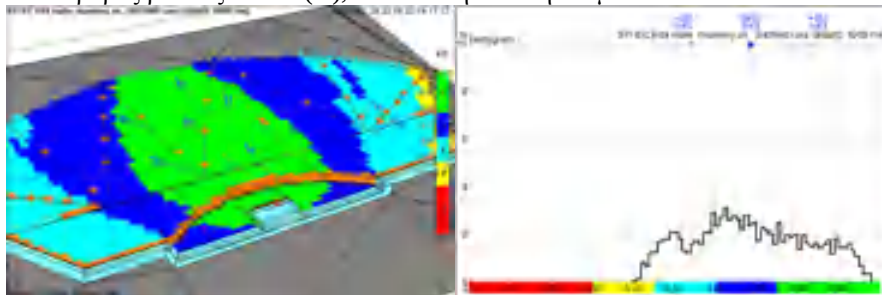
4. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης.

Μετά από την επεξεργασία των 3^{ων} ακουστικών γεωμετρικών μοντέλων μέρος των αποτελεσμάτων παρουσιάζετε παρακάτω. Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται, στους μέν χάρτες η κατανομή των τιμών STI στον χώρο της πλατείας κάθε φάσης και ακριβώς δίπλα η στατιστική κατανομή των τιμών STI.

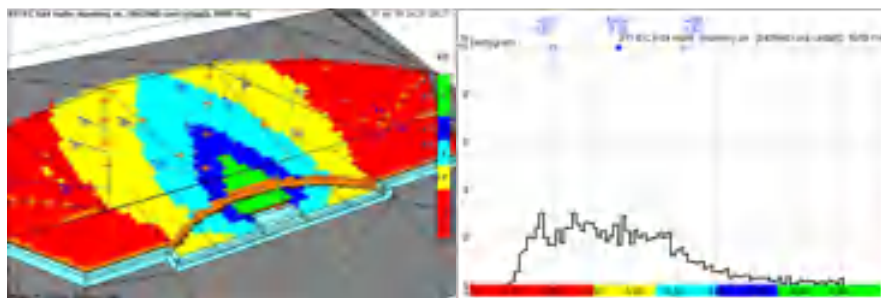
Φάση I (πληθυσμός 2400 άτομα, μέγιστος έως 4800 άτομα)³

Κατεύθυνση πηγής πάνω στον κύριο άξονα.

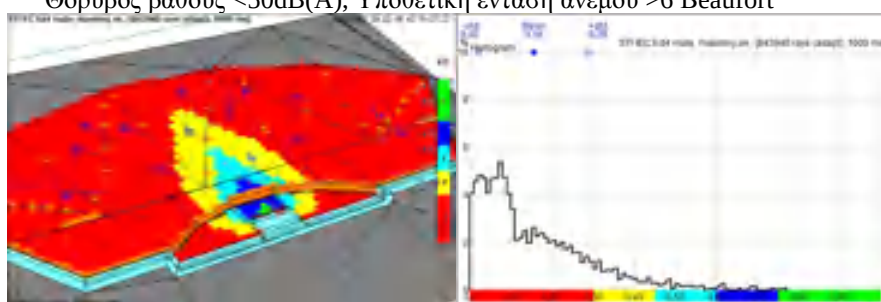
Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort



Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort

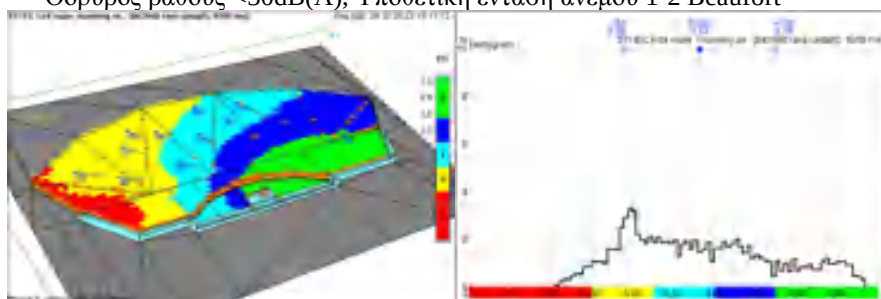


Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort

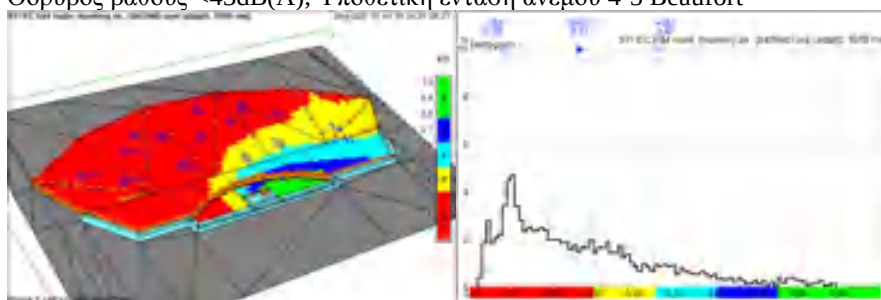


Κατεύθυνση πηγής 90° από τον κύριο άξονα.

Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort

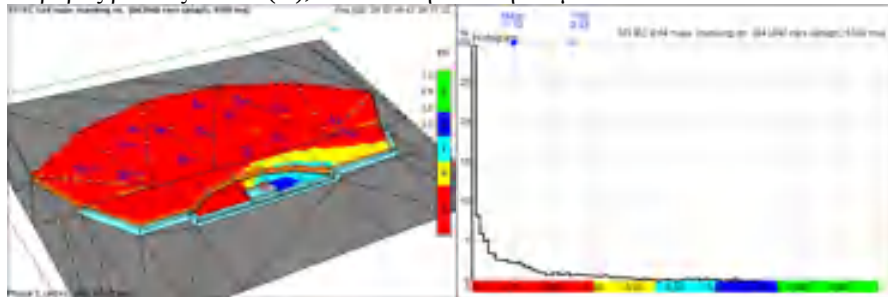


Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort



Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort

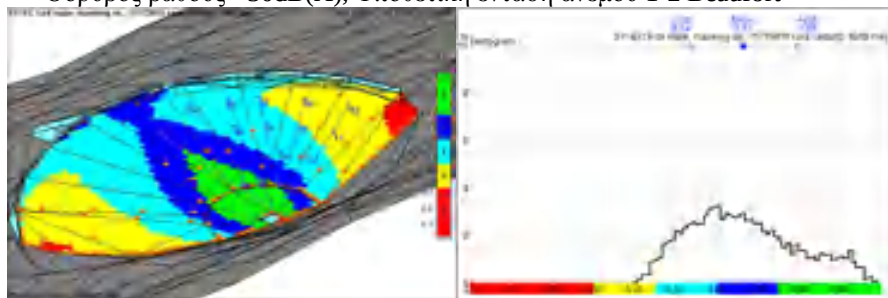
Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort



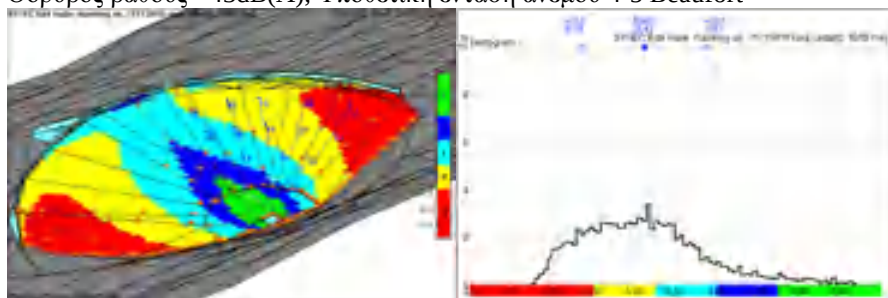
Φάση II (πληθυσμός 2500 άτομα, μέγιστος έως 5000 άτομα)²

Κατεύθυνση πηγής πάνω στον κύριο άξονα.

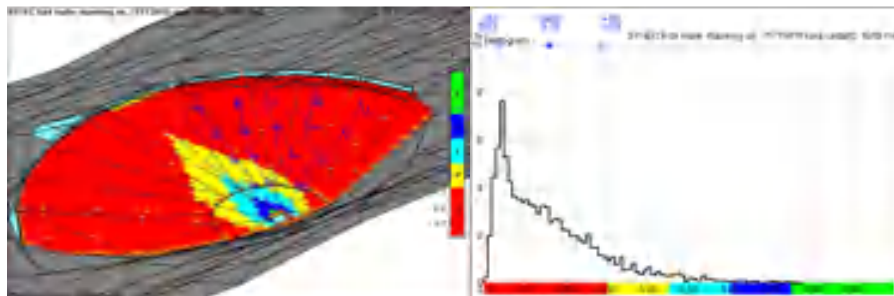
Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort



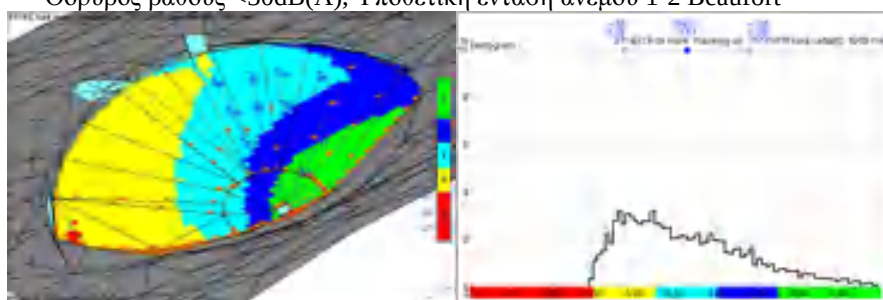
Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort



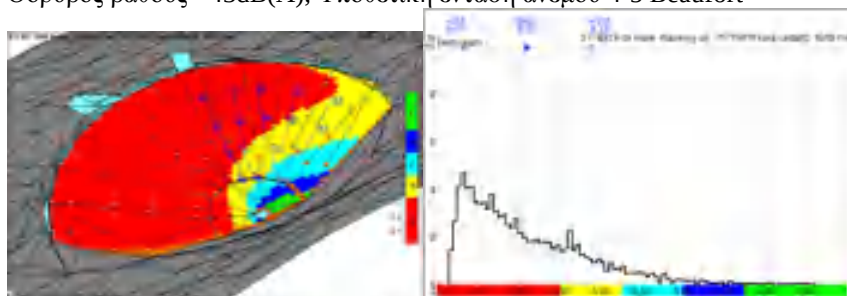
Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort



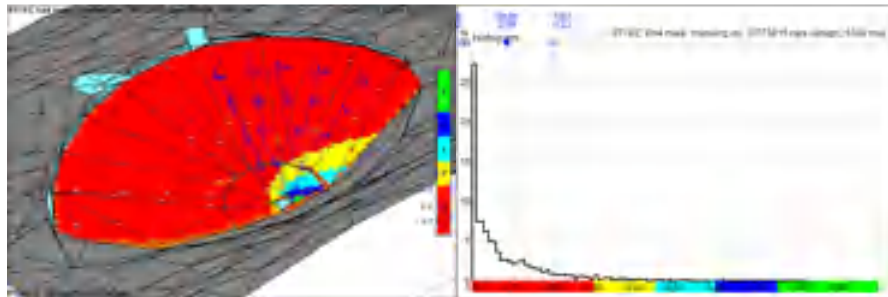
Κατεύθυνση πηγής 90° από τον κύριο άξονα.
Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort



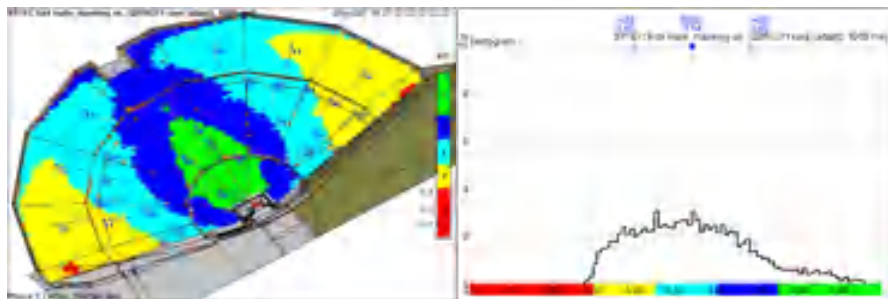
Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort



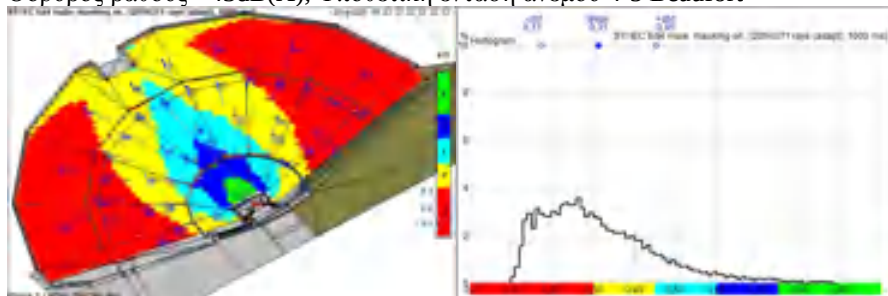
Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort



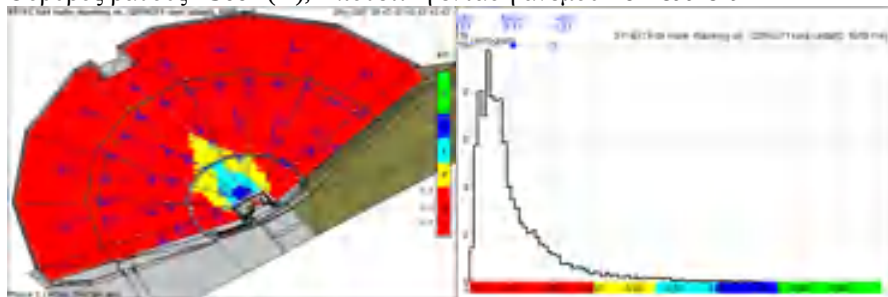
Φάση III (πληθυσμός 5500 άτομα, μέγιστος έως 11000 άτομα)²
 Κατεύθυνση πηγής πάνω στον κύριο άξονα.
 Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort



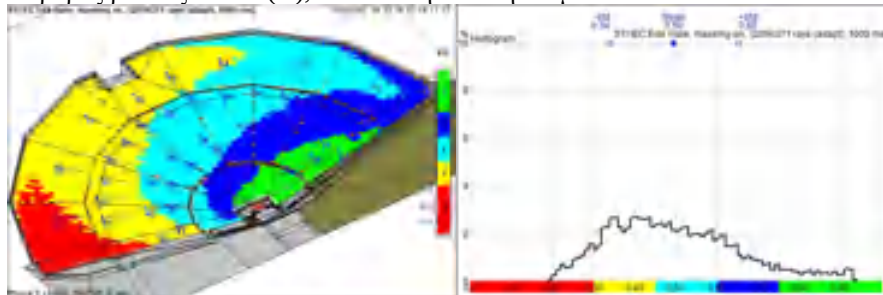
Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort



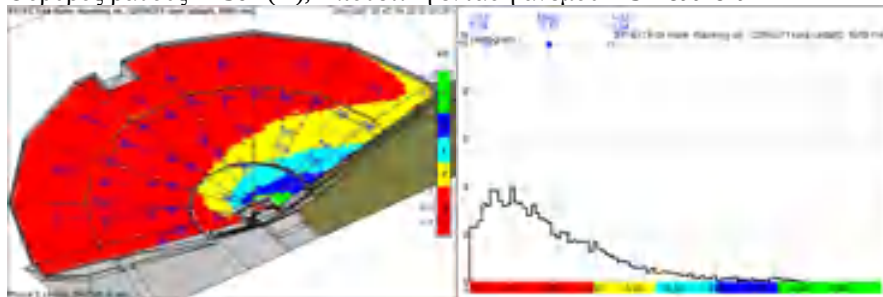
Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort



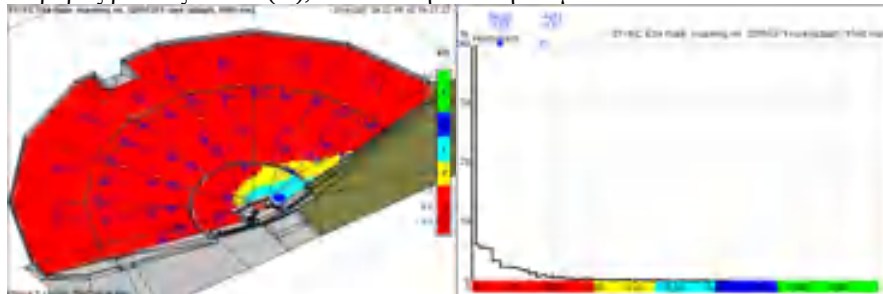
Κατεύθυνση πηγής 90° από τον κύριο άξονα.
Θόρυβος βάθους <30dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 1-2 Beaufort



Θόρυβος βάθους <43dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου 4-5 Beaufort



Θόρυβος βάθους <50dB(A), Υποθετική ένταση ανέμου >6 Beaufort



5. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Στην περίπτωση της Φάσης I, όπου ο μακρύτερα ευρισκόμενος ακροατής βρίσκεται περίπου στα 40m, σε περίπτωση θορύβου βάθους <30dB(A) φαίνεται από τα αποτελέσματα ότι το STI θα κινηθεί σε επίπεδα άνω του 0,50 (σαν συνολικό ποσοστό ταξινόμηση ως Excellent, Good, Fair, κατά IEC to 60268-16) σε ποσοστό των ακροατών περίπου 82%, ενώ για την περίπτωση του θορύβου βάθους με τιμές <43dB(A) το ποσοστό μειώνεται σε περίπου 6%. Στην περίπτωση του θορύβου βάθους <50dB(A) το ίδιο ποσοστό μειώνεται δραματικά στα 0,4% και με βεβαιότητα

είναι φανερό πως ο χώρος είναι ακατάλληλος για ομιλία πέραν ελάχιστης περιοχής γύρω από τον ομιλητή.

Στις περιπτώσεις με θόρυβο βάθους 43 η 50 dB(A) είναι βέβαιο ότι για να συμμετέχει όλο το ακροατήριο με συνθήκες αποδεκτής καταληπτότητας πρέπει να γίνει χρήση κηρύκων ή εργαλείων στοιχειώδους φυσικής ενίσχυσης (πχ χωνιά κλπ.)

Στην περίπτωση της Φάσης II όπου ο μακρύτερα ευρισκόμενος ακροατής βρίσκεται σε απόσταση περίπου 55m, στην περίπτωση της πηγής πάνω στον άξονα και με θόρυβο βάθους <30dB(A), υπολογίζεται STI >0,50 σε 91% των ακροατών. Κατά όμοιο τρόπο με την προηγούμενη περίπτωση, το STI μειώνεται δραματικά στις περιπτώσεις θορύβου βάθους <43 και <50dB(A) για STI<60% σε ποσοστό περίπου 27% και 2.2% αντίστοιχα)

Στην περίπτωση της Φάσης III όπου ο μακρύτερα ευρισκόμενος ακροατής βρίσκεται σε απόσταση περίπου 65m, στην περίπτωση της πηγής πάνω στον άξονα και με θόρυβο βάθους <30dB(A), υπολογίζεται STI >0,50 σε περίπου 59% των ακροατών. Κατά όμοιο τρόπο με την προηγούμενη περίπτωση, το STI μειώνεται δραματικά στις περιπτώσεις θορύβου βάθους <43 και <50dB(A) για STI<60% σε ποσοστό περίπου 6% και 0.7% αντίστοιχα.

Για την περίπτωση του ομιλητή που είναι στραμμένος 90° σε σχέση με τον άξονα τα ποσοστά του STI που είναι >0,60 είναι (Αnon., χ.χ.) δυσμενέστερα.

Φάση I: Για την περίπτωση του θορύβου βάθους <30dB(A) είναι περίπου 57%, για την περίπτωση θορύβου βάθους <43dB(A) είναι περίπου 17% και για την περίπτωση θορύβου βάθους <50dB(A), είναι 3%

Φάση II: Για την περίπτωση του θορύβου βάθους <30dB(A) είναι περίπου 51%, για την περίπτωση θορύβου βάθους <43dB(A) είναι περίπου 5.4% και για την περίπτωση θορύβου βάθους <50dB(A), είναι 0,6%

Φάση III: Για την περίπτωση του θορύβου βάθους <30dB(A) είναι περίπου 45%, για την περίπτωση θορύβου βάθους <43dB(A) είναι περίπου 5% και για την περίπτωση θορύβου βάθους <50dB(A), είναι 1,1%.

Ποσοστό (%) STI > 0.5 ανά θέση			
	Φάση I	Φάση II	Φάση III
On axis BG<30dB(A)	81,6	91	58,8
On axis BG<43dB(A)	5,9	27	5,6
On axis BG<50dB(A)	0,4	2,2	0,7
90 off axis BG<30dB(A)	56,9	50,6	44,6
90 off axis BG<43dB(A)	17,3	5,4	4,8
90 off axis BG<50dB(A)	3	0,6	1,1

Μέγιστη απόσταση Πηγής δέκτη σε m	40	55	65

Τέλος θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι ακουστικές αδυναμίες του χώρου της Πνύκας, σε όλες τις οικοδομικές φάσεις της, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν από τους ομιλητές, ώστε περιοχές με μεγάλη ακουστική δυσμείνεια να συμμετέχουν «παθητικά» ή «κατευθυνόμενα». Επίσης μπορεί να ειπωθεί (κάτι που είναι γνωστό

και από αρχαιολογικές πηγές) ότι οι «σύνεδροι» γνωρίζοντας τις «ακουστικές» αδυναμίες του χώρου. Λάμβαναν θέσεις τέτοιες ώστε, τα δρόμενα στην Πνύκα, να μην τους αγγίζουν. Άλλωστε είναι γνωστό ότι πολλοί από αυτούς, λαμβάναν μέρος είτε μετά από «παρότρυνση» (ας θυμηθούμε τους φύλακες με τα σκοινιά βουτηγμένα σε κόκκινη μπογιά), είτε για να εξασφαλίσουν το ημερομίσθιο, είτε να για να βρεθούν με τους φίλους τους, ώστε να παίξουν τρίλιζα, σε κάποια από τις πολλές χαραγμένες που έχουν βρεθεί στον χώρο.

Αναφορές

Αναφορές

- [1] Evans, G W C Kaye and E J. «The sound-absorbing properties of some common out-door materials.» *Proc. Phys. Soc.* 52 371, 1940.
- [2] «IEC 60268-16 - Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.» *International Electrotechnical Commission*. International Electrotechnical Commission, 2020.
- [3] Bret , Jackson, και συν. «Bema: A Multimodal Interface for Expert Experiential Analysis of Political.» *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* , 2015.
- [4] Katz, Eli Joel. «A note on indirect wind speed measurements from ambient noise.» Στο *Geophysical Research Letters*. AGU, 1984.
- [5] Kyungyoon Kim, Bret Jackson, Ioannis Karamouzas, Moses Adeagbo, Stephen J. Guy, Richard Graff, Daniel F. Keefe. «Bema: A Multimodal Interface for Expert Experiential Analysis of Political Assemblies at the Pnyx in Ancient Greece.» DOI:10.1109/3DUI.2015.7131720, 2015.
- [6] Manual, Catt Acoustics - CATT/TUCT User. «www.catt.se.» 1996-2024. www.catt.se.
- [7] Olga Dakoura Vogiatzoglou, Maria Dourou. *Searching for Water in the Sanctuaries of the Western Hills of Athens*. Archeologys Mediterraneennes, 2019.
- [8] Serafim, A. *EVISITING THE HILL OF PNYX: THE PHYSICAL, RHETORICAL, AND SOCIOCULTURAL CONTEXTS*. DOI: 10.51204/Anali_PFBU_23101A, 2023.
- [9] Υπουργείο Πολιτισμού, *Οδυσέας*. 2012.
http://odysseus.culture.gr/h/3/gh352.jsp?obj_id=2580. (Graff, et al. 2017)
- [10] Graff R., Jackson B., Kyungyoon K., Keefe D., Karampatzakis P. Johnstone C., Digital Modeling, Interactive Visualization, and the Oratorical Performance Spaces of Ancient Greece. DH2017, Carleton Minneapolis USA, 2017.

¹ Calm – light air (0-2 Beaufort), Moderate breeze (4-5 Beaufort), Strong breeze (>6 Beaufort):

² Η υποθετική διάρθρωση είναι Μαλακό χώμα 10cm πάνω από συμπαγές έδαφος. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης με χώμα δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

³ Προκύπτει από την σχέση 2άτομα/m²



Ακουστική μελέτη και βελτίωση studio ηχογραφήσεων και μουσικής εξάσκησης

Ιωάννης Αράπκουλες
Φυσικός
MSc Acoustics, ΑΣΠ-ΕΑΠ
john.arapkoules@gmail.com

Γεώργιος Καλλίρης
Καθηγητής ΑΠΘ
ΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ
gkal@jour.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την ακουστική μελέτη ενός υπάρχοντος χώρου μουσικής εξάσκησης και ηχογραφήσεων (studio). Επιχειρήθηκε η αξιολόγηση της υφιστάμενης ηχομόνωσης του χώρου και της εσωτερικής ακουστικής του. Προέκυψαν αποτελέσματα, με βάση τα οποία προτείνονται χρήσιμες παρεμβάσεις βελτίωσης της ακουστικής του συμπεριφοράς. Ως μελέτη περίπτωσης, θα μπορούσε να αποτελέσει έναν οδηγό για παρόμοιες μελέτες.

Acoustic study and improvement of a recording studio

ABSTRACT

This work is the acoustic study of an extant music practicing and recording studio. Evaluation of its current soundproofing and its internal acoustics is attempted. Interesting results arose according to which, useful modifications are suggested over its acoustic properties. As a case study, it could provide a guide for similar works.

Εισαγωγή

Ενώ υπάρχουν πολλές έρευνες και αναφορές σχετικά με την ακουστική που πρέπει να έχει το δωμάτιο ελέγχου, σε ένα studio ηχογραφήσεων ή εξάσκησης, φαίνεται ότι είναι λίγες οι επιστημονικές μελέτες γύρω από την ακουστική του κυρίως χώρου, χωρίς να διακρίνονται εύκολα κάποια γενικώς παραδεκτά πρότυπα.

Ο Everest [1] εξηγεί ότι ο ιδανικός χρόνος αντήχησης εξαρτάται από το είδος της μουσικής που παίζεται σε ένα studio. Ο διαχωρισμός των οργάνων, που απαιτείται στη μίξη, οδηγεί σε προτιμητέους χρόνους αντήχησης μικρότερους από ότι σε μια αίθουσα μουσικής. Επισημαίνει ακόμη ότι σύμφωνα με έρευνες, είναι συνήθως αποδεκτή μια αύξηση του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στις υψηλές συχνότητες ο έλεγχός του είναι εύκολος ακόμη και με κινούμενες επιφάνειες όπως κουρτίνες. Οι Shea & Everest [2] αναλύουν ότι η εφαρμογή της έννοιας του χρόνου αντήχησης σε μικρά studio μπορεί να είναι μόνο ενδεικτική, αφού προϋποθέτει το ηχητικό πεδίο να είναι διάχυτο, γεγονός σπάνιο σε ένα μικρό χώρο. Η ακουστική του καθορίζεται κυρίως από την απόσβεση των συντονισμών που διεγείρονται από την παραγόμενη μουσική. Ο Walker [3] στο εγχειρίδιο για τα studio του BBC, προτείνει κάποιους χρόνους αντήχησης, ανάλογα με το είδος της μουσικής, μαζί με τις αντίστοιχες ανοχές. Ο Voelker [4] προτείνει για τα διάφορα

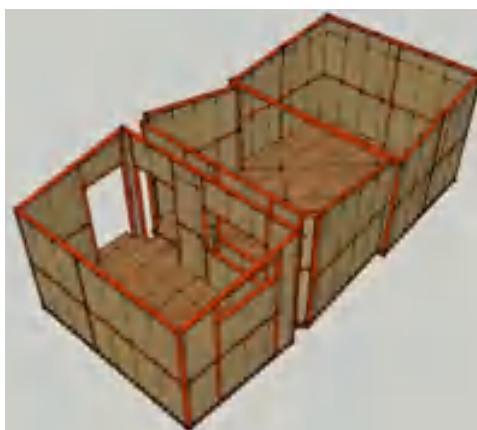
είδη μουσικής διαφορετικούς χρόνους αντήχησης με διαφορετική φασματική κατανομή. Ο Newell [5] εξηγεί ότι η ίδια η ηχομόνωση συνήθως χειροτερεύει την ακουστική του δωματίου, αφού εγκλωβίζει την ηχητική ενέργεια, καθιστώντας τους συντονισμούς αντονότερους, ενώ προτείνει το «ουδέτερο» (neutral) δωμάτιο, ως αυτό που δίνει αρκετή «ζωντάνια» στα όργανα ώστε να αναδεικνύεται ο χαρακτήρας του καθενός οργάνου. Ο Long [6] θεωρεί ότι ένας καλός χώρος ηχογράφησης πρέπει να έχει πολύ ησυχία (NR10-15), αρκετή ηχομόνωση, έλλειψη ακουστικών λαθών (πολλαπλή ηχώ), ικανή απορρόφηση (συχνά μεταβλητή), λογική διάχυση, απομονωμένους χώρους για ηχογράφηση, οπτική επαφή με το δωμάτιο ελέγχου, έλεγχο της αντήχησης των μπάσων και των συντονισμών.

Σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη ηχομόνωση, επίσης δεν φαίνεται να υπάρχουν κοινά αποδεκτά πρότυπα, αλλά εξαρτάται από τις ηχητικές στάθμες που επικρατούν μέσα και έξω από το χώρο. Ο Newell θεωρεί ως ελάχιστη αποδεκτή ηχομόνωση $D=75\text{dB}$ (αν το studio βρίσκεται σε οικιστικό περιβάλλον με περιβαλλοντικό θόρυβο 35dB και εξυπηρετεί φυσικά τύμπανα που παράγουν στάθμη έως 110dB), ενώ ο Long προτείνει την εξασφάλιση 45dB στα όρια της ιδιοκτησίας.

Η ακουστική αξιολόγηση, λοιπόν, ενός studio, με επιστημονικούς όρους, απαιτεί την αποδοχή κάποιων επιθυμητών παραμέτρων (μέσω βιβλιογραφικής επισκόπησης), την αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης (μέσω μετρήσεων και υπολογισμού μεγεθών από εξισώσεις και λογισμικά) και τη σύγκριση των επιθυμητών με τα μετρημένα - υπολογισμένα μεγέθη.

1. Ο χώρος

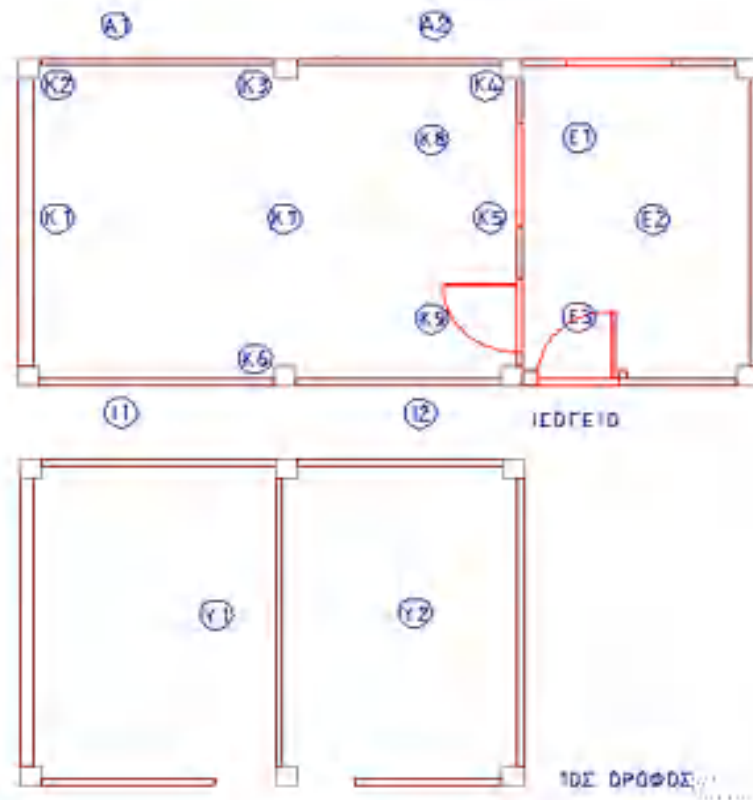
Ο εξεταζόμενος χώρος (Σχ. 1.1) βρίσκεται στο ισόγειο πολυκατοικίας σε ήσυχη αστική περιοχή. Έχει διαστάσεις εσωτερικά $6 \times 4 \times 2,6\text{m}$ και εφάπτεται στο δωμάτιο ελέγχου. Αποτελείται από εξωτερικό κέλυφος συνηθισμένων δομικών υλικών και εσωτερικό κέλυφος από διπλή γυψοσανίδα και ξύλο, προσαρμοσμένο σε ενιαίο μεταλλικό σκελετό. Οι απέναντι επιφάνειες του εσωτερικού κελύφους είναι γενικά μη παράλληλες, ενώ μεταξύ των κελυφών υπάρχει ηχοαπορροφητικό υλικό. Ο εξαερισμός γίνεται με αξονικούς ανεμιστήρες, έναν εισόδου και έναν εξόδου αέρα για κάθε δωμάτιο, οι οποίοι βρίσκονται σε εξωτερικό αύλειο χώρο.



Σχήμα 1.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση σταδίου κατασκευής του studio (SketchUp)

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια ηχητικής πηγής (ηχείο ευρείας ζώνης), δέκτη (παντοκατευθυντικό μικρόφωνο), ψηφιακού μετατροπέα (κάρτα ήχου), υπολογιστή και σχετικού λογισμικού (με δυνατότητα πολλαπλών απεικονίσεων), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου.

Κατά τις μετρήσεις, τόσο η πηγή όσο και ο δέκτης τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις (Σχ. 1.2), σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα [7]. Προέκυψαν έτσι πολλοί συνδυασμοί μετρήσεων και αντίστοιχων απεικονίσεων, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν ανά θέση του δέκτη. Η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να υποδείξει τις βέλτιστες θέσεις των πραγματικών ηχητικών πηγών και τις βέλτιστες θέσεις ακρόασης.



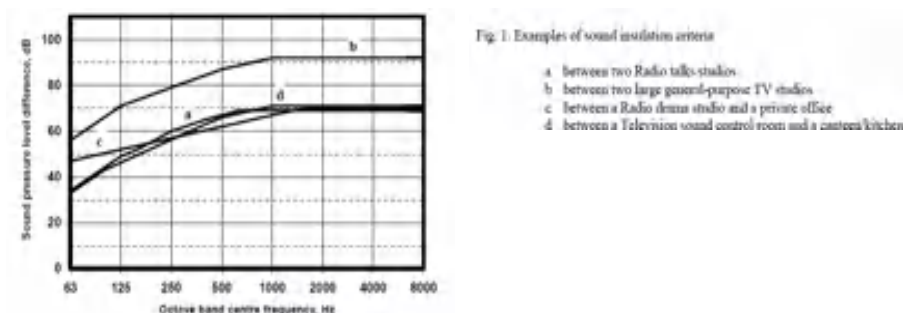
Σχήμα 1.2 : Οι χώροι και οι θέσεις που αναφέρονται (LibreCad).

2. Η ηχομόνωση

2.1. Επιθυμητά μεγέθη ηχομόνωσης

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι απαιτείται ηχομόνωση εξεταζόμενη σε όλες τις ακουστές συχνότητες, της τάξης των 70dB συνολικά, που μπορεί να ελαττώνεται στις χαμηλές συχνότητες (ελάχιστη τιμή 35dB) αφού

- Υποστηρίζει τη χρήση H/A εξοπλισμού και τυμπάνων (μέγιστη στάθμη 110dB)
- Βρίσκεται σε ήσυχο οικιστικό περιβάλλον (μέγιστη στάθμη 45dB στα όρια)
- Λειτουργεί όλο το εικοσιτετράωρο (Σχ. 2.1)

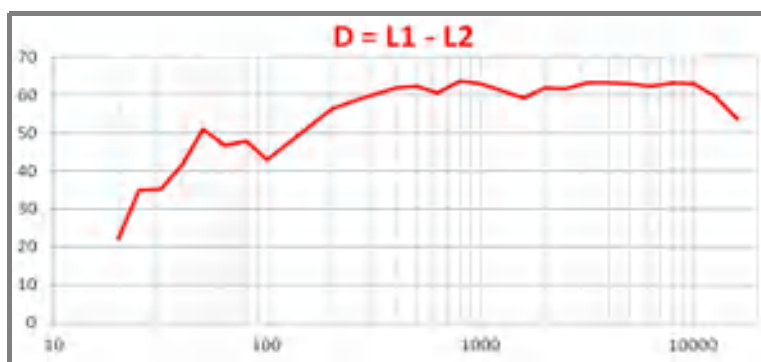


Σχήμα 2.1: Παραδείγματα επαρκούς ηχομόνωσης σε studio μεταξύ χώρων [3]

2.2. Μετρήσεις ηχομόνωσης

Η παρεχόμενη ηχομόνωση μετρήθηκε μεταξύ του Κυρίως δωματίου ηχογράφησης και των χώρων: δωμάτιο Ελέγχου, Αυλή, παρακείμενος χώρος Ισογείου, Υπνοδωμάτια 1^{ου} ορόφου. Όπως υπογορεύει η τυποποίηση του ΕΛΟΤ [7] το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε τουλάχιστον 3 θέσεις, οι οποίες απείχαν τουλάχιστον 0,7m μεταξύ τους, τουλάχιστον 0,5m από τους τοίχους, τουλάχιστον 1m από την ηχητική πηγή και 1.60 m, θέση αυτιών όρθιου ενήλικα. Επειδή ο εξεταζόμενος χώρος έχει ως κύρια χρήση τη μουσική, εξετάστηκε όλο το φάσμα των ακουστών συχνοτήτων. Λόγω της περιορισμένης όμως απόκρισης του ηχείου – πηγής, οι μετρήσεις κάτω από 40 Hz κρίθηκαν περιορισμένης αξιοπιστίας.

Μετρήθηκε έτσι, η διαφορά στάθμης και, με υπολογισμό της κατάταξης ηχομείωσης, R_w , [8] βρέθηκε η ηχομόνωση ανάμεσα στα δύο δωμάτια (52dB), και η μόνωση έναντι ηχορύπανσης από το studio σε προσκείμενους χώρους (51dB για τον εξωτερικό χώρο, 59dB για τον ίδιο όροφο και 61dB για τον υπερκείμενο όροφο) (Σχ. 2.2). Για την ηχοπροστασία του studio μετρήθηκε ο θόρυβος βάθους στο χώρο (34dBA). Τέλος, οι ανεμιστήρες εξαερισμού σε πλήρη λειτουργία, μετρήθηκαν να προκαλούν ηχητικές στάθμες 65dB στα όρια της ιδιοκτησίας.

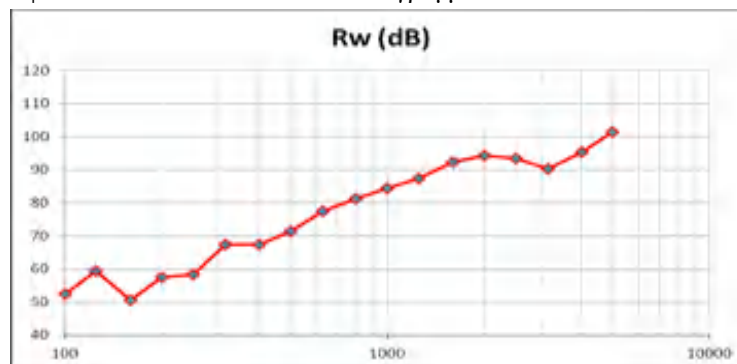


Σχήμα 2.2: Μετρημένη ηχομόνωση μεταξύ studio και υπερκείμενου ορόφου.

2.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί ηχομόνωσης

Από βιβλιογραφικές πηγές (διαγράμματα με οπτική παρατήρηση) καταγράφηκε η ηχομόνωση που παρέχουν τα απλά χωρίσματα μεταξύ των εξεταζόμενων χώρων,

σύμφωνα με τη γεωμετρία και τα υλικά τους, υπολογίστηκε ο δείκτης ηχομείωσης κάθε πολλαπλού χωρίσματος και υπολογίστηκε φασματικά η κατάταξη ηχομείωσης, R_w που επισημάνθηκε στα 500Hz (67dB μεταξύ των δωματίων, 74dB για τον αύλειο χώρο, 71dB για τον ίδιο όροφο & 82dB για τον υπερκείμενο όροφο). Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ενδεικτικά ένα τέτοιο διάγραμμα.



Σχήμα 2.3: Υπολογισμένη ηχομόνωση μεταξύ studio και παρακαίμενου ισόγειου

2.4. Αξιολόγηση ηχομόνωσης

Συγκρίνοντας τις επιθυμητές και τις μετρούμενες τιμές ηχομόνωσης, συνολικά η ηχομόνωση του studio, προκύπτει ικανοποιητική, αλλά όχι για όλες τις συχνότητες: στις χαμηλές συχνότητες είναι και παρατηρημένα ελλείψεις, όταν εξασκείται πλήρες μουσικό συγκρότημα. Πάντως, όχληση στο περιβάλλον παρατηρήθηκε ότι προκαλείται περισσότερο από τη λειτουργία του εξερισμού, που ξεπερνά τα θεσμοθετημένα όρια.

2.5. Προστάσεις βελτίωσης ηχομόνωσης

Με δεδομένη την περιορισμένη εμπορική εκμετάλλευση του studio, καθώς και την παρατηρημένη όχληση, προτείνεται αρχικά η αντιμετώπιση του θορύβου από τους ανεμιστήρες του εξερισμού, με χρήση κλωβών και ηχοπαγίδων.

Μια δεύτερη παρέμβαση που θα μπορούσε να γίνει, είναι να αυξηθεί η επιφανειακή μάζα των υλικών του εσωτερικού κελύφους συνολικά, με εφαρμογή επιπλέον στρώσεων, γυψοσανίδας, ξύλου ή και ηχομονωτικών μεμβρανών. Με διπλασιασμό της επιφανειακής μάζας, θα επέλθει επιπλέον ηχομόνωση έως 6dB, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία και μείωση της συχνότητας συντονισμού. Ταυτόχρονα όμως θα προκληθούν κατασκευαστικά προβλήματα διευθέτησης των ύστερων αρχιτεκτονικών στοιχείων, όπως πόρτα, ηλεκτρολογική εγκατάσταση και ζωγραφική επιφανειών.

3. Η εσωτερική ακουστική

3.1. Επιθυμητά μεγέθη εσωτερικής ακουστικής

Από τη βιβλιογραφία και συμβιβάζοντας τις διαφορετικές προσεγγίσεις, θα πρέπει ο χώρος να μην παρουσιάζει διακριτούς συντονισμούς. Επίσης θα πρέπει να

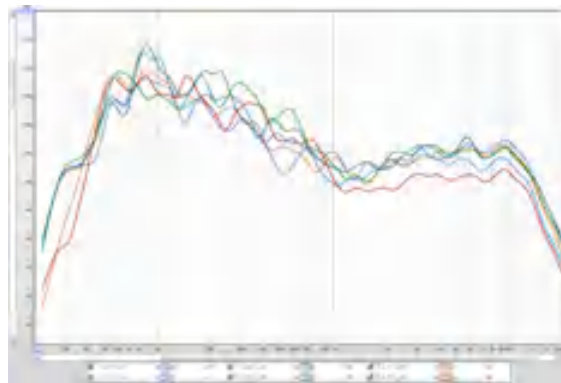
παρουσιάζει χρόνο αντήχησης $RT60 = 0.3-0.6s$, ο οποίος μπορεί να αυξάνεται στις χαμηλές συχνότητες ενώ θα πρέπει να μειώνεται στις υψηλές. Βοηθητική θα ήταν η ύπαρξη θαλάμου (booth) για τα τύμπανα και μεταβαλλόμενων στοιχείων, καθώς:

- Προορίζεται κυρίως για χρήση μουσικής
- Υποστηρίζει ακουστικά σχήματα αλλά και υποστηριζόμενα με H/A διατάξεις
- Υποστηρίζει ηχογράφηση αλλά και μουσική εξάσκηση
- Ο κυρίως χώρος είναι μικρός

3.2. Μετρήσεις εσωτερικής ακουστικής

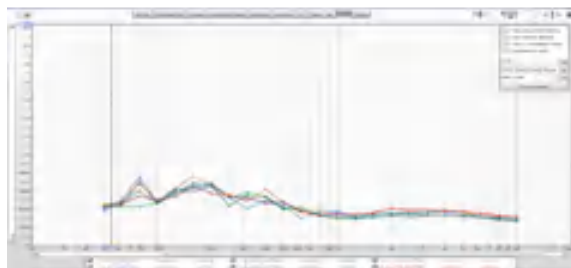
Προφανώς η κρουστική απόκριση είναι μοναδική για κάθε ζεύγος ηχητικής πηγής και δέκτη στο χώρο. Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, μετρήθηκαν οι κρουστικές αποκρίσεις για τους συνδυασμούς θέσεων πηγής (K1, K2, K3, K4, K5, K6) και δέκτη (K1, K5, K7, K8) που φαίνονται στο σχήμα 2. Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε ύψος 1,60m, ενώ απομακρύνθηκαν το σετ τυμπάνων και το βάθρο τους, καθώς παρατηρήθηκε ότι αλλοιώνουν την αντήχηση του δωματίου. Τα αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν για κάθε θέση του μικροφώνου, ώστε να αναδειχθούν ευκολότερα οι όποιες αναγκαίες παρεμβάσεις.

Στο σχήμα 3.1 έχει αποτυπωθεί η ηχητική στάθμη SPL στη θέση ακρόασης K1, σε σχέση με τη συχνότητα, από το λογισμικό. Επιλέχθηκε υπέρθεση των καμπυλών για τις διάφορες θέσεις της πηγής, προκειμένου να εξαχθούν άμεσα στατιστικά συμπεράσματα. Παρατηρείται σχετική ομοιομορφία των σταθμών, χωρίς έντονους συντονισμούς, εκτός από την περιοχή των 85Hz περίπου, όπου φαίνεται να παρουσιάζουν μέγιστο οι περισσότερες καμπύλες.



Σχήμα 3.1 : Απακόνιση ηχητικών σταθμών σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

Στο σχήμα 3.2 έχει αποτυπωθεί ο χρόνος αντήχησης $RT60$ στη θέση ακρόασης K1, σε σχέση με τη συχνότητα, από το λογισμικό. Και εδώ επιλέχθηκε υπέρθεση των καμπυλών για εξαγωγή άμεσων στατιστικών συμπερασμάτων. Εδώ παρατηρούμε αυξημένο χρόνο αντήχησης στην τριτοοκτάβα των 80Hz, μειωμένο στα 100Hz και πάλι αυξημένο στην περιοχή 125 – 200Hz. Για συχνότητες πάνω από 500Hz, ο χρόνος αντήχησης παραμένει κάτω από 500ms για κάθε θέση της πηγής.

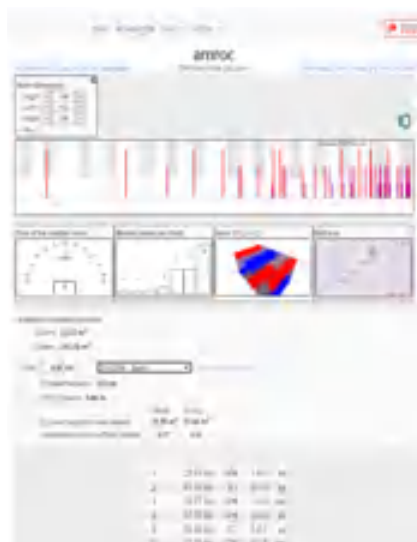


Σχήμα 3.2: Απακόνιση χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

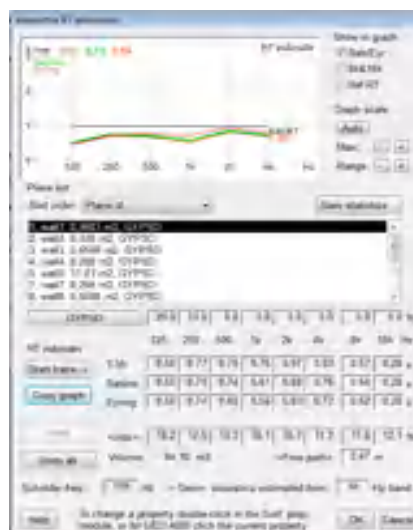
3.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί εσωτερικής ακουστικής

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί έγιναν με 3 τρόπους:

- με υπολογισμό των συντονισμών, μέσω κατάλληλης προσομοίωσης, που αξιολόγησε θετικά το χώρο ως προς το κριτήριο Bonello και εντός της περιοχής Bolt, αλλά έδειξε αυξημένη πυκνότητα συντονισμών στα 85 & 130Hz (Σχ.3.3),
- με υπολογισμό της ολικής απορρόφησης του δωματίου και του χρόνου αντήχησης RT60, κατά Sabine (0,73s αυξημένου στις χαμηλές συχνότητες),
- με χρήση λογισμικού ακουστικής προσομοίωσης, όπου δόθηκαν οι διαστάσεις του δωματίου, οι συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών του και οι θέσεις πηγής – δέκτη, οπότε υπολογίστηκαν η στάθμη SPL (με μέγιστο στα 500Hz) ο χρόνος αντήχησης (0,8s) και η συχνότητα Schroeder (199Hz) (Σχ. 3.4).



Σχήμα 3.3: Υπολογισμός συντονισμών του χώρου από λογισμικό (AmproC)



Σχήμα 3.4: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης και συχνότητας Schroeder από λογισμικό (Catt-Acoustics)

3.4. Αξιολόγηση εσωτερικής ακουστικής

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων με τα υπολογισμένα και τα επιθυμητά προκύπτει ότι οι στάθμες SPL παρουσιάζουν

φασματικά σχετική ομοιομορφία (μέγιστη απόκλιση 15dB στα 85Hz και 130Hz περίπου) ενώ οι χρόνοι αντήχησης είναι αποδεκτοί (μέχρι 500ms), αλλά όχι σε όλες τις θέσεις και τις συχνότητες (μέγιστη απόκλιση έως 0,2s στις ίδιες συχνότητες).

3.5. Προτάσεις βελτίωσης εσωτερικής ακουστικής

Για τη βελτίωσή τους προτείνεται η τοποθέτηση απορροφητών τύπου μεμβράνης, που θα είναι συντονισμένοι στις προβληματικές συχνотικές περιοχές και θα παρέχουν επαρκή ηχητική απόσβεση (80-90Hz που εμφανίζεται με αυξημένη στάθμη και χρόνο αντήχησης και 125-250Hz με αυξημένο χρόνο αντήχησης). Επειδή η ενδιάμεση συχνотική περιοχή των 100Hz παρουσιάζει μειωμένο χρόνο αντήχησης, θα πρέπει η όποια παρέμβαση να είναι συχνотικά εντοπισμένη. Οι απορροφητές αυτοί θα έχουν κατασκευαστικά τη μορφή επιφανειών – πάνελ, στερεωμένων περιμετρικά σε καδρόνια κατάλληλου πάχους, δημιουργώντας κατάλληλο διάκενο, ενώ θα περιέχουν ελαφρύ απορροφητικό υλικό.

4. Συμπεράσματα

Η ηχομόνωση του χώρου, αφού κρίθηκε οριακά επαρκής από τις μετρήσεις αλλά και από τη μέχρι τώρα λειτουργία, και όσο οι κοινωνικές συνθήκες, όπως η ανοχή των γειτόνων, παραμένουν ίδιες, φαίνεται ότι δεν χρειάζεται αντιμετώπιση. Αν όμως στο μέλλον οι συνθήκες αλλάξουν ή αν υπάρξει προοπτική 24ωρης λειτουργίας με θορυβώδη μουσικά σύνολα, η ηχομόνωση θα πρέπει να βελτιωθεί.

Η εσωτερική ακουστική, αφού επίσης κρίθηκε οριακά επαρκής από τις μετρήσεις αλλά και από τη μέχρι τώρα λειτουργία, και όσο η χρήση του χώρου δηλαδή μουσική εξάσκηση και δειγματική ηχογραφήση (demo) παραμένει ίδια, επίσης δεν χρήζει άμεσας αντιμετώπισης. Η προτεινόμενη παρέμβαση όμως, αναμένεται να τη βελτιώσει περισσότερο.

Συνολικά συμπεραίνεται ότι η ακουστική του studio το καθιστά κατάλληλο για περιορισμένη αλλά όχι για απρόσκοπτη εμπορική εκμετάλλευση. Οι προτεινόμενες βελτιώσεις αποσκοπούν να λύσουν τα σημαντικότερα προβλήματα, με περιορισμένο οικονομικό κόστος.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] F. Everest *The Master Handbook of Acoustics 4th ed* McGraw-Hill (2001).
- [2] N. Shaw & F. Everest *Master Handbook of Acoustics 4th ed* Journal of The Acoustical Society of America - 110. 10.1121/1.1398048 (2001).
- [3] R. Walker *Acoustic Criteria and Specification* BBC R & D White Paper, WHP 021 (2002).
- [4] E.J. Voelker *Studio Production Systems* (2002;). Ανακτήθηκε 6-6-2022 από <https://www.scribd.com/document/89954111/Chapter10-3>.
- [5] P. Newell *Recording Studio Design* Elsevier Ltd., Great Britain (2008).
- [6] M. Long *Architectural Acoustics*, 2nd ed. Elsevier Inc. (2014).
- [7] Δ. Σκαρλάτος *Εφαρμοσμένη ακουστική 4^η έκδοση* Gotsis, Πάτρα (2015).
- [8] Α. Κουκούλης *Μελέτη ακουστικής αναβάθμισης στο νεοκλασικό κτήριο του Δημοτικού Ωδείου Βόλου* ΜΔΕ Ε.Α.Π., Βόλος (2022).



Ακουστική άνεση σε χώρους ευεξίας: Η συμβολή της στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και ανάπλαση των Λουτρών Λαγκαδά

Αθηνά Μιγδάνη¹, Μελίνα Μαρκοπούλου¹, Καλλιόπη Χουρμουζιάδου²

¹ Τελειόφοιτη Τμήματος Εσωτερικής Αρχιτεκτονικής ΔΠΠΑΕ, Σέρρες

² Αρχιτέκτων Μηχ., MArch, PhD, Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών και Βιώσιμου Σχεδιασμού ΕΑΠ, Σχολή Επιστημών Σχεδιασμού ΔΠΠΑΕ, Σέρρες
k.chourmouziadou@windowslive.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή εξετάζει συνθήκες άνεσης σε χώρους ευεξίας -λουτρικές εγκαταστάσεις- μέσω ανασκόπησης της ιστορικής τους εξέλιξης και σύγχρονων παραδειγμάτων. Εστιάζει στην εφαρμογή σχεδιαστικών προτάσεων στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό για βελτίωση της ακουστικής ποιότητας, ως συνέχεια των πτυχιικών ερευνητικών και σχεδιαστικών εργασιών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε δύο στάδια: (α) της διερεύνησης και (β) της εφαρμογής των καλών πρακτικών στον σχεδιασμό.

Η αρχιτεκτονική πρόταση αφορά στην ανάπλαση του συγκροτήματος Λουτρών Λαγκαδά, περιλαμβάνει τον σχεδιασμό ξενοδοχειακής μονάδας, λουτρικών εγκαταστάσεων και περιβάλλοντος χώρου, και εμπεριέχει στοιχεία περιβαλλοντικού και ακουστικού σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη επιτόπιες μετρήσεις. Ιδιαίτερα απαιτητική ήταν η διαχείριση των βυζαντινών λουτρών, τα οποία χρονολογούνται μεταξύ 900 και 1400 μ.Χ., τόσο κατά την διαδικασία των μετρήσεων, όσο και σε σχέση με τους περιορισμούς σε νέες προσθήκες - επεμβάσεις στο κέλυφος- λόγω της ιστορίας τους. Η εργασία καταλήγει στην σύνταξη πρότυπου πίνακα σχεδιαστικών παραμέτρων λουτρικών εγκαταστάσεων.

Acoustic comfort in wellness areas: Its contribution to the architectural design and regeneration of Lagada Baths

ABSTRACT

This paper examines comfort conditions in wellness areas - spa facilities - through a review of their historical development and contemporary examples. It focuses on the application of design proposals in architectural design for the improvement of acoustic quality, following the graduate research and design work, which was carried out in two stages: (a) the investigation and (b) the application of good practices in design.

The architectural proposal on the regeneration of Lagada Baths complex includes the design of the hotel unit, bath facilities and surrounding area, incorporating elements of environmental and acoustic design, taking into account on-site

measurements. The acoustic investigation and proposal of the Byzantine baths, which date between 900 and 1400 AD, was particularly demanding, both during the measurement process and in relation to the restrictions on new additions -shell interventions- due to their history. The paper results in the compilation of a generic table of design parameters for spa facilities.

Εισαγωγή

Οι διεπιστημονικές προσεγγίσεις στην αρχιτεκτονική θεωρία και σχεδιασμό έχουν επιτρέψει την ένταξη νέων πεδίων και υπολογιστικών μοντέλων στην διαδικασία του σχεδιασμού, όπως η ακουστική, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός, νέες τεχνολογίες, καινοτόμα υλικά, με βασικό στόχο την εμπειρία του χρήστη. Η ατμόσφαιρα και οι αισθήσεις αποτελούν σημαντικές παραμέτρους του σχεδιασμού, ιδιαίτερα όσον αφορά σε χώρους χαλάρωσης και ευεξίας.

Η εργασία εξετάζει την ιστορική εξέλιξη των ιαματικών λουτρών στην Ευρώπη, καθώς και σύγχρονα παραδείγματα που έχουν εφαρμόσει την γνώση άλλων επιστημονικών πεδίων, όπως η ψυχολογία, ο περιβαλλοντικός σχεδιασμός, η ακουστική, στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Στόχο της αποτελεί η ανάλυση σχεδιαστικών παραμέτρων, η εφαρμογή τους στην μελέτη περίπτωσης και η σύνταξη καλών πρακτικών σχεδιασμού.

Η σχεδιαστική πρόταση της ανάπλασης του συγκροτήματος Λουτρών Λαγκαδά περιλαμβάνει τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό ξενοδοχειακής μονάδας, λουτρικών εγκαταστάσεων, βυζαντινών λουτρών και περιβάλλοντος χώρου, με βασικό στόχο την αναβάθμιση τους από ένα αναχρονιστικό σε ένα τουριστικό σύμπλεγμα με σύγχρονες προδιαγραφές και κατάλληλες συνθήκες άνεσης. Παράλληλα με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ο ακουστικός σχεδιασμός παρέχει κατευθυντήριες γραμμές και σχεδιαστικούς άξονες για την τελική επίλυση.

Η εργασία αποτελείται από τέσσερις (4) ενότητες. Αρχικά γίνεται αναφορά στην ιστορία των λουτρών και ανάλυση των λουτρών Vals στην Ελβετία, ως παράδειγμα καλής σχεδιαστικής πρακτικής. Έπειτα περιγράφεται η επιδιωκόμενη ατμόσφαιρα σε χώρους ευεξίας σε σχέση με την σχεδιαστική προσέγγιση. Τέλος, παρουσιάζονται οι μετρήσεις χρόνου αντήχησης, καθώς και παράμετροι αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού ως ενιαία προσέγγιση.

1. Λουτρικές εγκαταστάσεις

1.1 Ιστορικά στοιχεία για τα λουτρά

Η ιστορία των ιαματικών λουτρών ξεκινά με την άνθηση των αρχαίων πολιτισμών. Οι Βαβυλώνιοι ήταν εκείνοι που άρχισαν να χρησιμοποιούν το νερό για θεραπευτικούς σκοπούς [1], ενώ οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποίησαν το κοινό νερό για την καθαριότητα του σώματος και το θερμό για την θεραπεία διαφόρων νοσημάτων. Σε αρχαιολογικούς χώρους ελληνικών πόλεων βρέθηκαν πολυτελείς λουτήρες, καθώς και συστήματα ύδρευσης άριστης κατασκευής που μαρτυρούν την διάδοση της χρήσης των λουτρών. Ο Ηρόδοτος (484-410 π.Χ.) μελέτησε και ανέλυσε πρώτος τις θεραπευτικές ιδιότητες των πηγών, ενώ ο Ιπποκράτης (460-377 π.Χ.), θεμελιωτής της ιατρικής επιστήμης, εμβάθυνε περισσότερο στις θεραπευτικές

του ιδιότητες, διακρίνοντας τρεις κατηγορίες: το πόσιμο, το θαλασσινό και το αλμυρό νερό (το ιαματικό νερό) [2].

Για τους Ρωμαίους το λουτρό ήταν κοινωνική υποχρέωση και αυτοί που δεν το έκαναν τιμωρούνταν. Θέρμες ονόμαζαν τα δημόσια λουτρά τα οποία θεωρούνταν τόσο χώροι υγιεινής όσο και κοινωνικοποίησης. Ήταν χώροι μεγαλοπρεπείς και έφεραν διακοσμήσεις. Τα θερμά λουτρά σχεδιάζονταν με νοτιοδυτική κατεύθυνση, για να έχουν πλήρη την ηλιακή ενέργεια ενώ τα ψυχρά λουτρά βορειοανατολικά.

Ο ρόλος της λουτροθεραπείας αποκαταστάθηκε στο βυζάντιο (12^{ος} -13^{ος} αιώνας) και τα λουτρά καθιερώθηκαν ως τόπος συγκέντρωσης. Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν δημόσιοι και ιδιωτικοί χώροι λουτρών, για τους άπορους - με έξοδα της πολιτείας- και τους εύπορους αντίστοιχα [2, 3].

1.2 Σύγχρονη χρήση λουτρικών εγκαταστάσεων

Παρόλο που στο παρελθόν η χρήση λουτρικών εγκαταστάσεων αποσκοπούσε στην θεραπεία δερματικών παθήσεων, σήμερα παρατηρούνται πιο σύγχρονες εκδοχές, με κύριο στόχο είτε την ευεξία και την χαλάρωση του ατόμου, είτε την αποκατάσταση του από ψυχολογικές και σωματικές ασθένειες. Εξάλλου, με την εξάπλωση του Covid-19, κλινικές έρευνες έχουν δείξει πως η χρήση τους έχει περιορίσει σημαντικά το χρόνιο μετά-covid σύνδρομο σε ασθενείς, κυρίως όσον αφορά σε χρόνια κόπωση, πόνο, σύγχυση του εγκεφάλου και επίμονο βήχα, ενώ έχει συνεισφέρει θετικά σε σωματικούς (+72%) και συναισθηματικούς περιορισμούς (+66%) [4].

Οι εγκαταστάσεις των λουτρών παρουσιάζουν αρχιτεκτονική και μορφολογική ποικιλία και μπορεί να είναι πολύ απλές μέχρι πολυμορφικές. Στις απλές παρατηρούνται μόνο οι υπάρχουσες πηγές (ιαματικά νερά) ενώ στις πολυμορφικές παρέχονται διαφορά ήδη όπως: μασάζ, υδρομασάζ, χαμάμ, σάουνα κτλ. Συνήθως αυτά παρέχονται σε μεγάλα συγκροτήματα που βρίσκονται εκτός αστικών κέντρων. Στις περιπτώσεις που γενικός στόχος είναι η χαλάρωση παρά η θεραπεία, το κτιριολογικό πρόγραμμα συνδυάζει ξενοδοχειακές μονάδες με χώρους ευεξίας. Πρόσφατα, ερευνητές πρότειναν ότι οι παράμετροι που καθορίζουν την εμπειρία (αισθητηριακοί, λειτουργικοί, κοινωνικοί, φυσικοί) και η κουλτούρα της φιλοξενίας είναι σημαντικοί για την καλλιέργεια της ικανοποίησης του επισκέπτη, όταν πρόκειται για πολυμορφικούς χώρους, οδηγώντας στην ευημερία [5]. Η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι αρωγός στον σχεδιασμό σύγχρονων συγκροτημάτων με απαιτητικά προγράμματα που στοχεύουν στην πολυεπίπεδη ικανοποίηση του χρήστη.

2. Σχεδιάζοντας με βάση τις αισθήσεις: τα Λουτρά Vals

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός διαμορφώνεται ανάλογα με το είδος, την χρήση, τις λειτουργικές και μορφολογικές ανάγκες του κτιριολογικού προγράμματος. Ταυτόχρονα, πολλοί αρχιτέκτονες έχουν αναφερθεί στην έννοια της ατμόσφαιρας ενός χώρου, η οποία σε χώρους λουτρών απαρτίζεται από πέντε (5) στοιχεία: το φως, τα υλικά, το νερό, τον ήχο και την ‘χωρο-γραφία’ [6]. Το φως κυριαρχεί ως ένα από τα βασικά στοιχεία του χώρου, ενώ τα υλικά, με τους χρωματισμούς και την

υφή τους, το νερό, σε συνεργασία με τον ήχο, ο όρος 'χώρο-γραφία' -ο κατάλληλος σχεδιασμός της κίνησης στον χώρο - οδηγούν στην βιωματική εμπειρία [7].

Τα λουτρά Vals, σχεδιασμένα από τον αρχιτέκτονα Peter Zumthor, έχουν αποτελέσει παράδειγμα έρευνας στην σύγχρονη αρχιτεκτονική, λόγω του σχεδιασμού τους βάσει των αισθήσεων. Ο αρχιτέκτονας ερευνά τον τόπο, στοχεύοντας στην ενσωμάτωση του κτιρίου στο φυσικό περιβάλλον και επενδύει το κτίριο με στρώσεις τοπικής χαλαζιακής πέτρας [8], στην δημιουργία ατμόσφαιρας [9] και στην βιωματική εμπειρία. Η οργάνωση των χώρων διαμορφώνεται σε τρία μέρη: τα λουτρά, τα πέτρινα τραπέζια και τον μεταβατικό χώρο μεταξύ των δύο, όπου σχεδιάστηκαν ανοίγματα για την εισχώρηση του φωτός και την θέα προς τον ουρανό. Οι σχισμές και οι οπές του κτιρίου είχαν στόχο την δημιουργία μυστηριακού φωτός, με τις υφές του κτιρίου και το φως να προβάλλονται μέσω του νερού στους τοίχους, τονίζοντας τις αυστηρές γωνίες του κτιρίου [10].

Η ακουστική αποτελεί μέρος της εμπειρίας. Η δημιουργία νέας ηχητικής πηγής (sound art), με την εγκατάσταση σωλήνων που εκλύουν υδρατμούς, προσθέτει ακουστική πολυπλοκότητα στον κεντρικό χώρο των λουτρών, ενισχύοντας το ηχοτοπίο. Το Σχήμα 1α απεικονίζει μια ηχητική κάτοψη, όπου διαφορετικά χρώματα περιγράφουν το είδος της πηγής και την διάδοσή της. Στα σημεία με τις πισίνες κυριαρχούν ο ήχος των χρηστών στο νερό, οι βουτιές κλπ (μπλε χρώμα) και οι ομιλίες (πράσινο). Το πορτοκαλί, το οποίο κυριαρχεί στους χώρους μετάβασης, περιγράφει τον βηματισμό του επισκέπτη πάνω στην πέτρα, ενώ στο ροζ βρίσκεται η ηχητική εγκατάσταση. Παρόλη την πολυπλοκότητα του ακουστικού περιβάλλοντος, η προσεκτική επιλογή της χαλαζιακής πέτρας δημιουργεί διαχυτικό περιβάλλον, παρόλη την αυστηρή γεωμετρία και την παραλληλία των τοίχων. Ταυτόχρονα, το Fragrance Room (Σχήμα 1β) προσφέρει οσφρητικά ερεθίσματα, συνομιλεί με την μικρή πισίνα, με διαστάσεις 2,6 επί 2,6 m, η οποία περιέχει διάφορα λουλούδια [9]. Εξάλλου, η έννοια του οσμοτοπίου έχει ερευνηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια ως παράμετρος του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού με σημαντική επιρροή στην αντιληπτική διαδικασία και στην εμπειρία του χρήστη [11, 12].

Η ποιότητα του ήχου αλλάζει κατά τη κίνηση του ατόμου στον χώρο. Κάθε βουτιά, κάθε ψίθυρος ενισχύεται και τέτοιοι ήχοι μπορεί να κλιμακωθούν όταν μεταβαίνει κάποιος από τους μικρότερους όγκους (πχ. δωμάτια σάουνας) στη μεγαλύτερη κεντρική πισίνα. Το σχεδιασμένο εσωτερικό ηχοτοπίο, αποτελεί την σύνδεση μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής πισίνας [9].



Σχήμα 1. Κύρια αίθουσα Λουτρών Vals. α) Ηχητική και β) Οσφρητική κάτοψη.

2.2 Ανασκόπηση της μεθοδολογίας σε χώρους ευεξίας

Σε ένα χώρο λουτρού οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι ιδιαίτερες, λόγω της χρήσης ζεστού νερού, το οποίο αποτελεί και εκτεταμένη συνήθως

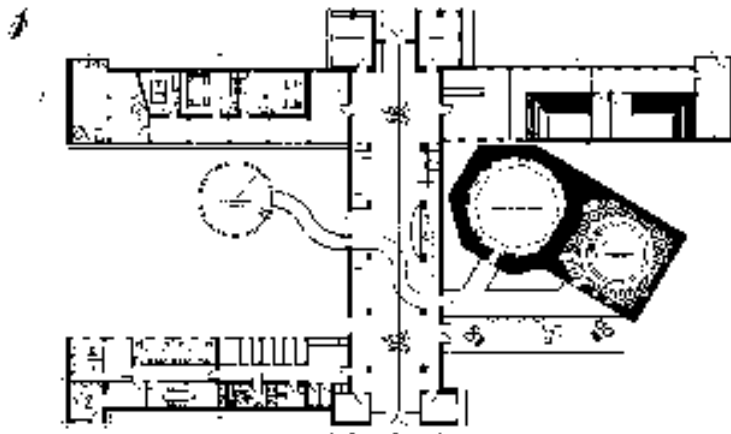
οριζόντια ανακλαστική επιφάνεια, η οποία συντελεί στη χαμηλή καταληπτότητα. Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση θολωτών κατασκευών, τυπικές μετρήσεις ακουστικών μεγεθών είναι αδύνατο να προσδιορίσουν τις πραγματικές συνθήκες ακουστικής άνεσης, ιδιαίτερα σε επίπεδο υποκειμενικής αντίληψης. Η χρήση λουτρικών εγκαταστάσεων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για κατασκευές που κουβαλούν ιστορία χιλιετιών, αποτελεί μια τελετουργική διαδικασία, όπου σύγχρονες προδιαγραφές δεν βρίσκουν εφαρμογή. Ενώ σε περιπτώσεις χώρων ευεξίας μεγάλης επιφάνειας έχουν εφαρμοστεί ηχοαπορροφητικά υλικά με εντυπωσιακή πτώση του χρόνου αντήχησης, η υψηλή θερμοκρασία και υγρασία σε χώρους λουτρών καθιστά αδύνατη την εφαρμογή τυπικών ηχοαπορροφητικών υλικών. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι, για λόγους ευεξίας, ο ήχος και ο φωτισμός πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα χωρίς να κορυφώνονται, εκτός από την περίπτωση της ηχοθεραπείας, όπου είναι απαιτούμενη η κορύφωση και οι εναλλαγές της. Επίσης, δεδομένης της υποκειμενική αντίληψης του ηχητικού περιβάλλοντος, η μεθοδολογία του ηχοτοπίου, προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες των εσωτερικών χώρων των λουτρών, μπορεί να βοηθήσει στη μέτρηση και την πρόβλεψη της ανθρώπινης αντιληπτικής απόκρισης στα ακουστικά ερεθίσματα, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο αναντιστοιχιών μεταξύ αναμενόμενων και πραγματικών κτιριακών εμπειριών [13]. Τέλος, πρόσφατες έρευνες σε εξωτερικά spa έχουν αναδείξει την θεωρία “fuzzy set” ως μια μέθοδο ανάλυσης του ηχητικού περιβάλλοντος που βασίζεται στην υποκειμενική απόκριση του χρήστη [14].

3. Μελέτη περίπτωσης: Βυζαντινά Λουτρά Λαγκαδά

3.1. Υπάρχουσα κατάσταση και πρότασης διαμόρφωσης

Η ιστορία της Λουτρόπολης του Λαγκαδά ξεκινάει από τους Βυζαντινούς χρόνους. Γύρω στο 900 μ.Χ. ο γιατρός Ιουστινιανός έκτισε τους πρώτους λουτήρες. Αργότερα προστέθηκε το δεύτερο λουτρό που είναι σε χρήση μέχρι σήμερα (Σχήμα 2). Τα δύο κτίρια είναι διατηρητέα και προστατεύονται από την αρχαιολογική νομοθεσία, ενώ το νερό τους έχει χαρακτηριστική ιαματικό σύμφωνα με το ΦΕΚ 117, τ. Β', 24-01-2017. Χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής της περιόδου αποτελούν θολωτές κατασκευές, με μικτή χρήση πέτρας και τούβλου και τόξα στο εσωτερικό τους. Το κεντρικό κτήριο, με παράλληλες και βοηθητικές χρήσεις (ατομικά υδρομασάζ, ατομικοί λουτήρες, αίθουσα μασάζ) κατασκευάστηκε στην δεκαετία του 1920. Οι αρχικές του όψεις χαρακτηρίζονταν από πυργοειδείς θολωτές κατασκευές, οι οποίες με τις διαρκείς επεμβάσεις έχουν χαθεί. Το συγκρότημα βρίσκεται σε έκταση είναι 600 στρ. και περιλαμβάνει εγκαταστάσεις διαμονής, ψυχαγωγίας και άθλησης (ξενοδοχείο, αίθουσα εκδηλώσεων, πισίνα ολυμπιακών διαστάσεων, γήπεδα ποδοσφαίρου, βόλεϊ, μπάσκετ, τένις, εκκλησιάκι και παιδικές χαρές). Όσον αφορά στις λουτρικές εγκαταστάσεις υπάρχουν συνολικά 4 αίθουσες (3 σε λειτουργία) για λουτροθεραπεία - Ιουστινιανός (900 π.χ.), Μυγδονία (1400 π.Χ.), Κορώνεια και Θέρμια Αρτεμης.

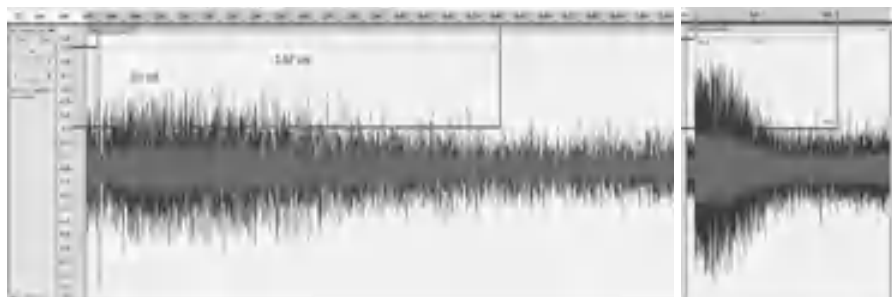
Η πρόταση για την αναδιαμόρφωση του συγκροτήματος περιλαμβάνει εσωτερικές διαρρυθμίσεις, διαμόρφωση όψεων, ένταξη νέων χρήσεων και διαμόρφωση περιβάλλοντος χώρου. Δεδομένου ότι κύριος στόχος ήταν η αναβίωση του συγκροτήματος η εργασία στράφηκε προς τον σχεδιασμό που θα ανταποκρίνεται στις αισθήσεις, με εφαρμογή κατάλληλων υλικών.



Σχήμα 2: Κάτοψη συγκροτήματος Λουτρών Λαγκαδά.

3.2. Ακουστικές μετρήσεις

Στους χώρους των βυζαντινών λουτρών και των μασάζ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κρουστικής απόκρισης, οι οποίες αναλύθηκαν στο audacity (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Κρουστική απόκριση των βυζαντινών λουτρών Λαγκαδά. α) Κορώνεια, β) Μυγδονία.

Γενικά διαπιστώνεται αδυναμία προσδιορισμού του χρόνου αντήχησης, καθώς σε όλες τις αίθουσες λουτρών υπάρχει τρεχούμενο νερό, δημιουργώντας διαρκή ήχο υποβάθρου που είναι αδύνατο να αναγνωριστεί σε σχέση με το σήμα. Έγιναν προσπάθειες αναγνώρισης της πτώσης στάθμης κατά 60dB σχεδιαστικά, με χρόνους που κυμαίνονται μεταξύ 1,60 (Κορώνεια-θολωτό λουτρό με επίχρισμα και επένδυση πλακιδίων, μεταλλική σκάλα και τα δύο παράθυρα και Ιουστινιανός) και 2,00s (Μυγδονία). Κατόπιν έγιναν προσπάθειες υπολογισμού του χρόνου αντήχησης κατά Sabine, κυρίως για συγκριτική ανάλυση και καθοδήγηση του σχεδιασμού, παρόλο που το ημισφαιρικό σχήμα των χώρων παρουσιάζει ιδιαιτερότητες στην κατανομή του ήχου. Υπολογίστηκαν τέσσερις εναλλακτικές προτάσεις για το λουτρό 'Ιουστινιανός', ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υλικών: (1) υπάρχουσα κατάσταση, (2) και (3) με εφαρμογή έξι και δώδεκα τεμαχίων αναρτημένων ηχοαπορροφητικών πάνελς $\varnothing 0,80\text{m}$ αντίστοιχα, με αντοχή στην υγρασία κατά 95%

και (4) με καθαίρεση του σοβά, αρμολόγηση και επαναφορά του κελύφους στην αρχική του μορφή. Οι παράμετροι των υπολογισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα συγκριτικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την πρόταση 4 ως επικρατέστερη, καθώς εμφανίζει την μεγαλύτερη επίδραση στον χρόνο αντήχησης και ταυτόχρονα είναι ανθεκτικότερη με την πάροδο του χρόνου.

Πίνακας 1. Παράμετροι υπολογισμού χρόνου αντήχησης.

Ιουστινιανός - υπολογισμός χρόνου αντήχησης						
εναλλακτικές προτάσεις			(1)	(2)	(3)	(4)
V (Όγκος) λουτρού (m ³)			134,05	134,05	134,05	134,05
συντ. απορ. α (500Hz)	χρωμ. επίχρισμα	0,02	100,55	97,55	94,55	-
	νερό	0,013	50,24	50,24	50,24	50,24
	πέτρα	0,43	-	-	-	100,55
	πάνελς 90,80 (m ²)	0,70	-	3,00	6,00	-
A= α ₁ *S ₁ + α ₂ *S ₂ +...+A _v +Σ _v (m ²)			2,664	4,70	6,74	43,89
RT60 (s)			8,10	4,60	3,20	0,49

3. Σχεδιαστικές Προτάσεις

Βάσει των αποτελεσμάτων της παραπάνω έρευνας, δημιουργήθηκε ένα πρότυπος πίνακας καλών πρακτικών για εφαρμογή σε χώρους ευεξίας, σχετικά με σχεδιαστικούς άξονες που στοχεύουν στην αντιληπτική διαδικασία μέσω των αισθήσεων και στην δημιουργία ατμόσφαιρας. Ιδιαίτερα σε σχέση με τις ακουστικές επιλύσεις για ρύθμιση του χρόνου αντήχησης και βελτίωση των συνθηκών καταληπτότητας, είναι προτιμότερη η χρήση φυσικών υλικών στις επιφάνειες του κελύφους (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Σχεδιαστικοί άξονες σε χώρους ευεξίας.

σχεδιαστικοί άξονες λουτρικών εγκαταστάσεων	
σχέση χώρων	σύνδεση μέσω ενιαίας χρήσης υλικών, ανοιγμάτων, φωτός
προσανατολισμός	νοτιοανατολικός (θερμή) - βόρειος (ψυχρή)
κίνηση	ελεύθερη
υλικότητα - αφή	αδρές διαχυτικές επιφάνειες - διακόσμηση -μη επεξεργασμένες επιφάνειες προκαλείται άγγιγμα
χρωματισμοί	ψυχολογία των χρωμάτων για το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα χαλάρωσης
φωτισμός	κατάλληλος τεχνολογικός εξοπλισμός & μεγάλα ανοίγματα στον χώρο
θερμοκρασία	14 °C(ψυχρή) – 46 °C (θερμή)
ακοή	ένταξη ηχητικών εγκαταστάσεων- επιβεβαίωση σχεδιασμού με προσομοίωση - διαχυτικές/απορροφητικές επιφάνειες για μείωση χρόνου αντήχησης
οσμή	δημιουργία / ενσωμάτωση οσφρητικών πηγών εμπλουτισμένος με μυρωδιές της φύσης (πχ. φυτών)
ατμόσφαιρα	συνδυασμός των παραπάνω για δημιουργία εμπειρίας

4. Συμπεράσματα

Η σύνθεση των αναμνήσεων σε χώρους ιαματικών λουτρών συχνά επιδιώκεται, καθώς μνήμη και δημιουργία εμπειριών αποτελούν στόχους του σύγχρονου σχεδιασμού. Οι χώροι λουτρών δεν ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις συνθηκών άνεσης. Στην περίπτωση των Λουτρών Λαγκαδά, ιδιαίτερα απαιτητική ήταν η διαχείριση των βυζαντινών λουτρών, τα οποία, λόγω της ιστορίας τους και των ιδιαίτερων συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας, δημιουργούν περιορισμούς σε νέες προσθήκες, για την βελτίωση της ακουστικής. Οι μετρήσεις αποκάλυψαν την χαμηλή ακουστική ποιότητα και τις δυσκολίες διεξαγωγής τους, ενώ οι υπολογισμοί προσδιόρισαν την επαναφορά του κελύφους στην αρχική του μορφή - αποκάλυψη της πέτρας- ως βέλτιστη και βιώσιμη. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον κ. Π. Καραμπατζάκη για τη πολύτιμη συμβολή του.

5. Αναφορές

- [1] Ε. Παπαδοπούλου *Ο ιαματικός τουρισμός από την αρχαιότητα έως σήμερα στη Μακεδονία και τη Θράκη*. Πτυχιακή εργασία ΔΙΠΑΕ, Θεσσαλονίκη (2008).
- [2] Σ. Παπαδοπούλου *Η ιστορία των ιαματικών λουτρών και η μετεξέλιξή τους σε spa* ΔΙΠΑΕ, Θεσσαλονίκη (2012).
- [3] Ι. Γκέλης «Ιαματικά Λουτρά – Θεραπεία με τη δύναμη της Φύσης» *kinesiotherapy* (2023)
- [4] M. Costantino «Impact of Spa Therapy on Symptoms and Quality of Life in Post-COVID-19 Patients with Chronic Conditions» *Journal of Clinical Medicine* **13(17):5091** (2024).
- [5] D. Dimitrovski «Wellness spa hotel experience: evidence from spa hotel guests in Serbia» *Tourism Review* (2024).
- [6] Γ. Πεπónης *Χωρογραφίες: Ο αρχιτεκτονικός σχηματισμός του νοήματος*, Αλεξάνδρεια, Αθήνα (1997).
- [7] Μ. Βλαχοστεργίου «Diagrams: Οι Χωρικές Κατασκευές της Κίνησης» *Greek Architects* (2017).
- [8] Α. Παναγιώτου «Η ατμόσφαιρα των λουτρών 5 συστατικά στοιχεία 3 αρχιτεκτονικά παραδείγματα», *Greek Architects* (2016).
- [9] Μ. Φιλιππίδη Μ. «Η έννοια της ατμόσφαιρας στην αρχιτεκτονική του Peter Zumthor», in GRADανασκόπηση, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος (2017).
- [10] ArchDaily «The Therme Vals / Peter Zumthor» *ArchDaily* (2009).
- [11] Κ. Σακαντάμης & Κ. Χουρμουζιάδου «Χρόνο-Σφαίρες: Συνδυαστική μελέτη του αστικού Οσμο-Ηχο-τοπίου της Θεσσαλονίκης» στο *Πρακτικά 7^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής* (2014).
- [12] V. Henshaw *Urban smellscapes: understanding and designing city smell environments*. Routledge/Taylor & Francis Group, New York (2014).
- [13] S. Torresin et.al «Acoustics for Supportive and Healthy Buildings: Emerging Themes on Indoor Soundscape Research» *Sustainability* **12(15), 6054** (2020).
- [14] M. Sztubecka & J. Sztubecki «Analysis of the acoustic climate of a spa park using the fuzzy set theory» *Open Engineering* **6(1)** (2016).



Ο ρόλος του Συμβούλου Ακουστικής στην ενσωμάτωση των συστημάτων αειφορίας στον Αρχιτεκτονικό Σχεδιασμό των κτιρίων

**Ioannis Timagnis ¹, Theodoros Timagenis ²,
Alexandra Timageni ³, Dimitris Timagenis ⁴**

¹ Architect Engineer – Acoustic Design Consultant | PhD(c) Acoustics | MSc
Architectural and Environmental Acoustics | MArch, Ba (Hons) Arch | NTUA School of
Architecture Acoustics Lab | WELL International Committee Advisor (Sound),

² Architect Engineer – Acoustic Design Consultant, MSc UCL | NTUA

³ Architect Engineer | NTUA

⁴ Architect Engineer | MYD PoliMi | NTUA

5 K. Palaiologou st., Piraeus, Greece | tel. 210 4119545
www.timagenis-acoustics.com,
athens@timagenis-acoustics.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σε ευρεία κλίμακα, στην Ελλάδα η πιστοποίηση κτιρίων σύμφωνα με προδιαγραφές συστημάτων αειφορίας.

Μέχρι στιγμής στην Ελλάδα έχουν γίνει πιστοποιήσεις κτιρίων με βάση τα κριτήρια που ορίζονται από WELL, LEED και BREAM.

Οι πιστοποιήσεις διαβαθμίζονται σε Platinum, Gold, Silver και basic Certified.

Η διαδικασία επίτευξης του απαιτούμενου σκορ (score) το οποίο θα οδηγήσει στην εξασφάλιση της επιθυμητής πιστοποίησης, περιλαμβάνει την ικανοποίηση συγκεκριμένων προδιαγραφών που αφορούν στο εσωτερικό περιβάλλον των υπό εξέταση κατασκευών, δηλ. στην ποιότητα του αέρα, στην ανακύκλωση, στα χρησιμοποιούμενα υλικά και άλλα. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται και η ακουστική / ηχομόνωση / ηχοπροστασία των κτιρίων και των κτιριακών εγκαταστάσεων.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τόσο οι απαιτήσεις ακουστικής, ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας των συστημάτων αειφορίας όσο και ο τρόπος ενσωμάτωσης αυτών στις ελληνικές κατασκευές, μέσω θεωρητικής ανάλυσης και εφαρμοσμένων παραδειγμάτων εργασίας.

The role of the Acoustic Consultant in the correct integration of sustainability systems during the Architectural Design process

ABSTRACT

In the recent years, the certification of buildings according to various sustainability systems has been extensively developed in Hellas.

So far, numerous Hellenic buildings have been certified based on WELL, LEED, and BREAM standards.

The certification levels range from Platinum to Gold, Silver, and “basic Certified”. Attaining these certifications requires meeting specific criteria related to the building's internal environment, including air quality, recycling practices, and materials used. Among these criteria, room acoustics, sound insulation, and soundproofing of buildings and their mechanical systems are also crucial.

The present paper, discusses the acoustic requirements of these sustainability systems and their practical integration into the architectural design process, by providing a theoretical framework followed by an analysis of applied examples from various, related to the subject matter, projects.

Key Words: Acoustics, Sound, WELL, LEED , BREEAM

Εισαγωγή | Πως φθάσαμε εδώ ;

Τα συστήματα¹ αξιολόγησης βιωσιμότητας όπως το **WELL (WELL Building Standard)**, το **BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology)** και το **LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)** ξεκίνησαν ως απάντηση στις περιβαλλοντικές προκλήσεις στα τέλη του 20^{ού} αιώνα. Με την αυξανόμενη παγκόσμια ευαισθητοποίηση για την κλιματική αλλαγή, την εξάντληση των πόρων και την περιβαλλοντική υποβάθμιση, η κατασκευαστική βιομηχανία αναγνώρισε την ανάγκη για τυποποιημένες πρακτικές που θα μείωναν το οικολογικό της αποτύπωμα.

Ταυτόχρονα με την βιοκλιματική τους σημασία τα συστήματα αειφορίας εξυπηρετούν και έναν σημαντικό πρακτικό σκοπό. Λειτουργούν (όταν εφαρμόζονται

¹ **Πρότυπο:** Διεθνώς συμφωνημένες επιστημονικές μέθοδοι και προδιαγραφές μετρήσεων από τον ανεξάρτητο μη κυβερνητικό & μη ιδιωτικό φορέα ISO (Προφερόμενο ως ΑΪΣΟ – από την Ελληνική λέξη «Ίσον»).

Σύστημα: Απλοποιημένες προδιαγραφές σχεδιασμού (τιμές στόχοι μελέτης) και εύχρηστες (μη επιστημονικές) διαδικασίες μετρήσεων που έχουν συνταχθεί από φορείς ιδιωτικής πρωτοβουλίας με την καθοδήγηση ειδικών ανά θέμα (ακουστική, φωτισμός, διαχείριση πόρων νερού κλπ).

στην πραγματικότητα) ως ένα κοινό οριζόντιο και κατακόρυφο² παγκόσμιο σύστημα κατάταξης, καταγραφής και κοινοποίησης της βιοκλιματικής απόδοσης και της αρχιτεκτονικής τεχνολογίας των κτηρίων, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής τους τοποθεσίας. Αυτή η παγκοσμιοποιημένη προσέγγιση επιτρέπει σε αγοραστές ή επενδυτές οι οποίοι δεν είναι εξοικειωμένοι με τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε τοπικής αγοράς να μπορούν να γνωρίζουν επακριβώς την ποιότητα και την απόδοση του κτηρίου για το οποίο ενδιαφέρονται. Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα αειφορίας διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη στη διεθνή αγορά ακινήτων, ενώ ταυτόχρονα προάγουν πρότυπα που συνδέονται με την αειφόρο ανάπτυξη και την καινοτομία στην κατασκευαστική τεχνολογία.

Μέσα στο ευρύτερο παγκόσμιο πλαίσιο εξέλιξης και βελτίωσης του δομημένου περιβάλλοντος, στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια έχει υιοθετηθεί η εφαρμογή των τριών κύριων εθελοντικών συστημάτων αειφορίας, (WELL, BREEAM και LEED), σε πολυάριθμα κτήρια. Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία εξετάζει τα προαναφερθέντα ζητήματα, εστιάζοντας στα θέματα ακουστικής - ηχομόνωσης - ηχοπροστασίας. Συγκεκριμένα, συζητούνται τόσο μέσω θεωρητικής ανάλυσης όσο και μέσω εφαρμοσμένων παραδειγμάτων εργασίας η γενική φιλοσοφία λειτουργίας των συστημάτων αειφορίας, οι τεχνικές τους απαιτήσεις και, κυρίως, ο τρόπος ενσωμάτωσής τους στην ελληνική πραγματικότητα.

1. Γενική διάρθρωση | Στρατηγική συστημάτων αειφορίας

Για την εξασφάλιση της επιθυμητής πιστοποίησης όλα τα συστήματα αειφορίας, περιλαμβάνουν την ικανοποίηση συγκεκριμένων προδιαγραφών (κριτηρίων) για κάθε μελετητικό τομέα (κατηγορίες) που αφορούν κυρίως το εσωτερικό περιβάλλον των υπό εξέταση κατασκευών, (δηλ. στην ποιότητα του αέρα, στην ανακύκλωση των απορριμμάτων, στα χρησιμοποιούμενα υλικά της κατασκευής εν γένη) καθώς και τις πολιτικές χρήσεων του κτηρίου (δηλαδή εάν προσφέρει υγιεινά γεύματα στους εργαζόμενους, εάν διαθέτει σηματοδότηση των ονομάτων των χώρων, εάν διαθέτει θέσεις στάθμευσης για ποδήλατα κ.α.). Για κάθε κριτήριο που ικανοποιείται, το κτήριο αποκομίζει βαθμούς, οι οποίοι, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, συνθέτουν ένα συνολικό σκορ. Ανάλογα με το τελικό αυτό σκορ, το κτήριο κατατάσσεται σε διαφορετικές βαθμίδες, οι οποίες αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Μεταξύ των θεμάτων ποιότητας των εσωτερικών χώρων, περιλαμβάνεται και η ακουστική - ηχομόνωση - ηχοπροστασία των κτιρίων και των κτιριακών εγκαταστάσεων (κατηγορία) η οποία συμπεριλαμβάνει μετρήσιμους δείκτες (κριτήρια) όπως: η ηχομονωτική απόδοση των χωρισμάτων εσωτερικών χώρων, ο χρόνος αντήχησης των κλειστών χώρων, η στάθμη θορύβου που παράγεται από την λειτουργία των μηχανημάτων κ.α. Κατά κανόνα όσον αφορά τα θέματα ακουστικής -

² Δηλαδή τόσο για κάθε μελετητικό αντικείμενο (ακουστική, φωτισμός, εξοικονόμηση νερού, προσβασιμότητα, γενικό ενεργειακό αποτύπωμα κ.α.) όσο και για την αναλυτική απόδοση των δομικών στοιχείων ανά κατηγορία (για την ακουστική: ηχομονωτική ικανότητα, ποιότητα εσωτερικού ακουστικού περιβάλλοντος, στάθμες θορύβου βάθους κ.α.)

ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας η γενική λογική και των τριών συστημάτων είναι ο διαχωρισμός τους σε δύο στάδια – φάσεις, ήτοι:

1.1 Στάδιο σχεδιασμού [Documentation Review]

Σε αυτό στάδιο, οι ομάδες του έργου υποβάλλουν λεπτομερή τεκμηρίωση (πιστοποιητικά ακουστικής απόδοσης για τις ακριβείς λεπτομέρειες των δομικών στοιχείων και ακουστικών διατάξεων (λ.χ. ηχοαπορροφητικές Ψ/Ο), που προβλέπονται από την αρχιτεκτονική μελέτη). Ο στόχος της ανασκόπησης τεκμηρίωσης (documentation review) είναι να δείξει αναλυτικά ποια κριτήρια πρόκειται να καλύψει / υλοποιήσει η μελέτη. Η ανασκόπηση πραγματοποιείται από τους ιδιωτικούς φορείς του εξωτερικού (**IWBI** ή **GBCI** ή **BREEAM**) με βάση τα κατά δήλωση στοιχεία του Συμβούλου Αειφορίας, όπως αυτός τα εισάγει στην ηλεκτρονική πλατφόρμα του κάθε συστήματος. Τα σχόλια που συνήθως επιστέφονται σε αυτό το στάδιο αφορούν κυρίως στην πληρότητα των στοιχείων που δηλώνονται (λ.χ. εάν συμπεριλαμβάνεται ο αριθμός των εγγράφων που αναφέρονται).

1.2 Στάδιο επαλήθευσης [Performance Verification]

Το δεύτερο στάδιο είναι η επαλήθευση της δηλούμενης απόδοσης, η οποία πραγματοποιείται όταν το κτήριο έχει ολοκληρωθεί και είναι σε πλήρη λειτουργία. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει επιθεωρήσεις για έλεγχο ταύτισης της υπάρχουσας κατάστασης με τα υποβληθέντα σχέδια και μετρήσεις της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος του κτηρίου, όπως η ποιότητα του αέρα, η ποιότητα του νερού, τα επίπεδα φωτισμού και η θερμική άνεση, μεταξύ άλλων, αλλά και η ακουστική και ηχομόνωση. Εντούτοις μια κύρια διαφορά που θα πρέπει να σημειωθεί είναι το ότι για την απόκτηση της βεβαίωσης βιοκλιματικού σχεδιασμού κατά WELL & κατά BREEAM η επιτόπια επαλήθευση του υλοποιημένου αποτελέσματος με εκτέλεση φυσικών μετρήσεων (Performance Verification) είναι υποχρεωτική³. Στην μεν περίπτωση του WELL αυτές εκτελούνται από ειδικούς που επιλέγονται από την IWBI ενώ στην περίπτωση του BREEAM οι ηχομετρήσεις παραλαβής δύναται να εκτελεστούν και από τους μελετητές μόνον (όπως προβλέπεται από τον οδηγό του BREEAM) υπό την προϋπόθεση ότι αποδείξουν πως διαθέτουν επίσημη μετεκπαίδευση στο αντικείμενο της Κτηριακής Ακουστικής & Ηχομόνωσης (Subject Matter Experts)⁴. Αντιθέτως, στην περίπτωση του LEED, μέχρι και σήμερα⁵, όχι

³ Εφόσον επιλεγεί η ικανοποίηση κριτηρίων ακουστικής – ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας από τον ΚτΕ

⁴ Δηλαδή εποπτευόμενη μεταπτυχιακή ειδικότητα (Master's Expert) στο αντικείμενο – όχι βεβαιώσεις παρακολούθησης σεμιναρίων ή μετεκπαιδεύσεις σε τομείς μη σχετικούς με την κτηριακή ακουστική & ηχομόνωση – όχι ελεύθερη ή εποπτευόμενη έρευνα (δηλ. ελεύθερες δημοσιεύσεις ή διδακτορικό)

⁵ Κατά τον χρόνο σύνταξης του παρόντος, έχει επισήμως ανακοινωθεί από την GBCI ότι προβλέπεται μελλοντική τροποποίηση, πιθανώς στην έκδοση LEED v.5, με την εισαγωγή διαδικασίας επιβεβαίωσης βασισμένης στην απόδοση (performance - based) πριν την

μόνον δεν υφίσταται υποχρέωση επιτόπιας επαλήθευσης, αλλά η απόκτηση της βεβαίωσης αειφορίας (όσον αφορά τα υπό συζήτηση θέματα) μπορεί να ληφθεί εξ' εγγράφων απλώς υποβάλλοντας τα πιστοποιητικά εργαστηριακής απόδοσης (ακόμα και εάν αυτά υποβληθούν στο στάδιο της προμελέτης), κύριο παράγοντα που καθιστά την επιλογή του LEED έναντι του WELL & του BREEAM, προτιμητέα από τους Συμβούλους Αειφορίας και του Project Managers, παγκοσμίως.

Συνοψίζοντας επομένως η λογική εφαρμογής των συστημάτων αιφορίας αφορά στην δημιουργία ενός κανονιστικού πλαισίου λειτουργικότητας, το οποίο **δεν διερευνά την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής σύνθεσης του κτηρίου, αλλά επικεντρώνεται αποκλειστικά στην τυποποίηση των χώρων, την αποδοτική χρήση των ενεργειακών τους πόρων θέτοντας τεχνοκρατικές και μονοσήμαντες προδιαγραφές (κριτήρια) καθώς και την περιγραφή των πολιτικών λειτουργίας του κτηρίου.** Κοινή βάση όλων των συστημάτων είναι η συλλογή «πόντων» οι οποίοι στο τέλος της κατασκευής σηματοδοτούν το «Σκορ του κτηρίου», όπως ενδεικτικά φαίνεται κατωτέρω για την περίπτωση του συστήματος WELL.

[illegible]

Σχήμα 1.1 Well Score Card

απονομή της βεβαίωσης αιτιόφου απόδοσης του κτηρίου. Ωστόσο, βάσει της υπάρχουσας γνώσης των συγγραφέων, μέχρι στιγμής (τέλος 2024) κανένα κτήριο στην Ελλάδα δεν έχει λάβει βεβαίωση LEED μέσω επιτόπιων ηχομετρήσεων από ανεξάρτητους ελεγκτές.

2. Τα κύρια συστήματα αειφορίας | Ανασκόπηση

Ειδικότερα, πέραν της γενικής προσέγγισης που αναλύθηκε προηγουμένως, κάθε ένα από τα προαναφερθέντα συστήματα αειφορίας διακρίνεται από τη δική του μεθοδολογία εφαρμογής. Επιπλέον, οι στόχοι και οι επιδόσεις που απαιτούνται διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος του κτηρίου (όπως γραφεία, σχολεία, κατοικίες κ.ά.) αλλά και με την υποχρεωτικότητα επίτευξης τους (λ.χ. η ικανοποίηση ακουστικών στόχων δεν είναι υποχρεωτική – προαπαιτούμενη από κανένα σύστημα αειφορίας εκτός από το LEED για σχολικά κτήρια). Ωστόσο, καθώς ο στόχος της παρούσας μελέτης δεν είναι η απλή παρουσίαση των συστημάτων αειφορίας— (πληροφορία ήδη ευρέως διαθέσιμη στους επίσημους οδηγούς των συστημάτων), αλλά η εξέταση των μεθόδων αποτελεσματικής ενσωμάτωσης των ακουστικών απαιτήσεων αυτών των συστημάτων στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, η ανασκόπηση επικεντρώνεται στη γενική στρατηγική λειτουργίας των συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό, αναδεικνύονται οι διαφορές στη φιλοσοφία και τον τρόπο εφαρμογής τους⁶

2.1 BREEAM

Το BREEAM, που κυκλοφόρησε το 1990 στο Ηνωμένο Βασίλειο, ήταν το πρώτο σύστημα αυτού του είδους, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας των κτιρίων ως προς την ικανότητα τους να ξεπερνούν τις εκάστοτε εθνικές προδιαγραφές και ταυτόχρονα να μην επιβαρύνουν το υφιστάμενο περιβάλλον στο οποίο εντάσσονται. Η δομή του βασίζεται **στην επιτόπου του Έργου απόδειξη ότι το υλοποιημένο κτήριο παρουσιάζει ακουστική και ηχομονωτική απόδοση υψηλότερη από την ελάχιστη υποχρεωτική της χώρας στην οποία εφαρμόζεται (Local National Standards)**. Για τις περιπτώσεις όπου η εκάστοτε νομοθεσία δεν προβλέπει κάποια προδιαγραφή τότε ο μελετητής θα πρέπει να ικανοποιήσει τις τιμές στόχους που ορίζονται από το BREEAM (λ.χ. για την Ελλάδα, ο χρόνος αντήχησης που δεν ορίζεται στην Ελληνική Νομοθεσία). Τα επίπεδα κατάταξης του κτηρίου (ανάλογα με το τελικό συνολικό σκορ) παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

BREEAM rating	% score
Outstanding	≥85
Excellent	≥70
Very good	≥55
Good	≥45
Pass	≥30
Unclassified	<30

Σχήμα 2.2 Επίπεδα κατάταξης BREEAM

⁶ ΣΣ: Αν και ευνόητο, η ικανοποίηση των απαιτήσεων των συστημάτων αειφορίας δεν δικαιολογεί αποκλίσεις προς τα κάτω από τις καθορισμένες προδιαγραφές του ΕΚΚ.

2.2 LEED

Το LEED ακολούθησε το 1998, αναπτυγμένο στις Ηνωμένες Πολιτείες από το U.S. Green Building Council (USGBC), για να προωθήσει τον βιώσιμο σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων, στοχεύοντας στη δημιουργία ενός απλοποιημένου τυπολογίου πολύπλευρων στόχων προς επίτευξη από τους μελετητές. Όσον αφορά την ακουστική οι τιμές στόχοι είναι κατά κανόνα ελαστικότεροι ή ίσοι σε σχέση με τον Ελληνικό Κτηριοδομικό Κανονισμό και υποδεέστεροι της Κατηγορίας Α αυτού.

Τα επίπεδα κατάταξης του κτηρίου (ανάλογα με το τελικό συνολικό σκορ) παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:



Σχήμα 2.2 Επίπεδα κατάταξης LEED

2.3 WELL

Το WELL (International Well Building Institute), που εισήχθη το 2014, εστιάζει ολιστικά στην σχέση του ανθρώπου με το δομημένο περιβάλλον. Περιλαμβάνει 10 κατηγορίες (Concepts) που πρέπει να καλυφθούν για την απόκτηση της βεβαίωσης αειφορίας: Αέρας, Νερό, Διατροφή, Φως, Κίνηση, Θερμική Άνεση, Ακουστική Άνεση, Υλικά, Νους και Κοινότητα. Το κτήριο μπορεί να αποκτήσει το μέγιστο 100 βαθμούς από όλες τις ανωτέρω κατηγορίες, καθώς και 10 επιπλέον βαθμούς "καινοτομίας" (innovation) που απονέμονται για εξαιρετικές λύσεις που υπερβαίνουν τις βασικές απαιτήσεις του WELL μέσω δημιουργικών και αποτελεσματικών καινοτομιών και συγκεκριμένα:

- Σχεδιασμό Φωτισμού για τον Κιρκάδιο Ρυθμό (Circadian Lighting Design),
- Ενσωμάτωση Σχεδιασμού Βιοφιλίας (Biophilic Design Integration)
- Στοιχεία Σχεδιασμού για Σωματική Δραστηριότητα (Active Design Elements)
- Πρωτοβουλίες για Υγιεινή Διατροφή (Healthy Food Initiatives)
- Συστήματα Παρακολούθησης Ποιότητας Αέρα (Air Quality Monitoring)
- Υποστήριξη Ψυχικής Υγείας (Mental Health Support)

Τα επίπεδα κατάταξης του κτηρίου (ανάλογα με το τελικό συνολικό σκορ) παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:



Σχήμα 2.2 Επίπεδα κατάταξης WELL

3. Η Ελληνική Πραγματικότητα | Σύντομα Case Studies

Η υιοθέτηση των συστημάτων αειφορίας στην Ελλάδα, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, παραμένει προαιρετική. Ωστόσο, όπως είναι ευνόητο η εφαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας (Νόμος 1650/86 άρθρο 14, Ελληνικός Κτηριοδομικός Κανονισμός (ΕΚΚ) ΥΑ Α5/3010, ΥΑ 7034/1298, ΠΔ 1180/81, ΠΔ 149/2006, , κ.α) είναι υποχρεωτική.

Εντούτοις ειδικά για τον ΕΚΚ άρθρο 22, παρόλο που όπως αναφέρεται και εντός αυτού αν και η συμμόρφωση με το άρθρο 22 του ΕΚΚ είναι υποχρεωτική (για όλα τα νέα και ανακαινιζόμενα κτίρια), αξιοσημείωτο είναι ότι, η υποβολή αντίστοιχης μελέτης ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας στα γραφεία δόμησης δεν είναι επίσης υποχρεωτική. Αυτό το παράδοξο συχνά παρερμηνεύεται, ακόμη και από επαγγελματίες του κλάδου, ως ένδειξη μη υποχρεωτικότητας των προδιαγραφών του άρθρου 22. Μάλιστα, συνοδεύεται από εσφαλμένες ερμηνείες, όπως η θεωρία ότι το άρθρο 22 βρίσκεται σε «αναστολή» ή ότι μπορεί να εφαρμοσθεί μερικώς ή επιλεκτικά.

Αυτή η παρεξηγημένη προσέγγιση των θεμάτων ηχομόνωσης στα κτίρια έχει συχνά ως αποτέλεσμα την πρόκληση αντιπαράθεσεων, πολλές φορές με νομικές διαστάσεις, ανάμεσα σε κατασκευαστές και ιδιώτες, κυρίως σε περιπτώσεις αντιπαροχών⁷.

Επιπλέον, αυτή η νοοτροπία δεν είναι ανεπηρέαστη όσον αφορά την εφαρμογή των συστημάτων αειφορίας στην Ελλάδα. Αν και τα κτίρια που σχεδιάζονται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα αειφορίας, όπως τα WELL, LEED και BREEAM, συνήθως τηρούν με ακρίβεια τις επιστημονικές αρχές της ακουστικής, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, ακόμη και εμβληματικά έργα, στα οποία τα συστήματα αειφορίας δεν εφαρμόζονται όπως προβλέπεται. Οι αιτίες μπορεί να ποικίλλουν, από έλλειψη εξειδικευμένης επιστημονικής γνώσης μέχρι την πεποίθηση ότι «ο έλεγχος

⁷ Κατά κανόνα, οι κατασκευαστές βγαίνουν ζημιωμένοι από αυτές τις αντιπαράθεσεις, αφού κατά την κρίση των δικαστών (αναμενόμενο είναι ότι) το αντικειμενικό σημείο αναφοράς είναι τα (νομικά) όρια ακουστικής – ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας που αναφέρονται μέσα σε αυτόν.

συμμόρφωσης δεν θα πραγματοποιηθεί ποτέ, και συνεπώς δεν θα υπάρξουν συνέπειες από την απόκλιση της τεκμηρίωσης από την πραγματική κατάσταση του έργου»

Οι συγγραφείς του παρόντος άρθρου απορρίπτουν κατηγορηματικά αυτές τις προσεγγίσεις, καθώς θεωρούν ότι υπονομεύουν τη σωστή εφαρμογή των αειφόρων πρακτικών. Για την πληρέστερη κατανόηση των παραπάνω ζητημάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια συγκεκριμένες περιπτώσεις έργων που έχουν υλοποιηθεί από τους συγγραφείς, με στόχο την ολοκληρωμένη ανάλυση των παραγόντων που καθορίζουν την επιτυχή εφαρμογή των συστημάτων αειφορίας, αλλά και την προώθηση ενός επικοινωνιακού διαλόγου σχετικά με την ορθή εφαρμογή τους.

3.1 Το κτήριο γραφείων με την πρώτη Ακουστική μελέτη & ικανοποίηση του συστήματος WELL στην Ελλάδα

Η ακουστική μελέτη αφορά στην μετατροπή π. κτιρίου της ΕΤΕ επί της οδού Χρυσοσπηλιωτίσσης 9 [αρχιτέκτονες Urban Soul Project] σε κτίριο διοίκησης της εταιρείας Prodea και η οποία ανετέθη στους συγγραφείς στις αρχές του 2019.

Στην συνέχεια και μετά από επέκταση της αρχικής σύμβασης, ανατέθηκε και η ακουστική μελέτη που αφορούσε στην ειδική ακουστική μελέτη για την πιστοποίηση ολόκληρου του κτιρίου με το σύστημα **WELL**.

Η βεβαίωση αειφορίας WELL αποδόθηκε στο κτίριο μετά από προέλεγχο επί των σχεδίων και των Εργαστηριακών Πιστοποιητικών και στην συνέχεια την επιτόπια από την IWBI επαλήθευση με την διενέργεια εκτεταμένων ηχομετρήσεων (P.V. Test).

Εκ των ανωτέρω ελέγχων δεν προέκυψε ανάγκη διόρθωσης των ακουστικών προτάσεων και οι πόντοι της ακουστικής αποδόθηκαν με επιτυχία ήδη από την αρχή.

Η ακουστική μελέτη που συντάχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος WELL για το συγκεκριμένο κτίριο έχει ήδη καθιερωθεί ως πρότυπο και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκπόνηση παρόμοιων μελετών, τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες χώρες. Πολλοί επαγγελματίες στον τομέα της ακουστικής έχουν αρχίσει να υιοθετούν **τη μεθοδολογία της χρωματικής κωδικοποίησης των δομικών στοιχείων, μια μεθοδολογία που έχει κατοχυρωθεί στον Οργανισμό Πνευματικής Ιδιοκτησίας⁸** εδώ και αρκετά χρόνια και εφαρμόζεται από τους συγγραφείς ήδη πριν από την ένταξή της στο WELL.



Σχήμα 3.1 Πρόσωση κτιρίου Prodea

⁸ Αριθμός Πιστοποιητικού 3579



Σχήμα 3.2 Εσωτερική άποψη



Σχήμα 3.3 Αίθουσα συνεδριάσεων

3.2 BREEAM value engineering με εγχώρια παραγωγή και πιστοποίηση ηχοαπορροφητικών πλακών σε κτήριο διεύθυνσης δημόσιας εταιρείας

Η ακουστική μελέτη αφορά στο κτήριο του Δημοσιογραφικού Οργανισμού Λαμπράκη (ΔΟΛ) [αρχιτέκτονες decaARCHITECTURE] επί της Χρ. Λαδά, το οποίο μεταβιβάστηκε σε Γερμανική εταιρεία και η οποία είχε σκοπό να μετατρέψει το κτήριο σε «HUB» πολλαπλών χρήσεων.

Το 2022, ανατέθηκε στους συγγραφείς η σύνταξη ακουστικής μελέτης η οποία θα έπρεπε πέραν του ΕΚΚ να ικανοποιεί και τα κριτήρια του συστήματος αειφορίας **BREEAM**.

Οι προδιαγραφές που τέθηκαν από το νέο ιδιοκτήτη, ήταν ιδιαίτερα αυστηρές δεδομένου ότι το κτήριο όντας σε θορυβώδες περιβάλλον θα έπρεπε να εξυπηρετήσει ποικιλία μη μόνιμων χρηστών και χρήσεων και ως εκ τούτου η αρχιτεκτονική μελέτη διαμόρφωσε ευέλικτους και ενοποιημένους χώρους.

Κατά τον χρόνο της συγγραφής, το κτήριο βρίσκεται στο τελικό στάδιο ολοκλήρωσης της κατασκευής του. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα ηχομετρήσεις, ανταποκρίνεται πλήρως στις προδιαγραφές του Κ.τ.Ε., καθώς και στις απαιτήσεις του BREEAM. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου έργου ήταν η (έπειτα από μέριμνα του Αναδόχου), κατασκευή και η εγχώρια (εντός Ελλάδος) Εργαστηριακή Πιστοποίηση της ηχοαπορροφητικής ικανότητας των πλακών Tektalan, οι οποίες, έχουν ήδη γίνει αποδεκτές σε επίπεδο τεκμηρίωσης από τον εκπρόσωπο του BREEAM.



Σχήμα 3.5 Πρόσοψη κτιρίου ΔΟΛ



Σχήμα 3.6 Κάτοψη τυπικού ορόφου



Σχήμα 3.7 Απόσπασμα εγκάρσιας τομής

3.3 Το ατυχές παράδειγμα LEED σε πολυδύναμο κτηρίου εκμάθησης τεχνών

Το τελευταίο παράδειγμα αφορά σε μελέτη ανέγερσης «πολυδύναμου κέντρου τεχνών», στο οποίο διδάσκονται καλλιτεχνικά μαθήματα, όπως μουσική, χορός, ζωγραφική, γλυπτική και άλλα. Ωστόσο, όπως αποδείχθηκε στη συνέχεια, το κτίριο τελικά προοριζόταν να στεγάσει συμβατικές σχολικές αίθουσες, για χρήση κατά τις ώρες επέκτασης του κανονικού σχολικού προγράμματος, παρά τις αρχικές επίσημες ανακοινώσεις που τόνιζαν ότι οι χώροι δεν θα λειτουργούσαν ως παραδοσιακοί χώροι διδασκαλίας.

Στην σχετική σύμβαση για την ανάθεση της ακουστικής μελέτης και της μελέτης LEED δεν υπήρχε αναφορά στους πραγματικούς σκοπούς του νέου κτιρίου. Το ανωτέρω γεγονός δημιούργησε εξ' αρχής σύγχυση κατά την σύνταξη των μελετών, τα οποία – στο τέλος – συνοψίζονται στην άρνηση καθορισμού επί των σχεδίων των πραγματικών χρήσεων των αιθουσών και στη επιμονή αντί γνησίων πιστοποιητικών ακουστικής απόδοσης των διαφόρων οικοδομικών στοιχείων (π.χ. Ψ/Ο) να «δημιουργηθούν διαγράμματα» που να ταιριάζουν με τα όσα λέει ο Σύμβουλος Αειφορίας αφού όπως ειπώθηκε «κανείς δεν πρόκειται να τα ελέγξει».

Στο ανωτέρω έργο, οι συγγραφείς αποφάσισαν να διακόψουν τη συνεργασία και να αποχωρήσουν από το Έργο, παρά του ότι όλα τα υπόλοιπα παραδοτέα της ακουστικής μελέτης είχαν ολοκληρωθεί και υποβληθεί και παρά την ενημέρωση που έλαβαν ότι η συμβατικά οφειλόμενη αμοιβή τους θα καταβαλλόταν μόνο εάν συναινούν στην υπογραφή εγγράφων που θα τους δίνονταν, με εργαστηριακά δεδομένα, τα οποία δεν είχαν βασιστεί σε πραγματικές μετρήσεις.

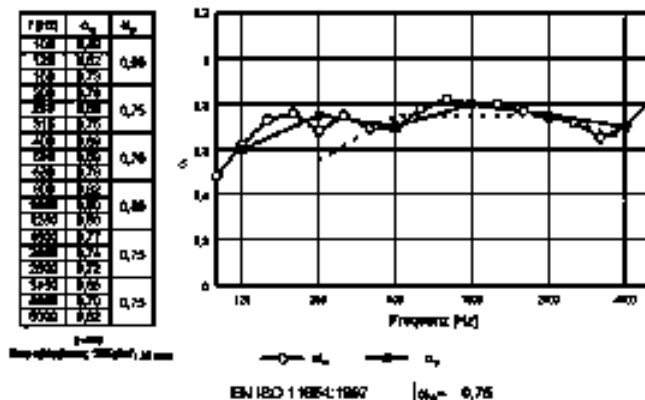
Λαμβάνοντας υπόψιν τα ανωτέρω, ευνόητο είναι ότι καθοριστικό λόγο για την ουσιαστική εφαρμογή συστημάτων αειφορίας, διαδραματίζει η ύπαρξη διαφανούς και ειλικρινούς συνεργασίας. Με γνώμονα τις αρχές αυτές είναι δεδομένο ότι το Έργο θα οδηγηθεί στην επιτυχή ολοκλήρωση ακόμη και εάν χαρακτηρίζεται από πολλαπλές τεχνικές απαιτήσεις. Όπως στα παραδείγματα της μετατροπής του κτιρίου της Prodea και του κτιρίου του ΔΟΛ, η τεχνική ικανότητα, ο επαγγελματισμός και η αποτελεσματικότητα του διαχειριστή του κάθε Έργου (Project Manager), οδήγησαν σε άρτια αποτελέσματα και σε μια διάφανη και αγαστή συνεργασία μεταξύ όλων των

μερών. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου επικρατούν πρακτικές παραπληροφόρησης και απόπειρες παράκαμψης των καθορισμένων διαδικασιών, όπως στο τρίτο έργο, ανακύπτουν προβλήματα δυσλειτουργίας και δημιουργίας έντασης μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο σύμβουλος οφείλει να επιδείξει όχι μόνο την επιστημονική του επάρκεια και εξειδίκευση, αλλά και το ακέραιο ήθος του, λειτουργώντας ως πρότυπο ακαδημαϊκής αριστείας και επαγγελματικής ηθικής.

Εξάλλου, ποια σοβαρή εταιρεία με μακρά και επιτυχημένη παρουσία στον κατασκευαστικό τομέα θα επιθυμούσε να συνεργάζεται με σύμβουλο ακουστικής ο οποίος παραποιεί αποτελέσματα ή εκδίδει ανυπόστατα πιστοποιητικά, υποβαθμίζοντας έτσι το ίδιο το Έργο (και συνεπακόλουθα την πολύχρονη επιστημονική βάση του πεδίου της ακουστικής) ;



Σχήμα 3.8 Απόσπασμα τομής τυπικής αίθουσας διδασκαλίας



Σχήμα 3.9 Απόσπασμα διαφημιστικού φυλλαδίου, το οποίο επιβλήθηκε από τον Project Manager παρά την ασυμβατότητά του με το LEED. Η δήλωση απόδοσης λάμβανε ως παραδοχές διάκενο 40 cm χωρίς H/M, εντός αυτού. Στο έργο το αληθινό διάκενο ήταν 48 cm και υπήρχε πληθώρα H/M εξοπλισμού εντός του διακένου, παράγοντες για τους οποίους δεν υπήρχαν μετρητικά δεδομένα. Το ανωτέρω θεωρήθηκε αντιεπιστημονικό και αντιδεολογικό από τους συγγραφείς, οι οποίοι αποχώρησαν από το έργο

4. Η ευθύνη του συμβούλου ακουστικής

Όπως έχουν αναφέρει οι Τιμαγένης Θ., Τιμαγένης Ι. (2018) « [...] σε ένα Έργο δημιουργούνται πάντοτε ερωτήματα αρχών και επιλογών που πρέπει να αντιμετωπίσει ο επαγγελματίας ακουστικός, αν θέλει η συμβολή του να είναι πράγματι αποτελεσματική και πιο συγκεκριμένα ποιόν δηλαδή πρόκειται να εξυπηρετήσει [...]» Έτσι λοιπόν και στην περίπτωση των συστημάτων αειφορίας: Τον Project Manager από τον οποίον ενδέχεται ο ακουστικός να μην προσληφθεί ξανά στο μέλλον εάν δεν «νουθετηθεί» και παραμείνει ταγμένος στους κανόνες της επιστήμης του; Τον ΚτΕ ο οποίος πολλές φορές επηρεάζεται λανθασμένα από τον σύμβουλο αειφορίας λόγω του ο σύμβουλος καθοδηγεί την γραφειοκρατική (και όχι την τεχνικά ουσιαστική) διαδικασία της απόκτησης βεβαίωσης αειφορίας ; Ή τελικά τους, μακροπρόθεσμα, χιλιάδες των χρηστών του έργου οι οποίοι θα είναι οι αποδέκτες των αποτελεσμάτων της πραγματικής ή μη εφαρμογής των κανόνων του εκάστοτε συστήματος αειφορίας;

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες σελίδες της παρούσας μελέτης, δύναται να υποστηριχθεί ότι **η αποτελεσματική εφαρμογή των συστημάτων αειφορίας** προϋποθέτει την απαλλαγή όλων των εμπλεκόμενων φορέων σε ένα έργο (δηλαδή του Διευθυντή Έργου και του ΚτΕ και της μελετητικής ομάδας) **από προσχηματικές ή ανεπαρκείς προσεγγίσεις**, οι οποίες βασίζονται σε πρακτικές υποβολής πλασματικών ή παραποιημένων ακουστικών συντελεστών και παραμέτρων μέρους ή ολόκληρου του Έργου. Τέτοιες προσεγγίσεις συχνά απορρέουν **είτε από τη νοοτροπία της «πολιτικής ορθότητας» με σκοπό τη διατήρηση καλού κλίματος συνεργασίας, είτε από την προσπάθεια απλοποίησης της διαδικασίας για τη διευκόλυνση του Project Management**. Αντίθετα, η συγκέντρωση των προσπαθειών όλων των συμμετεχόντων θα πρέπει να επικεντρώνεται στην **εκπλήρωση των αρμοδιοτήτων τους, όπως έχουν οριστεί από τον Κύριο του Έργου**, και ειδικότερα στην υλοποίηση των προδιαγραφών των συστημάτων αειφορίας μέσω της τεχνοοικονομικής και χρονικής αξιολόγησης όλων των παραγόντων του έργου (Value Engineering).

Εδώ, ο/η επαγγελματίας σύμβουλος ακουστικής διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο, καθότι τελικά εκείνος / εκείνη είναι που φέρει αφενός το βάρος του να μην υποκύψει στις πιέσεις κατασκευής πλασματικών δεδομένων αλλά και στο να διατηρήσει τις μεθόδους και αρχές της επιστήμης της ακουστικής στο ακέραιο. Ειδικά για το τελευταίο ο Σύμβουλος Ακουστικής, θα πρέπει πάντα να θυμάται ότι με το να υπογράφει μελέτες οι οποίες συμπεριλαμβάνουν μη υπαρκτά ή κατασκευασμένα⁹ δεδομένα, δεν αποτελεί μόνον θέμα ηθικό ή επαγγελματικής ευθύνης, αλλά και σοβαρής υποβάθμισης της ίδιας της επιστήμης, καθιστώντας έτσι αχρείαστη ακόμα και την ειδικότητα του Συμβούλου Ακουστικής¹⁰.

⁹ Άνευ μετρήσεων ή κατά δήλωση των προμηθευτών δεδομένα

¹⁰ Αφού, για την υπογραφή μελετών που δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα ή δεν περιλαμβάνουν αληθή δεδομένα η ύπαρξη του ειδικού δεν είναι απαραίτητη.

5. Το δίπολο πρόβλεψη – ένταξη | Πρακτικοί κανόνες εφαρμογής

Λαμβάνοντας υπόψη τις έννοιες και τις αρχές που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, οι συγγραφείς παρουσιάζουν έναν συνοπτικό πρακτικό οδηγό με στόχο τη διευκόλυνση της υλοποίησης και της εφαρμογής θεμάτων που αφορούν την ακουστική, την ηχομόνωση και την ηχοπροστασία στο πλαίσιο των συστημάτων αειφορίας.

5.1 Κρυφά κόστη

Στα κτήρια που επιδιώκουν πιστοποίηση μέσω συστημάτων αειφορίας, όπως LEED, BREEAM ή WELL, παρατηρείται συχνά αυξημένη χρήση ειδικά κατασκευασμένων (custom made) δομικών στοιχείων. Η πρακτική αυτή προκύπτει από την επιδίωξη των αρχιτεκτονικών μελετών να δημιουργήσουν μοναδικά και αισθητικά ελκυστικά κτίρια, τα οποία δεν μπορούν να υλοποιηθούν πάντοτε με τη χρήση τυποποιημένων δομικών στοιχείων. Ωστόσο, αυτή η επιλογή συχνά **συνοδεύεται από αυξημένα «κρυφά κόστη», τα οποία δεν γνωστοποιούνται εξ αρχής στον ΚτΕ**. Ορισμένοι σύμβουλοι αειφορίας, στην προσπάθειά τους να εξασφαλίσουν νέες αναθέσεις έργων, υποβαθμίζουν αυτά τα κόστη, παρουσιάζοντας μια χαμηλότερη συνολική εκτίμηση του κόστους απόκτησης της πιστοποίησης.

Ένα παράδειγμα είναι τα κουφώματα (θύρες και παράθυρα), των οποίων ο δείκτης ηχομόνωσης έναντι αερόφερτου θορύβου εξαρτάται από τις διαστάσεις. Αν, για παράδειγμα, ένα παράθυρο είναι πιστοποιημένο για συγκεκριμένο μέγεθος (π.χ. 1.25 x 1.50 m), η πιστοποίηση αυτή δεν είναι κατάλληλη για μεγαλύτερες προσόψεις με υάλινα στοιχεία, όπως διαστάσεων 2,5 m x 2,5 m. Αυτές οι ιδιαιτερότητες οδηγούν στην ανάγκη προσαρμογής και πιστοποίησης των δομικών στοιχείων για την επίτευξη των προδιαγραφών.

5.2 Σχεδιαστικοί περιορισμοί

Οι πιστοποιήσεις LEED και WELL επιβάλλουν αυστηρές απαιτήσεις για την ακουστική και την ηχομόνωση, οι οποίες μπορούν να δυσχεράνουν τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Η διασφάλιση της άνεσης και της υγείας των χρηστών απαιτεί τον έλεγχο θορύβου, αντήχησης και ηχομόνωσης, κάτι που συχνά επιβάλλει τη χρήση εξειδικευμένων υλικών και μεθόδων κατασκευής. Αυτές οι προσαρμογές, όπως αυξημένο πάχος τοίχων και ειδικά υλικά, περιορίζουν την ευελιξία στον σχεδιασμό. Επιπλέον, ο έλεγχος θορύβου από εξωτερικές πηγές και συστήματα HVAC μπορεί να επηρεάσει τη διάταξη και την αισθητική του κτιρίου, περιορίζοντας τις δημιουργικές επιλογές των αρχιτεκτόνων.

Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό τόσο ο Κύριος του Έργου (ΚτΕ) όσο και η ομάδα των αρχιτεκτόνων να ενημερώνονται από την πρώτη συνάντηση ότι η εφαρμογή των ακουστικών προδιαγραφών σύμφωνα με τα πρότυπα WELL, LEED & BREEAM πρέπει να ακολουθείται πιστά. Αυτό μπορεί, δυστυχώς, να οδηγήσει σε ορισμένες

παραχωρήσεις από πλευράς αισθητικής καθώς η βασική προτεραιότητα αυτών των συστημάτων είναι η λειτουργικότητα, η άνεση των χρηστών και η εξοικονόμηση όρων, παρά η αισθητική λειτουργία του χώρου. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο διαφορετικά κτήρια που έχουν επιτύχει LEED ή WELL ή BREEAM έχουν παρόμοιο εσωτερικό σχεδιασμό. Για τις περιπτώσεις που κάποιος θα ήθελε να ξεφύγει από την «αισθητική τυποποίηση» που οδηγεί η εφαρμογή των συστημάτων αειφορίας, τότε αυτό σημαίνει αύξηση τους κόστους κατασκευής της τάξεως έως και 40% αφού για τις περιπτώσεις bespoke design εκτελούνται εργαστηριακές πιστοποιήσεις από την αρχή για όλες τις σχετικές με το WELL & LEED ιδιότητες των υλικών.

5.3 Ανάλυση ευθύνης

Όπως είναι γνωστό η ακουστική διέπεται από ένα σύμπλεγμα μετρήσιμων παραμέτρων. Δεδομένης και της ραγδαίας εξέλιξης των δυνατοτήτων του μετρητικού εξοπλισμού υπάρχει απόλυτη δυνατότητα να μετρηθεί με υψηλότερη ακρίβεια το τελικό αποτέλεσμα ενός υλοποιημένου Έργου. Ως εκ τούτου ο επαγγελματίας σύμβουλος ακουστικής δεν θα πρέπει να «ενδίδει» σε πιέσεις κατασκευής μετρητικών δεδομένων ή επικύρωσης ανυπόστατων εγγράφων, ακόμα και ένα αυτό (αδίκως) του στερήσει μέρος ή ολόκληρη την αμοιβή τού. Ενδεικτικά, οι συγγραφείς **μόνον κατά το έτος 2024** κληθήκαν σε 3 κτήρια προκειμένου να διερευνήσουν τον λόγο για τον οποίο υφίσταντο παράπονα θορύβου από τους χρήστες που μίσθωναν τα κτήρια (δηλαδή όχι τον ΚτΕ) παρά το γεγονός ότι όλα τα κτήρια διέθεταν LEED με βαθμούς στην κατηγορία ακουστικής. Τα πορίσματα των ελέγχων ανέδειξαν τα ακόλουθα:

- Στην πρώτη περίπτωση δεν υφίστατο σύμβουλος ακουστικής (παρόλο που το εν λόγω σύστημα στις οδηγίες του υποχρεώνει την ύπαρξη του) διότι ο σύμβουλος αειφορίας «έκρινε» (!) ότι η υποβολή των διαφημιστικών φυλλαδίων ήταν αρκετή για να στηριχθεί όλη η κατασκευή και όλη η απόκτηση της βεβαίωσης απόδοσης αειφορίας.
- Στην δεύτερη περίπτωση η μελέτη ακουστικής «διέθετε την δικλείδα» ότι τα κουφώματα του εξωτερικού κελύφους (!) «μπορούν να αποδώσουν ή περισσότερο ή λιγότερο από την δήλωση του προμηθευτή» και έτσι δεν είχε ζητηθεί ποτέ πιστοποιητικό ηχομόνωσης για το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε.
- Στην τρίτη περίπτωση η μελέτη ακουστικής για τα θέματα ακουστικής – ηχομόνωσης ήταν ανύπαρκτη και είχε υπογραφεί δήλωση τήρησης των R_w από το ίδιο τον αντιπρόσωπο της ξένης εταιρίας των χωρισμάτων, ενώ όταν κατά τον αρχικό έλεγχο ρωτήσαμε ποιο ήταν το δωμάτιο πιλότος η απάντηση του εισαγωγέα των χωρισμάτων ήταν πως «δοκίμιο που μετρήθηκε στο εργοταξιακό Mock-Up αντικαταστάθηκε για τεχνικούς λόγους και δεν είναι πια διαθέσιμο»
- Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι όλα τα συστήματα αειφορίας περιλαμβάνουν στις προϋποθέσεις συμμετοχής τους (terms & conditions) τον ρητό και απαρέγκλιτο όρο **ότι ο σύμβουλος ακουστικής, υπογράφοντας την μελέτη του ότι φέρει πλήρη ευθύνη για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που δηλώνει ή/και χρησιμοποιεί.**

5.4 Χρονοδιάγραμμα

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των παραμέτρων που θέτουν τα συστήματα αειφορίας, η απόκτηση Εργαστηριακών Πιστοποιητικών για τα δομικά συστήματα είναι απαραίτητη στο στάδιο του σχεδιασμού, σύμφωνα και με τα τρία συστήματα. Αυτή η διαδικασία πρέπει να ολοκληρώνεται πριν την εκπόνηση της μελέτης εφαρμογής, διασφαλίζοντας έτσι και τη μελέτη ακουστικής. Ακόμα και αν δεν ανατεθεί η επίβλεψη της κατασκευής, ο Σύμβουλος Ακουστικής είναι πλήρως καλυμμένος, αφού η μελέτη του ευθυγραμμίζεται με τα πιστοποιημένα δομικά συστήματα (matching certificates to the design). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το LEED, στο οποίο οι επιτόπιες επαληθεύσεις δεν είναι υποχρεωτικές μέχρι τώρα. Ο σύμβουλος εξασφαλίζει έτσι, την εξ' εγγράφων ικανοποίηση των παραδοτέων του LEED, χωρίς τον κίνδυνο να επηρεαστεί η μελέτη του από σφάλματα ή αλλαγές που δεν έχουν εγκριθεί κατά το στάδιο της κατασκευής.

5.5 Σύγκρουση προδιαγραφών

Συχνά, σύμβουλοι αειφορίας, χρησιμοποιώντας ως πρόσχημα μικρή οικονομική επιβάρυνση, πείθουν τον Κύριο του Έργου (ΚτΕ) ότι θα επωφεληθεί εάν επιτύχει ταυτόχρονα τις προδιαγραφές δύο συστημάτων αειφορίας, όπως το LEED και το WELL. Ωστόσο, πέρα από το ότι στην πραγματικότητα, όπως προκύπτει από συζητήσεις των συγγραφέων με άλλες ειδικότητες (π.χ. συμβούλους Η/Μ εγκαταστάσεων), το κόστος της κατασκευής μπορεί να αυξηθεί ακόμα και έως ~35%, ενώ υπάρχουν ιδιαίτερες συγκρούσεις, ειδικά στα θέματα που αφορούν την ακουστική, την ηχομόνωση και την ηχοπροστασία, κατά την παράλληλη εφαρμογή των προδιαγραφών αυτών των συστημάτων. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα σύγκρουσης είναι τα διαφορετικά όρια που θέτουν τα δύο συστήματα για τον χρόνο αντήχησης. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις αιθουσών μουσικής & παραστατικών τεχνών, το **LEED** (ορθά) δεν ορίζει χρόνο αντήχησης καθότι (όπως είναι γνωστό) για τις περιπτώσεις αυτές ο χρόνος αντήχησης είναι συνάρτηση του όγκου της αίθουσας και του είδους χρήσης αυτής. Αντιθέτως το **WELL**, καθορίζει έναν μέγιστο χρόνο αντήχησης για όγκους αιθουσών έως και 570 m³ ο οποίος όμως είναι ακατάλληλος για περιπτώσεις αιθουσών κλασσικής μουσικής (λ.χ σύμφωνα με το διαδεδομένο μοντέλο του Harris στο οποίο εκ των πραγμάτων μια αίθουσα μουσικής με όγκο 570 m³ δεν μπορεί να υποστηρίξει καθόλου χρήσεις σχετικές με μουσική).

For projects in which the room type (RTR) in the table is not fully applicable, at least 85% of occupiable space, the following requirements apply (RTR):

a) Reverberation time is within the ranges (RTR) in the following table:

Room type	Room volume, v (cubic metres)	Reverberation Time, t (seconds) (s)
Area for working	$v < 280 \text{ m}^3$	$t < 0.6$
Area for lectures	$280 \text{ m}^3 < v \leq 570 \text{ m}^3$	$0.6 \leq t < 0.8$
Area for conferencing	$v > 570 \text{ m}^3$	$0.6 \leq t \leq 1.0$
Room with regularly used PA systems	N/A	$t \leq 1.0$
Area for storage	N/A	$t \leq 1.0$
Room for fitness	$v < 280 \text{ m}^3$	$0.7 < t \leq 0.9$
	$280 \text{ m}^3 < v \leq 570 \text{ m}^3$	$0.8 \leq t \leq 1.1$
	$v > 570 \text{ m}^3$	$1.0 \leq t \leq 1.8$
Room for music rehearsal	$v < 280 \text{ m}^3$	$t \leq 1.1$
	$280 \text{ m}^3 < v \leq 570 \text{ m}^3$	$1.0 \leq t \leq 1.8$

Source: BS EN ISO 140-4:2001, Technical Document (Technical Document)

Σχήμα 5.1 Προδιαγραφές RT_{60} βάσει WELL

Table 2. Reverberation time requirements

Room type	Description	TRT (sec), at 500 Hz, 1000 Hz, and 2000 Hz
Institutional	Individual room or suite	< 0.8
	Meeting or boardroom	< 0.8
	Executive or private office	< 0.8
	Conference room	< 0.8
Office building	Teleconference room	< 0.8
	Open-plan office without sound masking	< 0.8
	Open-plan office with sound masking	< 0.8
	Unplugged speech	< 0.7
Cinema	Amplified speech	< 1.0
Performing arts space	Theatre, concert, and multi-halls	Varies by application
Laboratory	Testing or research with internal speech communication	< 1.0
	Extensive public use and speech communication	< 0.8
Church, mosque, synagogue	General assembly with musical program	Varies by application
Library		< 1.0
Fitness facility, gymnasium	Gymnasium and open space	< 0.9
	Large-capacity space with speech amplification	< 1.0

Σχήμα 5.2 Προδιαγραφές RT_{60} βάσει LEED

Η ταυτόχρονη επιδίωξη πιστοποίησης μέσω δύο συστημάτων αειφορίας, όπως LEED και WELL, συχνά αποδεικνύεται ανούσια και οικονομικά ασύμφορη. Οι συγγραφείς, βάσει εμπειρίας από αντίστοιχες μελέτες, έχουν διαπιστώσει ότι τα κτήρια που συμμορφώνονται με τον κτηριοδομικό κανονισμό κατηγορίας Α προσφέρουν υψηλότερη ποιότητα από ό,τι οι προδιαγραφές των συστημάτων αειφορίας. Επιπλέον, η επίτευξη των στόχων ακουστικής, ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας προσθέτει ελάχιστους πόντους σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες, όπως ο φωτισμός, η σωστή σηματοδότηση και η ποιότητα αέρα. Δεδομένης, επομένως της ελάχιστης συμβολής των πόντων ακουστικής στο σύνολο επίτευξης ενός συστήματος αειφορίας, η επίτευξη του LEED και του WELL δεν εξαρτάται απόλυτα από την επίτευξη των ακουστικών στόχων. Ενίοτε λοιπόν, η προσπάθεια συμμόρφωσης με τις προδιαγραφές και των δύο συστημάτων καθίσταται περιττή, επιβαρύνοντας άσκοπα το κόστος της κατασκευής. Ως εκ τούτου, είναι πιο οικονομικό και πρακτικό να μην επιδιώκεται η ταυτόχρονη εφαρμογή των συστημάτων, όσον αφορά τα θέματα ακουστικής.

5.6 Επίβλεψη

Οι σύμβουλοι αειφορίας παραμένουν στο Έργο ακόμα και μετά την ολοκλήρωση του και συγκεκριμένα έως και την επίτευξη της πιστοποίησης. Αυτό μάλιστα προβλέπεται από όλα τα συστήματα αειφορίας καθότι φέρουν την ευθύνη για την οργάνωση, τον συντονισμό και την επίτευξη της διαδικασίας. Ως εκ τούτου για τις περιπτώσεις που ο ΚτΕ δεν αναθέτει την επίβλεψη της κατασκευής στον σύμβουλο ακουστικής, θα πρέπει να του γνωστοποιείται πως ο σύμβουλος αειφορίας θα πρέπει να παρέχει στον σύμβουλο ακουστικής, ρητή βεβαίωση η οποία θα περιλαμβάνεται μέσα στην μελέτη ακουστικής με την οποία (ο σύμβουλος αειφορίας) θα γνωστοποιεί πως έχει λάβει γνώση για το γεγονός ότι στον μελετητή ακουστικής δεν έχει ανατεθεί η επίβλεψη του Έργου και πως είναι ή δεν είναι σύμφωνος με αυτό. Συνδυαστικά με το #3 ανωτέρω αυτό υποστηρίζει την διαφάνεια στην εκτέλεση των καθηκόντων του Συμβούλου Ακουστικής

5.7 Επανέλεγχος επαλήθευσης

Κατά τις τελευταίες συναντήσεις των διεθνών τεχνικών επιτροπών όλων των συστημάτων αειφορίας, αποφασίστηκε η ενεργοποίηση της διαδικασίας επανελέγχου των πιστοποιημένων κτηρίων στο προσεχές διάστημα. Οι μέχρι στιγμής προτάσεις περιλαμβάνουν την εκ νέου διενέργεια μετρήσεων μετά από ~4 - 5 χρόνια χρήσης, με στόχο την επιβεβαίωση ότι συνεχίζουν να τηρούνται οι προδιαγραφές απόδοσης που ίσχυαν κατά τον αρχικό έλεγχο. Παρά το γεγονός ότι αυτό ενδέχεται να φαίνεται παράδοξο, στην πράξη έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις όπου σύμβουλοι αειφορίας ή

Project Managers προετοιμάζουν το έδαφος την -μετά τον έλεγχο- τροποποίηση δομικών στοιχείων τα οποία ήταν απαραίτητα για την εξασφάλιση της βεβαίωσης αειφορίας ή την τοποθέτηση δομικών στοιχείων που πληρούν τις προδιαγραφές LEED / WELL / BREEAM μόνο σε ορισμένα¹¹ τμήματα του κτηρίου, για λόγους μείωσης κόστους. Ο/Η Σύμβουλος Ακουστικής οφείλει να ενημερώνει έγκαιρα τον ΚτΕ σχετικά με αυτές τις πρακτικές, προκειμένου να τον προστατεύει από τυχόν αρνητικές συμβουλές που δίνονται «για χάριν ευκολίας», οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την ακουστική απόδοση και επομένως να οδηγήσουν στην μελλοντική αφαίρεση της βεβαίωσης αειφορίας.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Τιμαγένης Θ., Τιμαγένης Ι, Ο ρόλος του συμβούλου ακουστικής - Προβληματισμοί και εμπειρίες από την ακουστική μελέτη και την κατασκευή του Πολιτιστικού Κέντρου του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος, Συνέδριο Ακουστική 2018, ΕΛΙΝΑ, Πάτρα 2018
- [2] Hongisto, V. *A review of the effects of noise on productivity and well-being.* Journal of Environmental Psychology. 2017; 51: 116-123.
- [3] <https://www.iso.org/standards.html>
- [4] <https://www.breeam.com>
- [5] <https://www.usgbc.org/leed>
- [6] <https://www.wellcertified.com>
- [7] V.O Knudsen C.M Harris, *Le projet acoustique en architecture*, Dunod, Paris, 1957.

¹¹ Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τις προβλεπόμενες διαδικασίες, κατά τον φυσικό έλεγχο των κτηρίων, οι επιτόπιες επαληθεύσεις της ακουστικής απόδοσης πραγματοποιούνται σε όλη την έκταση του κτιρίου μέσω δειγματοληπτικών ή τυχαίων ελέγχων.



**Ακουστικός σχεδιασμός, ακουστική προσομοίωση,
πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής της
νέας Συνεδριακής Αίθουσας Περιφέρειας Θεσσαλονίκης.**

Γεώργιος Α. Χατζηγεωργίου B.Eng(Hons),
MSc Civil Engineering, MSc Architectural Acoustics
Πολιτικός Μηχανικός-Μηχανικός Σύμβουλος Ακουστικής
Δωδώνης 1, Θεσσαλονίκη, TK 55438
info@acoustical.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την μεθοδολογία αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού, τα αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην νέα συνεδριακή αίθουσα Περιφέρειας Θεσσαλονίκης σύμφωνα με το ISO 3382-2 καθώς και την σύγκριση με μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης CATT-Acoustic. Ο υπολογισμός διαφόρων ακουστικών παραμέτρων όπως Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 κτλ δίνει σημαντικά στοιχεία για την ακουστική συμπεριφορά και την αξιολόγηση του συγκεκριμένου χώρου. Η σχεδιαστική φιλοσοφία του χώρου, βασίστηκε σε ένα διατηρητέο κτίριο φωταερίου, συνδυάζοντας διαχυτικές, ανακλαστικές αλλά και απορροφητικές ζώνες. Μελετήθηκαν ταυτόχρονα τα δωμάτια Ελέγχου, καθώς επίσης και έγιναν προσομοιώσεις πρόβλεψης ηχομονωτικών παραμέτρων σε γειτνιάζουσα μηχανοστάσια. Στην αίθουσα οι λεπτομερείς αναλύσεις των ακουστικών παραμέτρων με βάση τις σχετικές θέσεις πηγής και ακροατή, δίνουν επίσης σημαντικά στοιχεία για την κρουστική απόκριση του χώρου και την αλληλεπίδραση χρόνου και συχνότητας. Κατά την διαδικασία των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε και πηγή θορύβου «Talk Box» το οποίο βαθμονομήθηκε σύμφωνα με την συχνотική απόκριση ανθρώπινης φωνής ώστε να μετρηθούν και να αξιολογηθούν οι δείκτες STI & STIPA, ενώ μετρήθηκαν και οι δείκτες για το σύστημα αναγγελίας κοινού (Public Address System) σύμφωνα με το IEC 60268-16:2020.

**Acoustic design, simulation, measurements and analysis
of the acoustics of the new Conference Hall of the
Thessaloniki Region.**

ABSTRACT

This paper presents the architectural and acoustic design methodology, the results of acoustic measurements carried out in the new conference hall of Thessaloniki Region in accordance with ISO 3382-2 as well as the comparison with the CATT-Acoustic acoustic simulation model. The calculation of various acoustic parameters such as Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 etc. gives important data for the acoustic behavior and evaluation of the

specific space. The design philosophy of the space was based on a preserved gas-light building, combining diffusive, reflective as well as absorptive zones. The Control rooms were studied at the same time, as well as simulations were made to predict soundproofing parameters in adjacent plant room. In the room, detailed analysis of the acoustic parameters based on the relative positions of the source and the listener, also give important information about the impact response of the room and the interaction of time and frequency. During the measurement process, STI & STIPA parameters, while the indicators for the Public Address System were also measured) according to IEC 60268-16:2020.

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή της αίθουσας

Το έργο βρίσκεται στην παλαιά περιοχή Μπεχ Τσινάρ, βόρεια του εμπορικού λιμένα της Θεσσαλονίκης. Σ' αυτή τη θέση το 1888 κτίστηκε το παλαιό εργοστάσιο φωταερίου Θεσσαλονίκης, το οποίο λειτούργησε έως το 1917, οπότε και καταστράφηκε το δίκτυο της πόλης από την πυρκαγιά. Το 1994 τρία παλαιά κτίρια του πρώην εργοστασίου φωταερίου χαρακτηρίστηκαν από το Υπ.Πο. (4η Εφορεία Νεοτέρων Μνημείων) ως ιστορικά διατηρητέα μνημεία.

Η σύγχρονη μελέτη αφορούσε στη δημιουργία ενός συγκροτήματος με την κατασκευή νέων κτιριακών εγκαταστάσεων, καθώς και την αποκατάσταση και επανάχρηση των τριών διατηρητέων κτιρίων, το οποίο στο σύνολό του θα στεγάζει διοικητικές υπηρεσίες της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Στο διατηρητέο κτίριο 2, προβλεπόταν η στέγαση της αίθουσας του περιφερειακού συμβουλίου Κ. Μακεδονίας.

Το περίοπτο κτίριο που σήμερα στεγάζει την νέα αίθουσα της περιφέρειας αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα βιομηχανικού κτιρίου των αρχών του 20ου αιώνα, εποχής του εκλεκτικισμού. Η κάτοψη του είναι απλή ορθογώνια διαστάσεων 33 x 13μ κ περίπου και αρχικά το κτίριο πρέπει να ήταν μονόχωρο.

Το κτίριο χαρακτηρίζεται από την ρυθμική επανάληψη τόξων από εμφανή συμπαγή τούβλα, σε συμμετρική διάταξη ως προς τον κατά μήκος και εγκάρσιο άξονα του κτιρίου. Τα τόξα αυτά μέρος του φέροντα οργανισμού της κατασκευής, βρίσκονται σε μικρή προεξοχή από την υπόλοιπη επιφάνεια των τοίχων και αποτελούν τα βασικά διακοσμητικά στοιχεία των όψεων. Με εμφανή τούβλα διαμορφώνονται και οι γωνίες του κτίσματος.

Η στέγη ήταν δίρριχτη, η κατασκευή της εμφανής, με μεταλλικά ζευκτά με ενδιαφέροντες κόμβους και ελκυστήρες, έφερε κεντρική υπερύψωση, πιθανόν για λόγους εξαερισμού ή / και φωτισμού, και καλύπτονταν με κεραμίδια.

Η ομάδα σχεδιασμού και κατασκευής του έργου είναι η ακόλουθη

Αρχιτεκτονική μελέτη: ΜΕΤΕ ΣΥΣΜ Α.Ε.

Στατική μελέτη: DELCO Ε.Π.Ε

Η/Μ μελέτη: ΜΑΚ.Τ.Ε. Ε.Π.Ε

Ακουστική μελέτη: Γεώργιος Χατζηγεωργίου

Κατασκευή: ΑΡΚΕΤΥΠΟ Ε.Π.Ε.



Ο όγκος της αίθουσας είναι 1850m^3 , συνολικής επιφάνειας 210m^2 . Το σύνολο των παρεμβάσεων στόχευσε στη βελτίωση τόσο της ακουστικής ποιότητας του χώρου, με βασικό και κύριο στόχο τη διεξαγωγή συνεδρίων. Το κτίριο περιλαμβάνει, δύο θαλάμους μεταφραστών, ένα θάλαμο ελέγχου, φουαγιέ και ένα μηχανοστάσιο.

Βασικά στοιχείο ήταν αρχικά να υπολογιστεί η παθητική ηχοπροστασία του κτιρίου από τον κυκλοφοριακό θόρυβο στην περιοχή. Μετρήσεις περιβαλλοντικού θορύβου έγιναν περιμετρικά στις όψεις του κελύφους του κτιρίου, ώστε να υπολογιστεί η

ηχομονωτική ικανότητα της νέας ξύλινης στέγης, τα νέα κουφώματα συμπεριλαμβανομένου τους φεγγίτες και τις θύρες που οδηγούν στο εξωτερικό περιβάλλον.

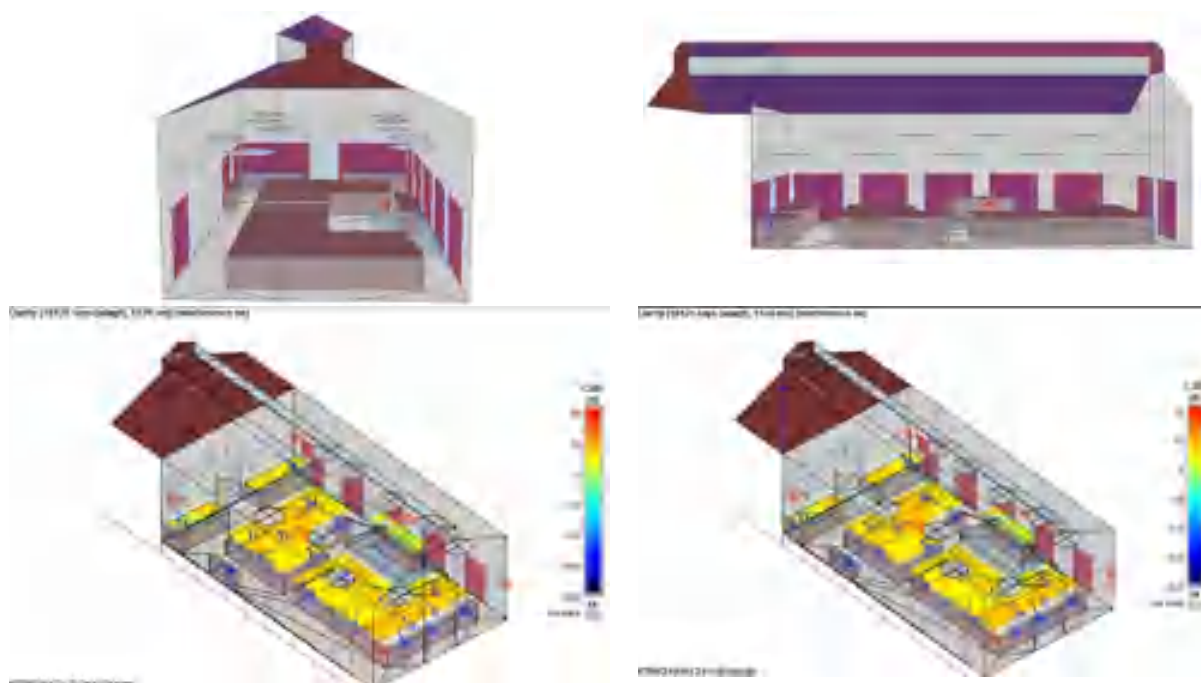
Σε όλη την επιφάνεια της οροφή σχεδιάστηκαν ξύλινα ακουστικά πάνελ, χρησιμοποιήθηκε στον έλεγχο του χρόνου αντήχησης. Περιμετρικά στο πέτρινο κέλυφος του Φ.Ο, όπως προαναφέραμε υπάρχει ρυθμική επανάληψη τόξων από εμφανή συμπαγή τούβλα. Ανάμεσα στα τόξα τοποθετήθηκαν συνηχητές μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Το πάτωμα του χώρου είναι μεταλλική κατασκευή με αναβαθμούς, ενώ η τελική επίστρωση έγινε με ξύλο κολλητό. Η αίθουσα περιλαμβάνει 108 σταθερά ανακλινόμενα καθίσματα. Η σχέση όγκου/ αριθμός καθισμάτων αντιστοιχεί σε 17.12m^3 / κάθισμα. Για χρήση ομιλίας πρέπει να είναι μεταξύ $3 \leq k \leq 6$. Λόγο της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου, της ιδιαιτερότητας του και της χρήσης του χώρου δεν ήταν δυνατή η αλλαγή της αναλογίας.

Στην περιοχή του νέου μεταλλικού παταριού όπου υπάρχουν οι θάλαμοι μεταφραστών, αντιμετωπίστηκε με μεγάλη λεπτομέρεια η πρόβλεψη διάδοσης αερόφερτου και στερεόφερτου θορύβου από το κεντρικό μηχανοστάσιο του κτιρίου, στο οποίο υπήρχε μια κλιματιστική μονάδα μεγάλης ακουστική ισχύος. Το πρόβλημα του κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε ήταν η πλευρική διάδοση θορύβου από το πάτωμα και την οροφή, διότι όλα τα δωμάτια ελέγχου και το μηχανοστάσιο κατασκευάστηκαν πάνω σε σύμμεικτη πλάκα μπετόν με χαμηλό επιφανειακό βάρος.

Στο σχεδιασμό μέτρων ηχοπροστασίας από την λειτουργία δίκτυο κλιματισμού/εξαερισμού, τοποθετήθηκαν ηχοπαγίδες ώστε να τηρηθεί το κριτήριο ηχοπροστασίας $L_{A,eq} = 35\text{dB(A)}$ σύμφωνα με τις απαιτήσεις του DIN18041. Η στάθμη θορύβου από την λειτουργία του συστήματος κλιματισμού/εξαερισμού μετρήθηκε $L_{A,eq} = 36\text{dB(A)}$

1.2 Πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων

Για την πρόβλεψη των ακουστικών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CATT Acoustic 9.1e- TUCT, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και γεωμετρικές τεχνικές ανίχνευσης ακτινών (ray tracing)



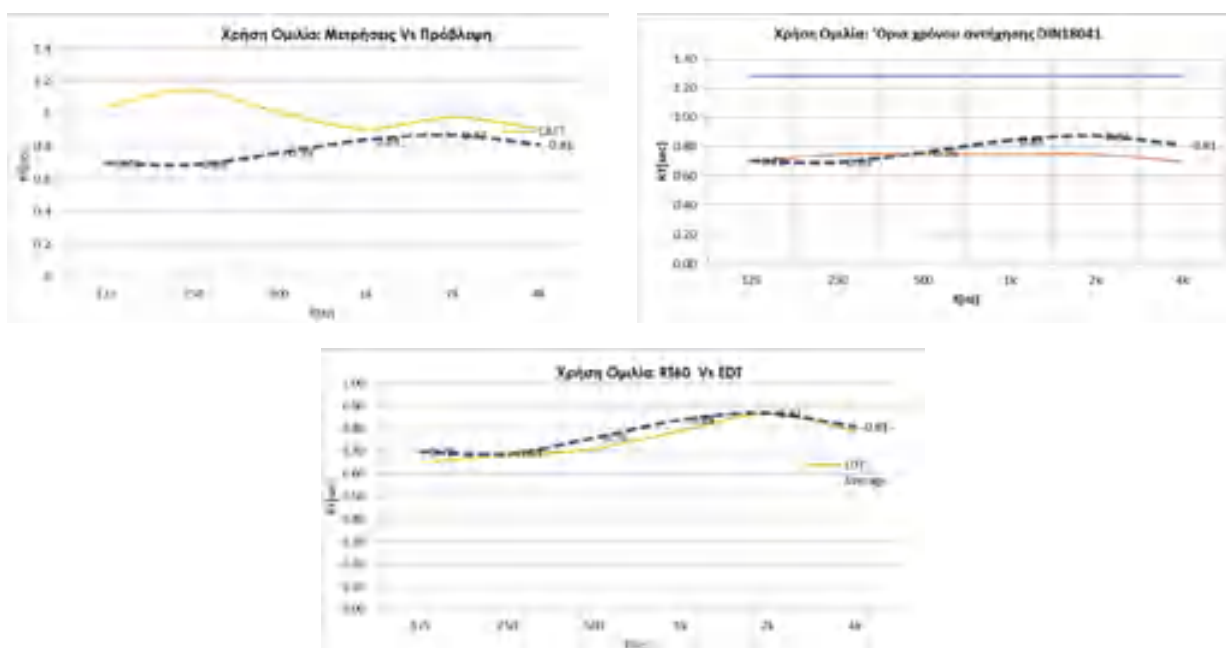
1.3 Ακουστικές μετρήσεις

Η ακουστική μέτρηση του αμφιθεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 14/06/2022 με την χρήση προσωπικού φορητού υπολογιστή και το GOLD-LINE, TEF25 USB Preamp, πολυκατευθυντικό πυκνωτικό μικρόφωνο τύπου TEF04(tm) ½", πολυκατευθυντικό ηχείο δωδεκάεδρο HYDRAMA και ενισχυτή CESVA AP602. Οι μετρήσεις λήφθηκαν 6 διαφορετικές θέσεις στην αίθουσα. Η πολυκατευθυντική πηγή έχει ύψος 1,5 m, το μικροφώνου 1,2m, κατευθυνθείς προς την πηγή και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 4m. Οι μετρήσεις έγιναν σε 7 θέσεις χωρίς ακροατήριο, σύμφωνα με τις οδηγίες του ISO-3382.

Θέση	C80	D50	STI
1	4,45	0,58	0,71
2	4,05	0,57	0,67
3	4,82	0,64	0,63
4	6,58	0,74	0,66
5	7,69	0,76	0,69
6	8,87	0,77	0,68
7	6,76	0,70	0,66

Πίνακας 1.2 Αποτελέσματα ακουστικών παραμέτρων από μετρήσεις

Το πιο σημαντικό κριτήριο, ο χρόνος αντήχησης ήταν μέσα σε αποδεκτά όρια σε σχέση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η σύγκριση πρόβλεψης και μέτρησης καθώς επίσης και η σύγκριση σύμφωνα με τα όρια του χρόνου αντήχησης (ομιλία) σύμφωνα με το DIN18041 δίνεται στο παραπάνω γραφήματα. Ωστόσο η πρόβλεψη στο φάσμα χαμηλών συχνοτήτων (125-300Hz) παρουσιάζει κάποιες διαφορές.



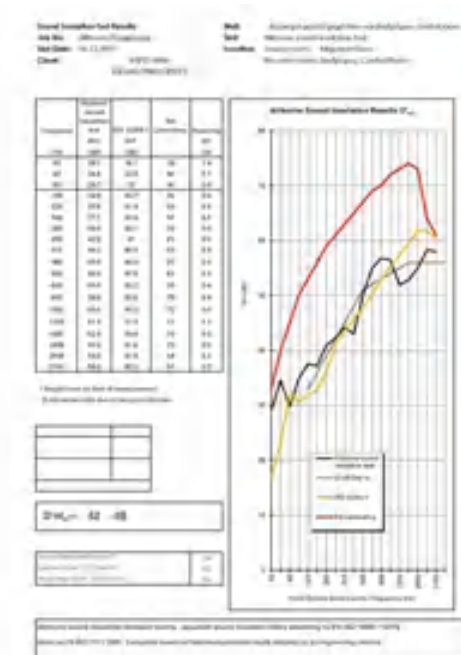
Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε έναν εξαιρετικά διάχυτο χώρο, οι δύο παράμετροι, RT και EDT, θα ήταν απαράλλακτος. Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα, οι τιμές του RT και του EDT είναι σχεδόν ίδιες και ως εκ τούτου, αυτό είναι μια ένδειξη πολύ καλού διάχυτου ηχητικού πεδίου.

1.4 Πρόβλεψη, σχεδιασμός και μετρήσεις ηχομόνωσης μηχανοστασίου με αίθουσα μεταφραστών

Κατά την διαδικασία σχεδιασμού χωρίσματος μεταξύ αίθουσας μεταφραστών/διαδρόμου και μηχανοστασίου, επιλέχθηκε τοιχοποιία με μεγάλη ηχομονωτική ικανότητα ($R_w=77\text{dB}$), η οποία αποτελείται από 3X12.5mm ινοσανίδες εκατέρωθεν του χωρίσματος, σε ανεξάρτητους σκελετούς και με διάκενο 200χιλ. Στο διάκενο έγινε πλήρωση με ορυκτοβάμβακα με πυκνότητα 50Kg/m³

Στον αρχικό σχεδιασμό της ηχομόνωσης του μηχανοστασίου, η πλάκα μπετό σχεδιάστηκε από τον στατικό του έργου με πάχος 200χιλ. Σε δεύτερη φάση αναθεωρήθηκε ο σχεδιασμός, η πλάκα αντικαταστάθηκε με σύμμεκτη κατασκευή εγκιβωτισμένη σε τραπεζοειδή λαμαρίνα.

Η πρόβλεψη αερόφερτης ηχομόνωσης αλλά και η μέτρηση (EN-ISO 16283) μετά την ολοκλήρωση του έργου δίνονται στο παρακάτω γράφημα. Σύμφωνα με τις προβλέψεις του ISO12354-Part 1, οι καμπύλες αερόφερτης ηχομόνωσης φαίνεται να ταυτίζονται σε μεγάλη ακρίβεια. Η αρχική εργαστηριακή μέτρηση πιστοποίησης ηχομονωτικής ικανότητας του χωρίσματος, παρουσιάζει τεράστιες διαφορές με το τελικό αποτέλεσμα την ηχομόνωσης στην πράξη.



2. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Ο μέσος όρος RT_{63} έως $250\text{Hz} = 0.70\text{sec}$, RT_{500} έως $2000\text{Hz} = 0.82\text{sec}$, τιμές πολύ ικανοποιητικές για την καταληπτότητα της ομιλίας. Ο συγκεκριμένος χρόνος αντήχησης, μπορεί να εξυπηρετήσει χρήσεις όπως συνέδρια και ομιλίες. Παράλληλα οι δείκτες ευκρίνειας- διαύγειας, καλύπτουν τις απαιτήσεις του DIN 18041. Ο δείκτης STI, μετρήθηκε με το σύστημα ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης του χώρου, υπερκαλύπτει τα όρια του DIN18041.

3. Αναφορές

- [1] Barron, M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Chapman & Hall, London. (1993)
- [2] Barron, M.. 21 years of Acoustic Scale Modeling Testing. Proceedings of Institute of Acoustics, Vol.19:Part3, Published by IOA, 67-80. (1997)
- [3] Cremer, L. & Muller, H. & Schultz, T.. Principles and Applications of Room

Χαρακτηρισμός ακουστικών μεταλλικών με χρήση πηγών ήχου πλάσματος λείζερ

Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2,*}, Εμμανουήλ Κανιολάκης-Καλούδης^{1,2}, Νικόλαος Αραβαντινός-Ζαφείρης³, Διονύσιος Τ. Γ. Κατερέλος⁴, Βασίλειος Μ. Δημητρίου^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Μιχάλης Ταταράκης^{1,5}, Γιάννης Μουρτζόπουλος⁶, Μιχαήλ Σιγάλας⁷, Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,2,**}

¹Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Πανεπιστημιακό Κέντρο Έρευνας και Καινοτομίας, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100, Ρέθυμνο, Ελλάδα

²Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133, Ρέθυμνο, Ελλάδα

³Τμήμα Περιβάλλοντος, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, 29100, Ζάκυνθος, Ελλάδα

⁴Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μουσικής Ακουστικής και Δονήσεων, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, 49100, Ληξούρι, Ελλάδα

⁵Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133, Χανιά, Ελλάδα

⁶Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα

⁷Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα

*kkaleris@hmu.gr, **npapadogiannis@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Φωνονικοί Κρύσταλλοι και τα Ακουστικά Μεταλλικά αποτελούν ανερχόμενη τεχνολογία-κλειδί, η οποία αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην επιστήμη και τη βιομηχανία της ακουστικής τα επόμενα χρόνια. Έως και σήμερα, η αξιολόγηση των ακουστικών μετα-δομών γίνεται με παραδοσιακές ακουστικές μεθόδους όπως οι σωλήνες εμπέδησης και τα Η/Μ μεγάφωνα. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζουμε μια μέθοδο για τον ακριβή χαρακτηρισμό ακουστικών μετα-δομών βασισμένη στις πηγές ήχου πλάσματος λείζερ. Οι πηγές αυτές παράγουν γρήγορους, ευρυζωνικούς και ισχυρούς ακουστικούς παλμούς ενώ είναι σημειακές και ουσιαστικά άυλες. Η μέθοδος επιτρέπει την αξιολόγηση της απόκρισης συχνότητας και της κατευθυντικότητας των μετα-δομών με οποιαδήποτε γεωμετρία σε πολλαπλούς άξονες διάδοσης του ήχου, ενώ παράλληλα επιτρέπει την ακουστική διέγερση μέσα στη δομή. Παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα ακουστικών αξιολογήσεων φωνονικών κρυστάλλων με φωνονικά χάσματα στην περιοχή των ακουστών συχνοτήτων και με διαφορετικό αριθμό κυψελίδων. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και δίνεται φαινομενολογική εξήγηση για τις παρατηρούμενες αλλαγές που επιφέρει η προσθήκη κυψελίδων. Η προτεινόμενη μέθοδος αναμένεται να ενισχύσει την έρευνα και την εμπορική υιοθέτηση των ακουστικών μεταλλικών στο άμεσο μέλλον.

Characterization of acoustic metamaterials using laser plasma sound sources

ABSTRACT

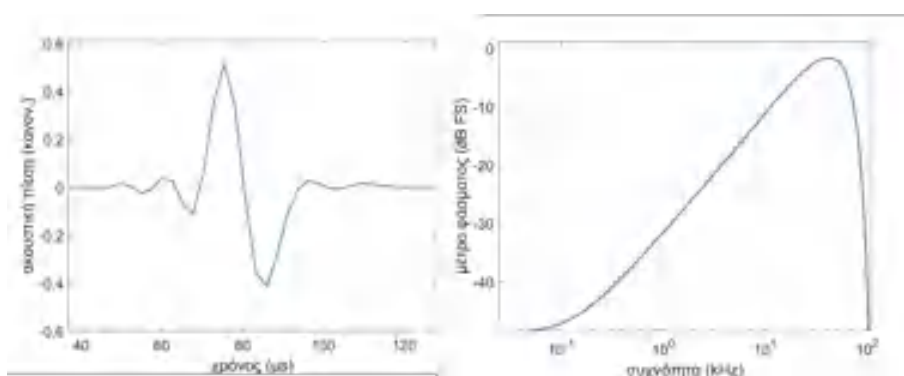
Phononic Crystals and Acoustic Metamaterials are an emerging key-enabling technology that is expected to play a significant role in the science and industry of acoustics in the coming years. Until now, the evaluation of acoustic meta-structures has been carried out using traditional methods such as impedance tubes and electromagnetic loudspeakers. Here we present a method for the precise characterization of acoustic meta-structures based on laser plasma sound sources. These sources produce rapid, broadband, and powerful acoustic pulses, while being point-like and essentially massless. The method allows for the evaluation of the frequency response and directivity of meta-structures with any geometry in multiple sound propagation axes, while also enabling acoustic excitation inside the structure. Experimental results are presented from acoustic evaluations of phononic crystals with transmission band gaps in the audible range and different number of unit cells. The results are analyzed and phenomenological explanations are given for the changes observed due to the different number of unit cells. The method is expected to boost research and commercial adoption of acoustic metamaterials in the near future.

1. Εισαγωγή

Μέχρι και σήμερα, ο χαρακτηρισμός ακουστικών μεταϋλικών (AM) και φωνονικών κρυστάλλων (ΦΚ) με περιοχή λειτουργίας στο ακουστό φάσμα γίνεται είτε με τη χρήση Σωλήνων Εμπέδησης (ΣΕ, αγγλικά: impedance tubes) είτε με συμβατικά ηλεκτρομηχανικά (ΗΜ) μεγάφωνα. Οι σωλήνες εμπέδησης είναι κατάλληλοι για την ακουστική αξιολόγηση δομών μικρών διαστάσεων, π.χ. σε επίπεδο ενός ή λίγων μοναδιαίων κυψελίδων (MK), ενώ τα ΗΜ μεγάφωνα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μεγαλύτερων δομών, π.χ. σε επίπεδο ακουστικού πάνελ. Οι ΣΕ παρέχουν περιβάλλον μέτρησης χαμηλού θορύβου, όμως επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στη γεωμετρία της δομής. Συγκεκριμένα, το δείγμα πρέπει να είναι κυλινδρικό ή κυβικό με συγκεκριμένες διαστάσεις ώστε να εφαρμόζει με ακρίβεια στον σωλήνα. Επίσης, η αξιολόγηση των δομών σε διαφορετικούς άξονες διάδοσης ήχου απαιτεί διαφορετικό δείγμα για κάθε άξονα. Η ακουστική διέγερση στους ΣΕ γίνεται αναγκαστικά έξω από τη δομή, ενώ η συχνοτική περιοχή λειτουργίας τους είναι συχνά περιορισμένη, συνήθως έως περίπου τα 7 kHz [1]. Τα συμβατικά ηχεία δεν είναι κατάλληλα για την αξιολόγηση μικρότερων δομών, όπως οι μοναδιαίες κυψελίδες, λόγω της αυξημένης περίθλασης που προκαλείται από το μεγάλο μέγεθος της πηγής. Η διέγερση εντός του δείγματος μέσω συμβατικών ηχείων είναι αδύνατη, με εξαίρεση τις υψηλές ακουστικές συχνότητες ή τους υπέρηχους, όπου η διέγερση μπορεί να επιτευχθεί με ιδιαίτερα μικρούς ΗΜ ή πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς. Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται παρεμβάσεις στο υλικό με δυνητικά επιζήμια αποτελέσματα ή και επίδραση στην

μετρούμενη ακουστική απόκριση [2]. Τέλος, η ισχυρή κατευθυντικότητα τέτοιων συμβατικών ΗΜ και πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων στις υψηλές συχνότητες καθιστά αδύνατη την αξιολόγηση σε διαφορετικές κατευθύνσεις διάδοσης του ήχου.

Στην εργασία αυτή αξιοποιούμε μια νέα μέθοδο για την μελέτη ΦΚ που βασίζεται στις Πηγές Ήχου Πλάσματος Λέιζερ (ΠΗΠΛ), η οποία εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, ειδικά για την αξιολόγηση μεταδομών μιας ή λίγων ΜΚ. Οι ΠΗΠΛ παράγονται στον ατμοσφαιρικό αέρα ή σε άλλα αέρια ή υγρά μέσα ως αποτέλεσμα της θερμοελαστικής αντίδρασης που ακολουθεί τον ιονισμό του μέσου από ακτινοβολία λέιζερ υψηλής έντασης (laser-induced breakdown). Αντίστοιχα, στην περίπτωση στερεών στόχων σχηματίζονται από την πίεση που παράγεται στον περιβάλλοντα αέρα από τα θραύσματα υλικού που αποκολλώνται από την επιφάνεια του στόχου. Για τον ιονισμό του ατμοσφαιρικού αέρα από παλμούς λέιζερ νανοδευτερολέπτων, η αλληλεπίδραση παλμών υψηλής έντασης ($> 10^{12} \text{ W/cm}^2$) με τα μόρια του αέρα οδηγεί στη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων υψηλής θερμοκρασίας. Τα ενεργειακά (θερμά) ελεύθερα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με τα αρχικά ψυχρά βαριά σωματίδια, δηλαδή ιόντα, άτομα και μόρια του αέρα εντός του διεγερμένου όγκου προκαλώντας τη θέρμανση των βαρέων σωματιδίων σε χρόνο λίγων μικροδευτερολέπτων [3][4]. Η θέρμανση αυτή οδηγεί σε θερμοελαστική αντίδραση του όγκου αέρα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ακουστικού παλμού N (acoustic N-pulse). Η διάρκεια ενός τέτοιου παλμού κυμαίνεται από τα λίγα μικροδευτερόλεπτα (ή και ακόμη εκατοντάδες νανοδευτερόλεπτα για παλμούς λέιζερ φεμτοδευτερολέπτων) έως και τα εκατοντάδες μικροδευτερόλεπτα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του παλμού λέιζερ. Ένας τυπικός παλμός N φαίνεται στην Εικόνα 1 στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Οι παλμοί N εμφανίζουν υπερτετατό προφίλ πρώτης τάξης στην χαμηλή περιοχή του ακουστικού φάσματος συχνοτήτων και συγκεκριμένα από τα 20 Hz έως τις υψηλές συχνότητες ($\sim 20 \text{ kHz}$) ή τους κοντινούς υπέρηχους ($< 60 \text{ kHz}$), ενώ για διέγερση λέιζερ φεμτοδευτερολέπτων μπορεί να εκτείνεται έως τους μέσους υπέρηχους (έως $\sim 500 \text{ kHz}$) ή ακόμα και τα MHz [5]. Η μέγιστη πίεση τους μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή ($> 130 \text{ dB}$) ανάλογα με την συνολική οπτική ενέργεια που εναποτίθεται στον αέρα. Εκτενείς αναλύσεις των ΠΗΠΛ έχουν γίνει στις εργασίες [6][12].



Εικόνα 1: α) χρονικό και β) φασματικό προφίλ της ΠΗΠΛ που χρησιμοποιήθηκε για τις ακουστικές μετρήσεις. Η ΠΗΠΛ δημιουργήθηκε από παλμούς λέιζερ διάρκειας 6 ns, μήκους κύματος 1064 nm και ενέργειας 20 mJ. Οι παλμοί εστιάστηκαν με φακό εστιακής απόστασης 7.5 cm.

Η άυλη υπόσταση και η σημειακή (σφαιρική) γεωμετρία των ΠΗΠΛ, μαζί με το επαναλαμβανόμενο κρουστικό χρονικό προφίλ τους και το ευρύ συχνοτικό φάσμα, τις καθιστούν κατάλληλες για πληθώρα εφαρμογών. Οι ΠΗΠΛ χρησιμοποιούνται ήδη στην Φασματοσκοπία Ιονισμού Λέιζερ (LIBS) [13], σε μη καταστροφικές δοκιμές [14], διαγνωστική υλικών [15] και στρατιωτικές εφαρμογές [16], ενώ έχει προταθεί και η χρήση τους για μετρήσεις ακουστικής χώρων [10]. Πρόσφατα επίσης έχει επιδειχθεί πειραματικά η δυνατότητα ελεγχόμενης αναπαραγωγής σύνθετων ηχητικών σημάτων μέσω ΠΗΠΛ [17]. Η καταλληλότητα και η υψηλή ακρίβεια της μεθόδου για τον ακουστικό χαρακτηρισμό ΦΚ έχει παρουσιαστεί σε εργασία της ερευνητικής ομάδας στο περιοδικό Nature Communications Materials [19]. Στην εργασία μελετήθηκε η ακουστική διάδοση σε ΦΚ διαφορετικών γεωμετριών. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με υπολογισμούς προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων (FEM), εμφανίζοντας εξαιρετική σύγκλιση.

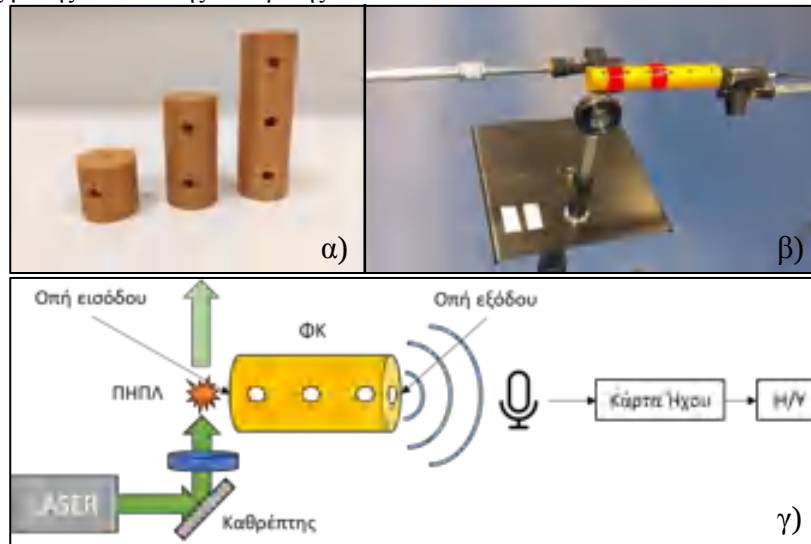
Στην παρούσα εργασία, η οποία αποτελεί συνέχεια της παραπάνω, χρησιμοποιούνται ΠΗΠΛ για την μέτρηση της ακουστικής διάδοσης (transmission) σε ΦΚ αποτελούμενους από διαφορετικό αριθμό MK. Συγκεκριμένα, αξιολογούνται 5 κυλινδρικοί ΦΚ κατασκευασμένοι μέσω επανάληψης 2 έως 6 όμοιων MK. Σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης του αριθμού των MK στο ακουστικό φάσμα διάδοσης των ΦΚ και συγκεκριμένα στο βάθος των φωνονικών χασμάτων και το φασματικό προφίλ των ζωνών διάδοσης. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία μετρήσεων. Ακολουθεί η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων (Ενότητα 3) και τα συμπεράσματα (Ενότητα 4).

2. Μεθοδολογία

Στην Εικόνα 2α φαίνονται η MK και δύο ΦΚ αποτελούμενοι από 2 και 3 κυψελίδες. Οι ΦΚ αποτελούνται από ένα δίκτυο σφαιρικών κοιλοτήτων συνδεδεμένων μέσω κυλινδρικών σωλήνων. Οι κυψελίδες έχουν σταθερά πλέγματος $a = 29 \text{ mm}$, η ακτίνα των σφαιρών είναι $R = 0.395a$ και η ακτίνα των κυλινδρικών σωλήνων $r = 0.095a$. Τα δείγματα κατασκευάστηκαν από πολυγαλακτικό οξύ (PLA) με την τεχνική κατασκευής σύντηξης νημάτων σε 3Δ εκτυπωτή (daVinci Super).

Οι ΠΗΠΛ δημιουργήθηκαν από παλμούς 6 ns, 1064 nm και ενέργειας 20 mJ, οι οποίοι παρήχθησαν από το laser Quantel Brilliant B. Η εστίαση των παλμών έγινε με φακό 7,5 cm σε απόσταση 1 mm από την οπή εισόδου, βλ. Εικόνα 2β και 2γ. Οι ακουστικοί N-παλμοί είχαν διάρκεια περίπου $\sim 20 \mu\text{s}$. Οι πηγές πλάσματος τοποθετήθηκαν στο κέντρο των σφαιρικών όγκων μέσω κάμερας απεικόνισης της φωτεινής ακτινοβολίας πλάσματος. Το ακουστικό σύστημα μέτρησης βασίζεται σε μικρόφωνο ευρέος φάσματος 90 kHz και υψηλού δυναμικού εύρους 35dB(A)-160dB (G.R.A.S 46BE και μονάδα τροφοδοσίας 12AK), το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση 3 mm από την οπή εξόδου. Για τη δειγματοληψία χρησιμοποιήθηκε κάρτα ήχου ευρέος φάσματος 92 kHz (RME Fireface 802) με ρυθμό δειγματοληψίας 192 kHz και ανάλυση 24-bit. Τα ηχητικά σήματα καταγράφηκαν με το λογισμικό Audacity. Κάθε ακουστική μέτρηση έχει διάρκεια 1 λεπτού και περιέχει 600 παλμούς, με ρυθμό επανάληψης 10 Hz. Για την μείωση της στάθμης θορύβου λήφθηκε ο μέσος όρος των 600 ακουστικών αποκρίσεων σε κάθε μέτρηση. Το ακουστικό φάσμα

ηχητικής διάδοσης υπολογίστηκε μέσω γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) της μέσης ακουστικής απόκρισης.



Εικόνα 2: α) μοναδιαία κυψελίδα και φωνονικοί κρύσταλλοι 2 και 3 κυψελίδων, β) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση ΦΚ 6 κυψελίδων και γ) σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης.

3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 3 φαίνεται η φασματική απόκριση (transmission) των ΦΚ 2 έως 6 κυψελίδων σε διέγερση ΠΗΠΔ. Από την εικόνα προκύπτει ότι η προσθήκη κυψελίδων αλλάζει τη φασματική απόκριση των ΦΚ και συγκεκριμένα οδηγεί σε αύξηση του βάθους των φωνονικών χασμάτων και σε αλλαγές του φασματικού προφίλ στις περιοχές διέλευσης. Είναι γνωστό ότι τα φωνονικά χάσματα (ΦΧ), όπως και οι ζώνες διέλευσης, σχηματίζονται από καταστροφική ή ενισχυτική συμβολή αντίστοιχα, λόγω της περιοδικής αλλαγής στην ακουστική εμπέδηση - ή αντίστοιχα τον ακουστικό δείκτη διάθλασης - του αέρα μέσα στην φωνονική δομή. Συγκεκριμένα, η ακουστική εμπέδηση που συναντάει το διαδιδόμενο ακουστικό κύμα αλλάζει διαδοχικά μεταξύ των στενών κυλινδρικών σωλήνων και των συγκριτικά ευρύτερων σφαιρών. Ως εκ τούτου, η ακουστική συμπεριφορά του ΦΚ παρομοιάζει διαστρωματωμένο υλικό, όπου ο ήχος σε κάθε διεπαφή μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται. Ο αριθμός των στρωμάτων εξαρτάται από τον αριθμό των μοναδιαίων κυψελίδων. Η συνθήκη για καταστροφική συμβολή δίνεται από την σχέση:

$$2n_2d \cos(\theta_2) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (1)$$

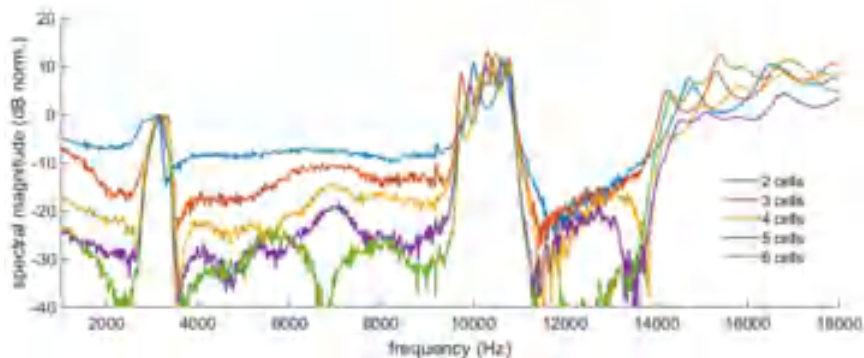
όπου n_2 ο δείκτης διάθλασης του δεύτερου στρώματος, d το πάχος του στρώματος, θ_2 η γωνία διάθλασης, m η τάξη της συμβολής και λ το μήκος κύματος του ήχου. Δεδομένου ότι η γωνία διάθλασης εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης, για μια σφαιρική πηγή η θ_2 παίρνει ένα μεγάλο εύρος τιμών, ενώ οι πιθανές πολλαπλές ανακλάσεις μέσα στη σφαίρα οδηγούν σε διαφορετικά μήκη d . Έτσι η συνθήκη

ικανοποιείται για μεγάλο εύρος μηκών κύματος. Με την αύξηση του αριθμού των κυψελίδων, αυξάνεται η πιθανότητα ικανοποίησης της συνθήκης συμβολής οδηγώντας σε εμβάθυνση των ΦΧ, σε μια διαδικασία που ονομάζεται σκέδαση Bragg.

Σχετικά με τις ζώνες διέλευσης, πέραν της πρώτης, η αύξηση του αριθμού των κυψελίδων οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των φασματικών κορυφών. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην φασματική ζώνη διάδοσης μεταξύ 9 και 11 kHz, όπου ο αριθμός των φασματικών κορυφών είναι ίσος με τον αριθμό των κυψελίδων, όπως φαίνεται αναλυτικά στην Εικόνα 4α) - ε). Αυτό γίνεται κατανοητό εξετάζοντας τη σχέση ενισχυτικής συμβολής για κάθετη πρόσπτωσηση $\theta_2 = 0$, όπου:

$$2n_2d = m\lambda \quad (2)$$

Το διάγραμμα της Εικόνας 4στ) δίνει μια σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου, όπου η πρόσπτωση έχει σχεδιαστεί διαγώνια για λόγους απεικόνισης. Στην περίπτωση των δύο κυψελίδων σχηματίζονται τρεις διαδρομές διαφορετικού μήκους, όπου μεταξύ τους εμφανίζουν διαφορά μήκους $d_2 - d_1 = \Delta d_1$ (η πρώτη με τη δεύτερη και η δεύτερη με την Τρίτη) καθώς και $d_3 - d_1 = \Delta d_2$ (η πρώτη με την τρίτη). Έτσι, για $m = 1$ υπάρχουν δύο μήκη κύματος λ_1 και λ_2 που ικανοποιούν την Σχέση 2, τα οποία αντιστοιχούν στις δύο κορυφές της Εικόνας 4α). Με την προσθήκη μιας ακόμα κυψελίδας, υπάρχουν τρία μήκη κύματος που ικανοποιούν την Σχέση 2, κ.ο.κ. Στην τρίτη ζώνη διάδοσης που ξεκινάει στα 14 kHz, εμφανίζονται φαινόμενα συμβολής 2^{ns} τάξης, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του φασματικού προφίλ.

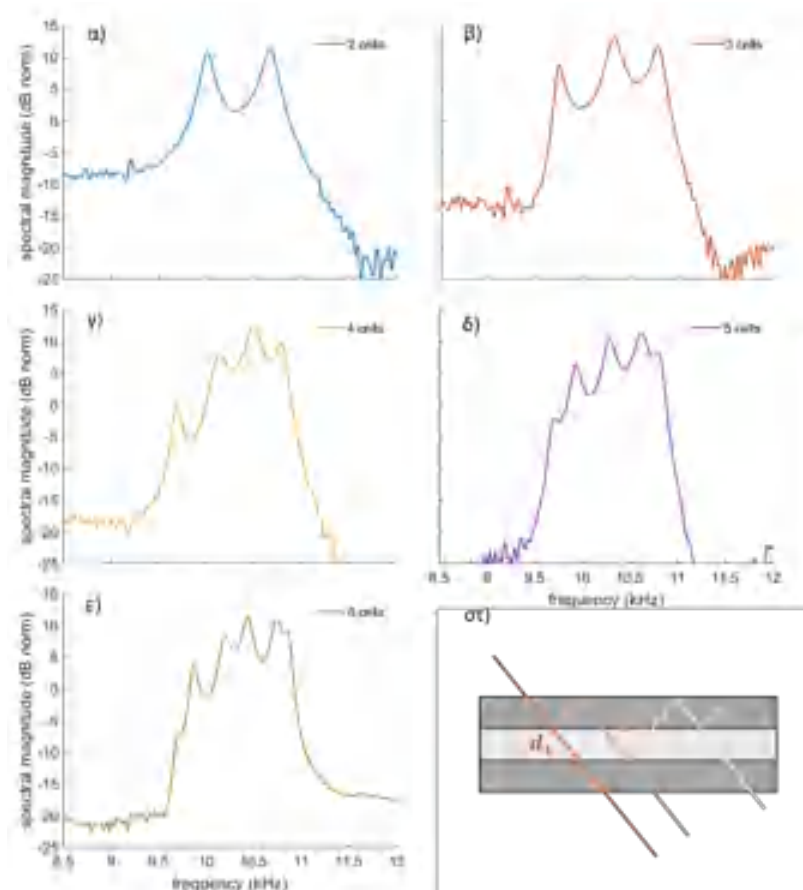


Εικόνα 3. Συχνотική απόκριση ΦΚ αποτελούμενων από 2 έως 6 κυψελίδες, στην ακουστική διέγερση ΠΗΠΛ με το προφίλ της Εικόνας 1.

1. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν νέα πειραματικά αποτελέσματα από την ακουστική αξιολόγηση φωνονικών κρυστάλλων μέσω διέγερσης από πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η ακουστική διάδοση (transmission) μέσα από φωνονικούς κρυστάλλους κατασκευασμένους από διαφορετικό αριθμό μοναδιαίων κυψελίδων. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση του αριθμού των κυψελίδων στην ακουστική απόκριση του φωνονικού κρυστάλλου. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των κυψελίδων οδηγεί σε βάθυνση των φωνονικών χασμάτων καθώς και σε αλλαγές στο φασματικό προφίλ των ζωνών διέλευσης. Οι

παρατηρούμενες αλλαγές ερμηνεύθηκαν μέσω του φαινομενολογικού μοντέλου ακουστικής διάδοσης σε διαστρωματωμένα υλικά. Τα πειραματικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την ακρίβεια και την καταλληλότητα της μεθόδου ακουστικής αξιολόγησης μεταλλικών μέσω διέγερσης από πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ.



Εικόνα 4: α)-ε) φασματικά προφίλ αποκρίσεων ΦΚ αποτελούμενων από 2 έως 6 κυψελίδες στη συχνοτική ζώνη 8.5 – 12 kHz όπου εμφανίζονται οι φασματικές κορυφές σε συγκεκριμένες συχνότητες διάδοσης, στ) σχηματική απεικόνιση των διαδρομών του ήχου μέσα σε ΦΚ δύο κυψελίδων.

3. Αναφορές

- [1] Aravantinos-Zafiris, N., Sigalas, M. & Katerelos, G. T. D. Complete acoustic bandgaps in a three-dimensional phononic metamaterial with simple cubic arrangement. J. Appl. Phys. **133**, 065101 (2023)
- [2] Bilal, O. R., Ballagi, D. & Daraio, C. Architected lattices for simultaneous broadband attenuation of airborne sound and mechanical vibrations in all directions. Phys. Rev. Appl. **10**, 054060 (2018)

- [3] Delibašić Marković, H., Kaleris, K., Papadogiannis, N. A. & Petrović, V. Comparative analytical and numerical investigation of the plasma density in atmospheric air generated by nanosecond laser pulses. *Laser Physics Letters* **21**, 033001 (2024)
- [4] Kaleris, K. et al. On the correlation of light and sound radiation following laser-induced breakdown in air. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 435207 (2020)
- [5] Kaleris, K. et al. Laser-plasma sound sources in atmospheric air: A systematic experimental study. *JSV*. **570**, 118000 (2023)
- [6] Kaleris, K. Sound reproduction from laser-driven pulsed acoustic sources. PhD thesis (Electrical and Computer Engineering dept., University of Patras, 2021)
- [7] Oksanen, M. & Hietanen, J. Photoacoustic breakdown sound source in air. *Ultrasonics* **32**, 327–331 (1994)
- [8] Ni Xiao-wu et al. On the generation of laser-induced plasma acoustic waves. *Acta Phys. Sin.* **7**, 143 (1998)
- [9] Qin, Q. & Attenborough, K. Characteristics and application of laser-generated acoustic shock waves in air. *Applied Acoustics* **65**, 325–340 (2004)
- [10] Bolaños, G. J., Pulkki, V., Karppinen, P. & Hæggström, E. An optoacoustic point source for acoustic scale model measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, 221–227 (2013)
- [11] Kaleris, K. et al. Experimentally validated modeling of the optical energy deposition in highly ionized ambient air by strong femtosecond laser pulses. *Eur. Phys. J. D.* **75**, 236 (2021)
- [12] Manikanta, E., Vinoth Kumar, L., Leela, C. H. & Prem Kiran, P. Effect of laser intensity on temporal and spectral features of laser generated acoustic shock waves: ns versus ps laser pulses. *Appl. Optics* **56**, 6902–6910 (2017)
- [13] Vincent, G. et al. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Imaging for Material and Biomedical Applications: Recent Advances and Future Perspectives. *Anal. Chem.* **95**, 49–69 (2023)
- [14] Murdoch, N. et al. Laser-induced breakdown spectroscopy acoustic testing of the Mars 2020 microphone. *P&SS* **165**, 260–271 (2019)
- [15] Sullenberger, R. M., Kaushik, S. & Wynn, C. M. Photoacoustic communications: delivering audible signals via absorption of light by atmospheric H₂O. *Opt. Lett.* **44**, 622 (2019)
- [16] Kaleris, K., Stelzner, B., Hatziantoniou, P., Trimis, D. & Mourjopoulos, J. Laser-sound: optoacoustic transduction from digital audio streams. *Sci. Rep.* **11**, 476 (2021)
- [17] Hussain shah, S. K. et al. Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review. *Radiat. Phys. Chem.* **170**, 108666 (2020)
- [18] Kaleris, K., Stelzner, B., Hatziantoniou, P., Trimis, D. & Mourjopoulos, J. Laser-Sound Transduction from Digital ΣΔ Streams. *JAES* **70**, 50–61 (2022)
- [19] Kaleris, K., Kaniolakis-Kaloudis, E., Aravantinos-Zafiris, N. et al. Acoustic metamaterials characterization via laser plasma sound sources. *Commun Mater* **5**, 93 (2024)



***Πυρηνική φυσική με ακουστικά κύματα: καινοτόμοι
ακουστικοί κρυσταλλικοί κυματιστές για παραγωγή
ακτίνων-γ στενού φάσματος***

Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2}, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2}, Εμμανουήλ Κανιολάκης
Καλούδης^{1,2}, Ελένη Παπαδάκη^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Βασίλειος Δημητρίου^{1,2},
Μιχαήλ Ταταράκης^{1,3}, Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,2}

¹ Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,
Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

² Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Περιβόλια,
74133 Ρέθυμνο

³ Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133
Χανιά

*npapadogiannis@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει τις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου TECHNO-CLS με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων πηγών στενοζωνικής ακτινοβολίας γ μέσω κυματισμού ποζιτρονίων από ακουστικούς κρυσταλλικούς κυματιστές. Η ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ σε καθορισμένες ενεργειακές περιοχές είναι κρίσιμη σε σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στη μοριακή και την ιατρική φυσική. Μέχρι σήμερα, η παραγωγή ακτίνων γ γίνεται με χρήση επιταχυντών σωματιδίων ή ραδιενεργών ισοτόπων. Οι μέθοδοι αυτές έχουν σημαντικά μειονεκτήματα καθώς έχουν πολύ υψηλό κόστος ενώ προσφέρουν περιορισμένο έλεγχο των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας. Οι κρυσταλλικές πηγές φωτός (ΚΠΦ) αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη καινοτόμος τεχνολογία για την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ από απλές και αποδοτικές διατάξεις. Το πρόγραμμα TECHNO-CLS χρηματοδοτείται από το Pathfinder Europe του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Καινοτομίας (EIC) και στοχεύει στην ανάπτυξη αυτών των πηγών μέσω της εκμετάλλευσης των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων σε κρυστάλλους για την επιτάχυνση σωματιδίων και την εκπομπή ακτινοβολίας γ. Η ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ακουστικών κρυσταλλικών κυματιστών, έχοντας ήδη παράξει τα πρώτα υπολογιστικά αποτελέσματα.

Nuclear physics using acoustic waves: novel acoustic wave crystalline undulators for the generation of narrowband γ -ray radiation

ABSTRACT

This work presents the current research activities within the framework of the European project TECHNO-CLS, aimed at developing novel narrow-band γ -ray sources via positron undulation by acoustically driven crystalline undulators. The controlled generation of γ -radiation with narrow bandwidth is crucial in modern scientific and technological applications, particularly in molecular and medical physics. Until now, γ -ray production has relied on particle accelerators or radioactive isotopes. However, these methods have significant drawbacks, such as high costs and limited control over the radiation's characteristics. Crystal Light Sources (CLS) are emerging as a promising innovative technology for the controlled generation of narrowband γ -radiation from simple and efficient layouts. The TECHNO-CLS project is funded by the EIC Pathfinder Europe and aims to develop these sources by exploiting the strong electric fields in crystals to accelerate particles and emit γ -radiation. The research team at the Institute of Plasma Physics and Lasers (IPPL) of the Hellenic Mediterranean University (HMU) plays a central role in developing the acoustically driven crystalline undulator technology and has already produced the first computational results.

Εισαγωγή

Η ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ σε καθορισμένες ενεργειακές περιοχές και διαφορετικά εύρη φάσματος είναι εξαιρετικά σημαντική σε σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η μοριακή φυσική αλλά κυρίως η ιατρική φυσική [1][2]. Συγκεκριμένα, στην ακτινοθεραπεία για την αντιμετώπιση του καρκίνου και τη διαγνωστική απεικόνιση, τα μόρια του DNA των καρκινικών κυττάρων ιονίζονται λόγω της εξαιρετικά υψηλής ενέργειας των φωτονίων γ , με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ανάπτυξη και η αναπαραγωγή τους [3]. Έως τώρα, η παραγωγή ακτίνων γ γίνεται σε επιταχυντές σωματιδίων ή με χρήση τεχνητά ενεργοποιημένων ραδιενεργών ισοτόπων [4]. Οι επιταχυντές είναι εξαιρετικά κοστοβόρες υποδομές θερασιών διαστάσεων με πολύ περιορισμένη προσβασιμότητα και χρηστικότητα [5]. Αντίστοιχα, η χρήση ραδιενεργών ισοτόπων συνεπάγεται εξαιρετικά μειωμένη ελεγχσιμότητα των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας, και συγκεκριμένα της ενέργειας των φωτονίων και της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Άλλου είδους πηγές φωτεινής ακτινοβολίας, όπως τα Λείζερ Ελεύθερων Ηλεκτρονίων (Free Electron Lasers -FELs) τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σύμφωνων ακτίνων X, αδυνατούν να παράξουν ακτινοβολία στην περιοχή των ακτίνων γ λόγω τεχνολογικών περιορισμών [4][6][7]

Οι κρυσταλλικές πηγές φωτός (Crystal Light Sources - CLS) αποτελούν μια ανερχόμενη τεχνολογία που αναμένεται να επιτρέψει την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ στενού φασματικού εύρους από απλές, οικονομικές και αποδοτικές

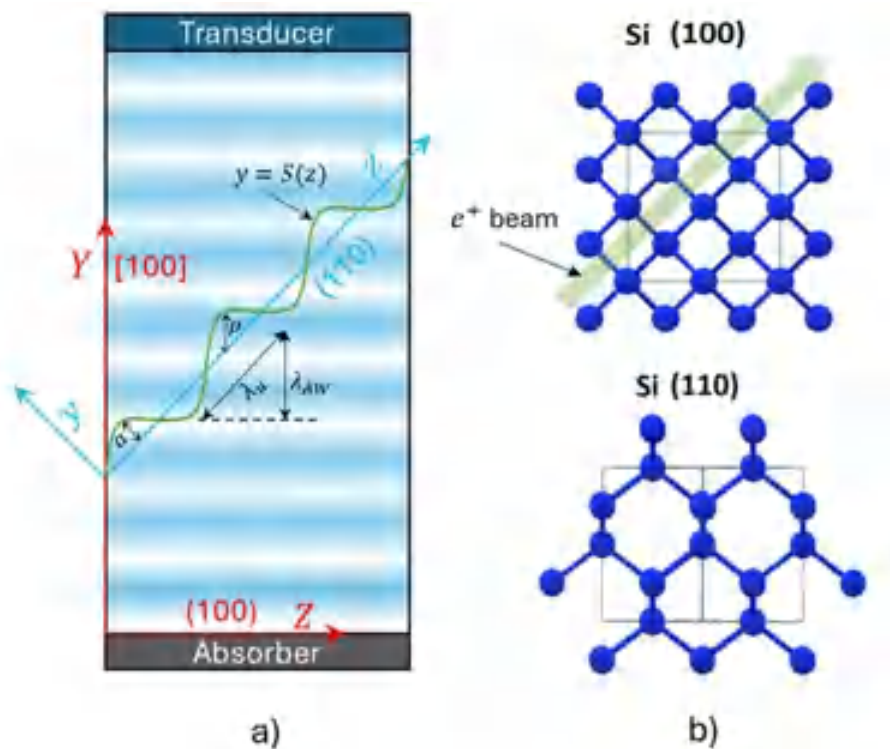
κρυσταλλικές δομές μικρού μεγέθους [8][9]. Η σχετική έρευνα στην Ευρώπη στηρίζεται για την πενταετία 2022 – 2027 από το πρόγραμμα χρηματοδότησης ερευνητικών έργων υψηλού ρίσκου – υψηλής απόδοσης Pathfinder Europe του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Καινοτομίας (European Innovation Council - EIC), στο πλαίσιο του έργου TECHNO-CLS: Emerging technologies for crystal-based gamma-ray light sources (101046458 — TECHNO-CLS — HORIZON-EIC-2021-PATHFINDEROPEN-01). Το έργο στοχεύει στην επίτευξη των κρίσιμων επιστημονικών και τεχνολογικών τομών που απαιτούνται για τον σχεδιασμό και την πρακτική υλοποίηση πηγών ακτινοβολίας γ στην ενεργειακή περιοχή φωτονίων από περίπου 100 keV μέχρι και τα GeV [10] Για το σκοπό αυτό, το TECHNO-CLS προτείνει την εκμετάλλευση και διαμόρφωση των ιδιαίτερα ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων που αναπτύσσονται μέσα σε κρυσταλλικά υλικά από τους θετικά φορτισμένους πυρήνες των περιοδικά διατεταγμένων ατόμων του πλέγματος [4]. Σε αυτή την κατεύθυνση, το πρόγραμμα εισάγει καινοτόμες δομές και διατάξεις κατάλληλα διαμορφωμένων γραμμικών, καμπυλωτών και περιοδικά καμπυλωμένων κρυστάλλων, μέσω των οποίων ελέγχεται η κίνηση, και συγκεκριμένα η επιτάχυνση, υπερ-σχετικιστικών δεσμών φορτισμένων σωματιδίων, με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτίνων γ σε διάφορες ζώνες ευρέως ή στενού φάσματος, ανάλογα με την εκάστοτε διάταξη [1][2][11]

Η ερευνητική πρόταση του έργου TECHNO-CLS αξιολογήθηκε με 99,5% και έλαβε χρηματοδότηση συνολικού προϋπολογισμού 2.6εκ. Ευρώ. Στο έργο συμμετέχουν 8 ευρωπαϊκοί ερευνητικοί φορείς και 2 ιδιωτικές επιχειρήσεις. Συντονιστής του έργου είναι το ερευνητικό κέντρο MBN με έδρα τη Φρανκφούρτη και ο καθηγητής Andrey Solon'yon, ενώ ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο έργο έχει η ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ (IPPL) του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ) με έδρα το Ρέθυμνο και Επιστημονικό Υπεύθυνο τον καθηγητή Νεκτάριο Α. Παπαδογιάννη. Ο ρόλος της ομάδας του ΕΛΜΕΠΑ είναι η ανάπτυξη καινοτόμου τεχνολογίας για την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ στενού φασματικού εύρους με ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά, μέσω της διαμόρφωσης δεσμών σχετικιστικών ποζιτρονίων μέσα σε ακουστικά οδηγούμενους κρυσταλλικούς κυματιστές. Η ομάδα, σε συνεργασία με την ομάδα του MBN, έχουν ήδη παράξει τα πρώτα αποτελέσματα υπολογιστικών προσομοιώσεων που αποδεικνύουν την υλοποιησιμότητα της τεχνολογίας [12]. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών κυματιστών, ενώ στην Ενότητα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

1. Ακουστικά οδηγούμενοι κρυσταλλικοί κυματιστές

Ο καινοτόμος Ακουστικά οδηγούμενος Κρυσταλλικός Κυματιστής (Α-ΚΚ) που ανέπτυξε η ομάδα του ΕΛΜΕΠΑ υιοθετεί έναν σχεδιασμό παρόμοιο με τους γνωστούς Ακουστο-Οπτικούς Διαμορφωτές (ΑΟΔ) που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της έντασης των ακτίνων λέιζερ. Η συσκευή αναπτύσσεται γύρω από έναν μονοκρυστάλλο με κυβική μοναδιαία κυψελίδα, όπως είναι οι υψηλής ποιότητας κρύσταλλοι Si ή Ge. Το σχηματικό διάγραμμα ενός Α-ΚΚ τύπου ΑΟΔ φαίνεται στο Εικόνα 1. Ένα διάμηκες ακουστικό κύμα (AW) με μήκος κύματος λ_{AW} που παράγεται από πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα συχνότητας δεκάδων MHz, προκαλεί περιοδικές

περιοχές πύκνωσης και αραίωσης στον κρύσταλλο κατά μήκος της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης $[100]$ (στην εικόνα υποδεικνύονται με διαβαθμισμένη σκίαση). Η παραμόρφωση οδηγεί σε περιοδική μετατόπιση των κρυσταλλικών επιπέδων (110) , που χαρακτηρίζεται από το προφίλ κάμψης $y = S(z)$, το οποίο είναι κατά προσέγγιση αρμονικό. Δεδομένου ότι η γωνία μεταξύ των αξόνων $[100]$ και $[110]$ είναι 45° , η περίοδος κάμψης λ_u , και κατά συνέπεια το μήκος κύματος του κυματισμού των ποζιτρονίων, σχετίζεται με το μήκος κύματος του ακουστικού κύματος λ_{AW} ως $\lambda_u = \sqrt{2} \lambda_{AW}$. Το πλάτος a της περιοδικής κάμψης είναι ευθέως ανάλογο της μετατόπισης ρ των επιπέδων (100) από την αρχική τους θέση ή ισοδύναμα με το πλάτος A_{AW} του ακουστικού κύματος. Μια δέσμη υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων κατευθύνεται κατά μήκος της διεύθυνσης του επιπέδου (110) . Καθώς τα σωματίδια διασχίζουν τον κρύσταλλο, η κίνησή τους ακολουθεί την περιοδική κάμψη, οδηγώντας στην εκπομπή ισχυρής ακτινοβολίας κυματιστή (undulation radiation). Υπό συνθήκες αρκετά μικρής περιόδου λ_u , μεγάλου πλάτους a , κατάλληλου πάχους κρυστάλλου L και υψηλής ενέργειας δέσμης ε , αυτή η ακτινοβολία εκτείνεται στην περιοχή των ακτίνων γ .

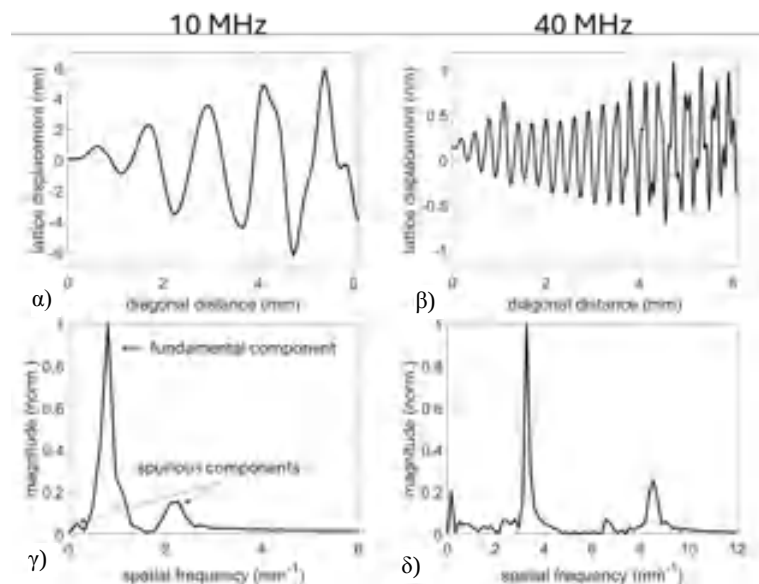


Εικόνα 1: σχηματικό διάγραμμα α) ακουστικά οδηγούμενου κρυσταλλικού κυματιστή τύπου ακουστο-οπτικού διαμορφωτή και β) μοριακής δομής μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Προσαρμοσμένη από [12].

2. Προσομοίωση ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών διαμορφωτών

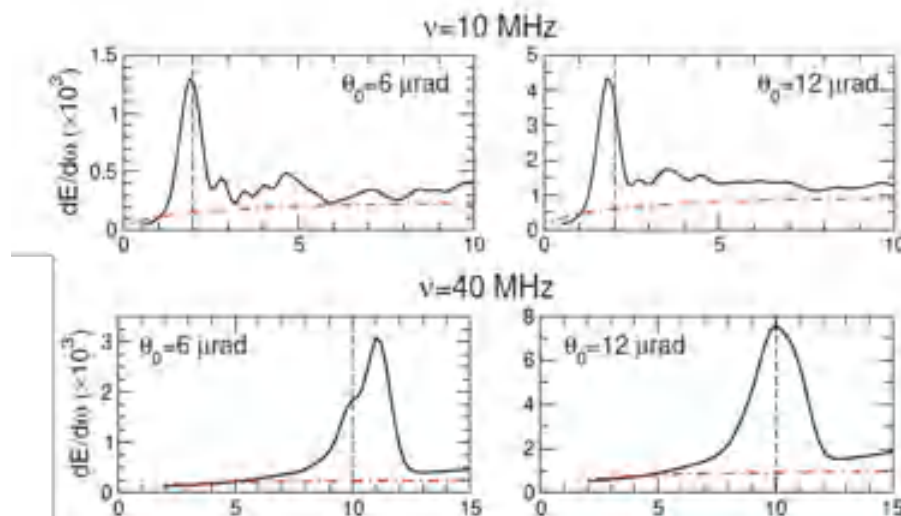
Προσομοιώθηκε σχήμα A-KK κατάλληλο για δέσμες ποζιτρονίων 20 GeV σχετικά με την ακουστικά επαγόμενη παραμόρφωση του πλέγματος χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Ο μονοκρυσταλλός πυριτίου που εξετάστηκε είχε τις ακόλουθες διαστάσεις: $Z_c = 4.3 \text{ mm}$, $Y_c = 5.3 \text{ mm}$ και $X_c = 0.9 \text{ mm}$. Η υπερ-σχετικιστική δέσμη ποζιτρονίων διέρχεται μέσα από τον κρύσταλλο κατά μήκος της διεύθυνσης [110]. Κατά συνέπεια, το μήκος της πορείας της δέσμης είναι $L = \sqrt{2}Z_c = 6,1 \text{ mm}$, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο μισό του μήκους $L_d(0)$ απόδρασης των ποζιτρονίων από τα κανάλια του κρυσταλλικού πλέγματος (dechannelling length).

Η εφαρμοζόμενη αρμονική πίεση στο επάνω επίπεδο XZ έχει πλάτος 4 MPa. Δύο περιπτώσεις συχνότητας, δηλαδή 10 MHz και 40 MHz, εξετάστηκαν, με ελεύθερα όρια στα δύο περιφερειακά επίπεδα XY και XZ και με απορροφητικό όριο στο κάτω επίπεδο (100) XZ. Η μετατόπιση του πλέγματος κατά τον άξονα y και τα αντίστοιχα χωρικά συχνοτικά φάσματα φαίνονται στην Εικόνα 2. Παρά την απόκλιση του προφίλ της κάμψης του πλέγματος των Εικόνων 2α) και β) από το τέλειο ημίτονο, οι θεμελιώδεις αρμονικές συνιστώσες κυριαρχούν στα συχνοτικά συστήματα των Σχημάτων 2γ) και δ). Και στις δύο συχνότητες διέγερσης, εμφανίζονται παρασιτικές φασματικές συνιστώσες με ενέργεια της τάξης του 10% σε σχέση με τη θεμελιώδη.



Εικόνα 2: α) και β) προφίλ κάμψης πλεγματικών επιπέδων στη διεύθυνση διάδοσης των ποζιτρονίων, γ) και δ) χωρικά συχνοτικά φάσματα των προφίλ κάμψης. Προσαρμοσμένη από [12].

Η επίδραση του προφίλ κάμψης του πλέγματος στο φάσμα της παραγόμενης οπτικής ακτινοβολίας από την κυμάτωση ποζιτρονίων 20 GeV μελετήθηκε υπολογιστικά χρησιμοποιώντας μεθόδους κλασικής σχετικιστικής μοριακής μηχανικής μέσω του λογισμικού MBN Explorer. Και στις δύο περιπτώσεις, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενισχύεται σημαντικά στη συχνότητα κυματισμού σε μικρές γωνίες παρατήρησης σε σχέση με την κατεύθυνση διάδοσης των ποζιτρονίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Αυτό το αποτέλεσμα αποδεικνύει ουσιαστικά την πειραματική υλοποιησιμότητα του προτεινόμενου σχήματος A-KK, αλλά και την ρυθμισιμότητα μιας τέτοιας καινοτόμου πηγής ακτίνων γ , καθώς η αλλαγή στη συχνότητα του ακουστικού κύματος οδηγεί σε φασματική μετατόπιση της παραγόμενης ακτινοβολίας γ [12].



Εικόνα 3: προσομοίωση φάσματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ από κυματισμό υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων ενέργειας 20 GeV μέσα σε ακουστικά οδηγούμενο κρυσταλλικό κυματιστή. Προσαρμοσμένη από [12].

3. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι υπολογιστικές ερευνητικές δραστηριότητες της ομάδας του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου TECHNO-CLS με στόχο την ανάπτυξη ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών κυματιστών για την παραγωγή ακτίνων γ μέσω κυματισμού δεσμών υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων. Παρουσιάστηκε καινοτόμο σχήμα κατάλληλο για την ανάπτυξη πειραματικής διάταξης ακουστικά οδηγούμενου κρυσταλλικού κυματιστή καθώς και υπολογιστικά αποτελέσματα από προσομοίωση της λειτουργίας. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την προσομοίωση της μετατόπισης των κρυσταλλικών επιπέδων λόγω των πυκνωμάτων και αραιωμάτων που προκαλεί η ακουστική πίεση μέσα στον κρύσταλλο. Από τις μετατοπίσεις υπολογίστηκαν τα προφίλ κάμψης των καναλιών που σχηματίζουν τα κρυσταλλικά επίπεδα στην διεύθυνση διάδοσης της δέσμης ποζιτρονίων. Τέλος, τα προφίλ κάμψης χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης

ακτινοβολίας γ κατά τον κυματισμό δέσμης υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων. Βρέθηκε ότι η ακουστική διαμόρφωση των κρυσταλλικών επιπέδων πράγματι οδηγεί σε ενίσχυση της φωτεινής ακτινοβολίας σε στενό ενεργειακό εύρος γύρω από την συχνότητα κυματισμού. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την πειραματική υλοποιησιμότητα του εν λόγω σχήματος καθώς και την ρυθμισιμότητα του ως προς το ενεργειακό φάσμα και την ισχύ της οπτικής ακτινοβολίας γ .

4. Αναφορές

- [1] Korol, A. V., Solov'yov, A. V., & Greiner, W., Channeling and radiation in periodically bent crystals. Springer Berlin Heidelberg, (2014)
- [2] Korol, A., & Solov'yov, A. V., Novel Lights Sources Beyond Free Electron Lasers (No. PUBDB-2023-04589). Springer (2022)
- [3] Baskar R, Lee KA, Yeo R, Yeoh KW. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions. Int J Med Sci.,**9**, 3 2012
- [4] Olive, K. A. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. Chin. Phys., **38**, 090001 (2014)
- [5] Korol, A. V., & Solov'yov, A. V., Crystal-based intensive gamma-ray light sources. Eur. Phys. J. D, **74**, 1-17 (2020)
- [6] A. V. Korol, G. B. Sushko, and A. V. Solov'yov, All-atom relativistic molecular dynamics simulations of channeling and radiation processes in oriented crystals, Europ. Phys. J. D **75**, 107 (2021)
- [7] S. Schreiber and B. Faatz, The free-electron laser flash, High Power Laser Science and Engineering, **3**, 1020 (2015)
- [8] Camattari, R. et al., Silicon crystalline undulator prototypes: Manufacturing and x-ray characterization. Phys. Rev. Accel. Beams, **22**, 4, 044701 (2019).
- [9] Tabrizi, M., Korol, A. V., Solov'yov, A. V., & Greiner, W., Feasibility of an electron-based crystalline undulator. Phys. Rev. Lett., **98**, 16, 164801 (2007)
- [10] <https://mbnresearch.com/TECHNO-CLS/Main>
- [11] Bandiera, L. et al., Investigation on radiation generated by sub-GeV electrons in ultrashort silicon and germanium bent crystals. Eur. Phys. J. C, **81**, 1-9 (2021)
- [12] Kaleris, K. et al, Narrowband gamma-ray radiation generation by acoustically driven crystalline undulators, submitted for review in Physical Review Accelerators and Beams.



Υπολογιστική μελέτη απόκρισης συντονιστών σωλήνα σε διεγερση N-παλμού από πηγή ήχου πλάσματος λέιζερ

Δημήτρης Κούγιας^{1,2,*}, Κωνσταντίνος Καλέρης^{2,3,4,**}, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{3,4}, Γιάννης Μουρτζόπουλος²

¹Μηχανολόγος Μηχανικός, Ισιδώρου 12, 26442 Πάτρα

²Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής,
Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας & Τεχνολογίας της Πληροφορίας Τμήμα
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών,
26500 Ρίο, Πάτρα

³Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,
Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

⁴Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100 Ρέθυμνο

*dkougias@upnet.gr, ** kkaleris@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη της ακουστικής απόκρισης των συντονιστών γεωμετρίας σωλήνα σε διεγερση πηγής ήχου πλάσματος λέιζερ (ΠΗΠΛ). Οι ΠΗΠΛ εμφανίζουν λειτουργικά πλεονεκτήματα σε σχέση με συμβατικές πηγές, τα οποία τις καθιστούν κατάλληλες για πληθώρα εφαρμογών ακουστικής τεχνολογίας, μεταξύ αυτών και η αξιολόγηση ακουστικών στοιχείων. Αρχικά προσομοιώνεται η απόκριση ενός κοινού ακουστικού συντονιστή Helmholtz σε διεγερση ακουστικού μονοπόλου εκπομπής ομοιόμορφου φάσματος και ΠΗΠΛ, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της μεθοδολογίας μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια μελετάται η απόκριση δύο τύπων ακουστικών συντονιστών ($\lambda/2$ & $\lambda/4$). Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει η συμπεριφορά των δύο τύπων συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα και πώς αυτή μεταβάλλεται με την αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μήκους, ακτίνας διατομής) τους, καθώς και με την αλλαγή της θέσης και του τύπου της πηγής.

Computational study of the response of tube resonators to N-pulse stimulation from a laser plasma sound source

ABSTRACT

The purpose of this work is the computational study of the acoustic response of tube geometry resonators to laser plasma sound source (LPSS) excitation. LPSSs

show functional advantages over conventional sources, which make them suitable for a multitude of acoustic technology applications, including the evaluation of acoustic elements. First, the response of a common acoustic resonator (Helmholtz) to uniform-spectrum emission acoustic monopole excitation and LPSS, was simulated in order to confirm the correctness of the finite element modeling methodology. Then the response of two types of acoustic resonators ($\lambda/2$ & $\lambda/4$) was studied. In the context of the study, the differences in the behavior of the two types of tube geometry resonator are examined and how this varies with the change of their geometric characteristics (length, cross-section radius), as well as with the alteration of the position and type of the source.

1. Εισαγωγή

Οι συντονιστές είναι ακουστικά στοιχεία με γεωμετρία κοιλότητας που διαθέτουν ένα ή περισσότερα ανοίγματα, συντονίζονται σε ορισμένες συχνότητες και χρησιμοποιούνται για ενίσχυση ή απόσβεση συχνοτήτων. Ο πιο διαδεδομένος τύπος συντονιστή είναι ο κοινός ακουστικός συντονιστής ή συντονιστής Helmholtz ενώ αρκετά συχνά εμφανίζονται σε εφαρμογές ακουστικής και οι συντονιστές γεωμετρίας σωλήνα με ανοικτό το ένα ($\lambda/4$) ή τα δύο άκρα ($\lambda/2$). Τυπικές χρήσεις τέτοιων συντονιστών είναι τα στοιχεία απόσβεσης ήχου σε συστήματα εξαγωγής καυσαερίων μηχανών εσωτερικής καύσης [1] όπως και στα πνευστά μουσικά όργανα [2]. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι διπλός: αφενός να μελετηθεί η απόκριση των ακουστικών συντονιστών τύπου σωλήνα με χρήση πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ (ΠΗΠΛ) και αφετέρου να διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των ακουστικών στοιχείων ως φίλτρων για τη φασματική διαμόρφωση της ακουστικής εκπομπής των ΠΗΠΛ.

Η λειτουργία των ακουστικών συντονιστών γεωμετρίας σωλήνα βασίζεται στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων στο εσωτερικό της κοιλότητας τους, λόγω της διαφοράς της ακουστικής εμπεδότητας του μέσου διάδοσης (αέρα) μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού της κοιλότητας του συντονιστή [3].

Οι συχνότητες συντονισμού για συντονιστές $\lambda/2$ δίνονται από την σχέση:

$$L_0 = n \frac{\lambda}{2} \rightarrow f = \frac{nc_0}{2L_0}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.1)$$

όπου L_0 το μήκος του σωλήνα και C_0 η ταχύτητα του ήχου στο μέσο, και για συντονιστές $\lambda/4$ από τη σχέση:

$$L_0 = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \rightarrow f = \frac{(2n+1)c_0}{4L_0}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2)$$

Η δημιουργία ήχου από ΠΗΠΛ οφείλεται στην εστιασμένη εναπόθεση οπτικής ενέργειας βραχέων και υπερβραχέων παλμών λέιζερ. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία μεταφορά κινητικής ενέργειας στα μόρια του στοχευόμενου μέσου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικού κύματος πίεσης (shock wave). Η διάδοση του κρουστικού κύματος, το οποίο σε κάποια απόσταση από το σημείο εστίασης αποκτά χαρακτηριστικά γραμμικού ακουστικού κύματος, έχει ως αποτέλεσμα τον ορισμό πηγών ήχου σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Η γεωμετρία των ΠΗΠΛ μπορεί να είναι είτε σημειακή / σφαιρική είτε επιμήκης / κυλινδρική, ανάλογα με την ενέργεια του παλμού λέιζερ και τον τρόπο εστίασης του. Συγκεκριμένα οι σφαιρικές ΠΗΠΛ, οι οποίες προκύπτουν από ισχυρή εστίαση παλμών λέιζερ, έχουν παντοκατευθυντική ακουστική εκπομπή σε όλο το συχνοτικό εύρος ενώ εμφανίζουν

μεγάλη επαναληψιμότητα από παλμό σε παλμό [4,5]. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των ΠΗΠΛ είναι η άυλη υπόστασή τους, χάρη στην οποία δεν απαιτείται κάποια διάταξη για την επίτευξη διέγερσης, η οποία εν δυνάμει θα επηρέαζε την παρατηρούμενη εκπομπή των ακουστικών στοιχείων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των ΠΗΠΛ, σε συνδυασμό με την δυνατότητα ελέγχου της κατευθυντικότητας τους, τις καθιστούν ως μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική για εφαρμογές όπως οι ακουστικές μετρήσεις [6], η αναπαραγωγή σύνθετων ηχητικών σημάτων [7,8] και ο μη παρεμβατικός ακουστικός χαρακτηρισμός υλικών και δομών.

2. Μεθοδολογία

Για την υπολογιστική μελέτη της απόκρισης των ακουστικών συντονιστών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένης της γεωμετρικής συμμετρίας των πηγών και των μελετώμενων δομών, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με μοντέλα κυλινδρικής συμμετρίας δύο διαστάσεων, ώστε να περιοριστούν σημαντικά οι απαιτούμενοι υπολογιστικοί πόροι χωρίς αυτό να γίνει σε βάρος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο συχνότητας για τρεις τύπους συντονιστών:

α) Helmholtz, ο οποίος λόγω της γνωστής ακουστικής του συμπεριφοράς αξιοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων

β) ακουστικός συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα με κλειστό το ένα άκρο ($\lambda/4$) και

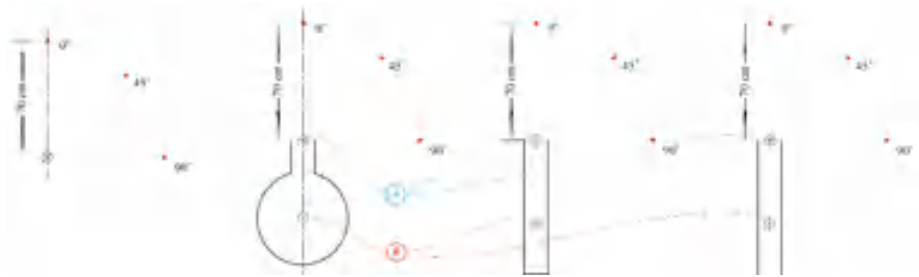
γ) ακουστικός συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα με τα δύο άκρα ανοικτά ($\lambda/2$).

Οι προσομοιώσεις απόκρισης σε διέγερση από ΠΗΠΛ συνοδεύτηκαν από προσομοιώσεις σε διέγερση από σημειακή παντοκατευθυντική πηγή ομοιόμορφου φάσματος και πάλι για λόγους επιβεβαίωσης της ορθότητας των υπολογιστικών μοντέλων.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συντονιστών τύπου σωλήνα, καθώς και οι θέσεις πηγών και δεκτών καταγράφονται στον πίνακα και το σχήμα που ακολουθούν. Τα χαρακτηριστικά του κοινού ακουστικού συντονιστή είναι τα εξής: όγκος κοιλότητας $V_{hr} = 0.00501720862 \text{ m}^3$, επιφάνεια διατομής στομίου $S_{hr} = 0.00196349541 \text{ m}^2$, μήκος λαιμού $l_{hr} = 0.0325 \text{ m}$, ακτίνα κοιλότητας $R_{hr} = 0.025 \text{ m}$ και η συχνότητα συντονισμού υπολογίζεται $f_0 = 124.7 \text{ Hz}$

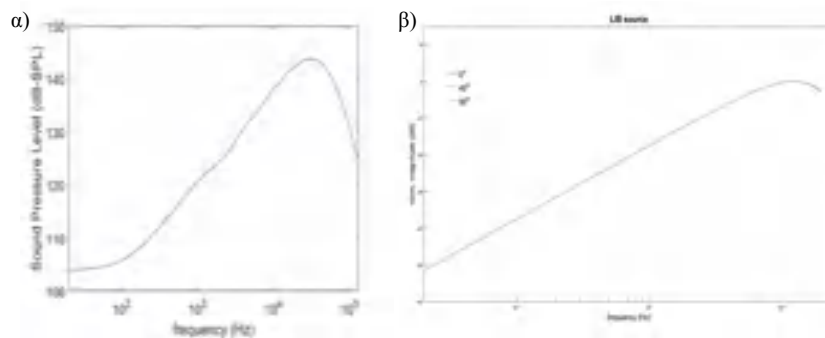
Πίνακας 2.1 - Χαρακτηριστικά ακουστικών συντονιστών τύπου σωλήνα

Συντονιστής	Μήκος	Διάμετρος	Θε.Συχν.Συντ.	Τύπος
Tube 1	560 mm	30 mm	150.44 Hz	$\lambda/4$
Tube 1 mod	560 mm	40 mm	149.75 Hz	$\lambda/4$
Tube 2	505 mm	35 mm	166.17 Hz	$\lambda/4$
Tube 4	955 mm	30 mm	88.91 Hz	$\lambda/4$
Tube 5	860 mm	32 mm	98.55 Hz	$\lambda/4$
Tube 1 open	560 mm	30 mm	296.25 Hz	$\lambda/2$



Σχήμα 2.1 Θέσεις πηγών & θέσεις / γωνίες δεκτών

Οι ΠΗΠΑ αποτελούν θερμικές πηγές, καθώς η διέγερση του αέρα προκύπτει από την θερμοελαστική εκτόνωσή του λόγω της γρήγορης εναπόθεσης ενέργειας από τους παλμούς λέιζερ. Παρ' όλα αυτά, εδώ για λόγους απλούστευσης της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε το σημειακό ακουστικό μονόπολο. Η επιλογή αυτή είναι δικαιολογημένη δεδομένων των εξαιρετικά μικρών διαστάσεων των ΠΗΠΑ σφαιρικής εκπομπής αλλά και της ακουστικής απόκρισης του σημειακού μονοπόλου, η οποία προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια αυτή των ΠΗΠΑ στο εύρος του ακουστού φάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.2 - Φάσμα ακουστικής εκπομπής ΠΗΠΑ παραγόμενη από παλμούς λέιζερ διάρκειας 6ns, μήκους κύματος 532nm και ενέργειας 40 mJ α) πειραματική μέτρηση και β) προσομοίωση με σημειακό μονόπολο.

Η πηγή σημειακού ακουστικού μονοπόλου εισάγει έναν όρο σημειακής πηγής στο δεξιό μέλος της εξίσωσης του Helmholtz με αποτέλεσμα να προκύψει η σχέση:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k^2 p_t}{\rho} = \frac{4\pi}{\rho} S \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (2.1)$$

όπου $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ η Δέλτα του Dirac, η οποία τοποθετεί την σημειακή πηγή στη θέση $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$, p_t η συνολική πίεση, k ο κυματαριθμός και $\mathbf{q}_d$ η διπολική πηγή τομέα (dipole domain source). Το πλάτος του κύματος, συναρτήσει της I_{rms} , που εκπέμπει το μονόπολο S (SI unit: N/m²) δίνεται από την έκφραση:

$$S = e^{i\varphi} \cdot d_{src} \sqrt{2\rho c_0 I_{rms}} \quad (2.2)$$

όπου I_{rms} η ένταση αναφοράς (RMS) στον ελεύθερο χώρο, φ η φάση της πηγής και d_{src} η απόσταση από την πηγή. Η έκφραση που εισάγεται στην I_{rms} , ώστε να

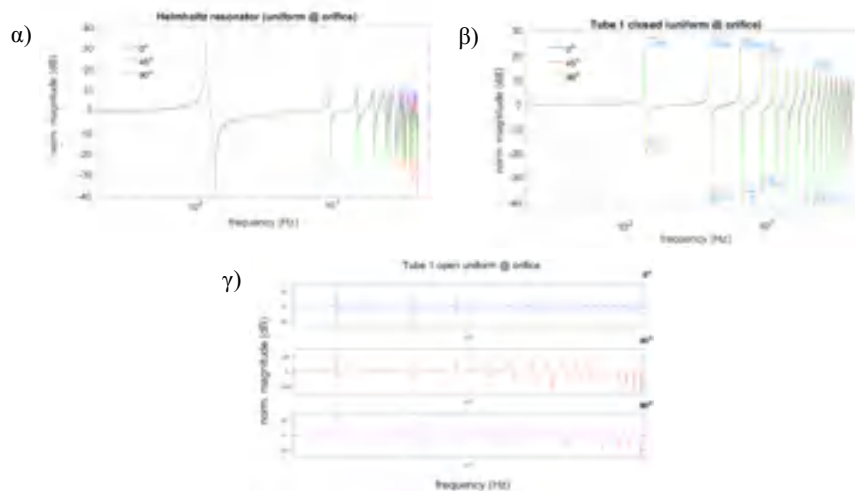
προκύπτει η διέγερση που να προσεγγίζει ΠΗΠΛ είναι ο μετασχηματισμός Fourier μιας Gaussian καμπύλης στο πεδίο του χρόνου.

$$I_{rms} = \omega^2 \left(e^{\left(-\frac{\omega^2}{\sigma_\omega^2} \right)} \right)^2 [\text{W/m}^2] \quad (2.3)$$

3. Αποτελέσματα

Αφού πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική προσομοίωση για σημειακό ακουστικό μονόπολο ομοιόμορφου φάσματος απουσία συντονιστή, ώστε να βεβαιωθεί η ομοιόμορφη εκπομπή σε όλες τις συχνότητες και κατευθύνσεις, ακολούθησαν προσομοιώσεις για όλους τους συντονιστές στις διάφορες θέσεις πηγών (βλ. Σχ. 2.1). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της μεθόδου προσομοίωσης καθώς οι υπολογισμένες θεμελιώδεις συχνότητες συντονισμού στον κοινό συντονιστή και οι θεμελιώδεις και ανώτερες αρμονικές συχνότητες συντονισμού στους συντονιστές γεωμετρίας σωλήνα συμπίπτουν με τις θεωρητικές.

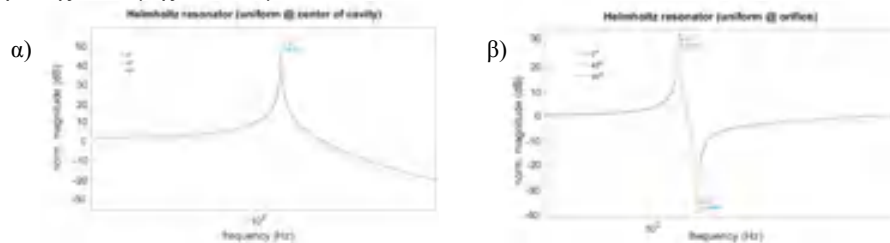
Όπως αναμενόταν, στους συντονιστές $\lambda/4$ (για θέση πηγής στο κέντρο της διατομής του στομίου) εμφανίζονται έντονες ενισχύσεις στη θεμελιώδη συχνότητα και τις περιττές αρμονικές, αλλά και έντονες ακυρώσεις σε γειτονικές συχνότητες των ενισχύσεων (anti-resonance). Οι συντονιστές $\lambda/2$ παρουσιάζουν ενισχύσεις στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού και όλες τις αρμονικές, χωρίς όμως να εμφανίζουν έντονες ακυρώσεις.



Σχήμα 3.3 - Ακουστική απόκριση συντονιστή α) Helmholtz, β) $\lambda/4$ & γ) $\lambda/2$ σε σημειακό μονόπολο ομοιόμορφου φάσματος για διάφορες θέσεις μέτρησης.

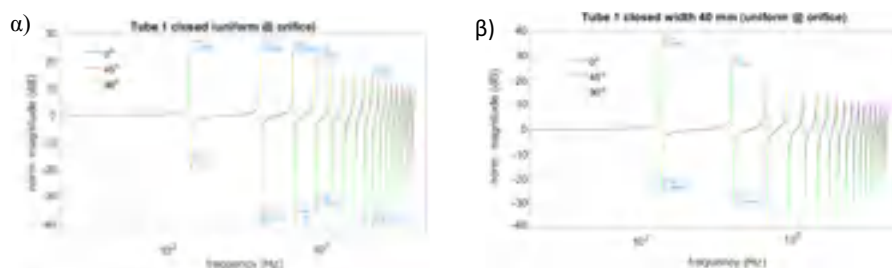
Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει από τις προσομοιώσεις είναι πως η θέση της πηγής στο εσωτερικό των κοιλοτήτων ευνοεί τις ενισχύσεις γύρω από τις συχνότητες συντονισμού και οδηγεί σε εξάλειψη των ακυρώσεων, όπως φαίνεται στο

βαθμό και με το μοτίβο που αυτό πραγματοποιείται όταν η πηγές τοποθετηθούν στο κέντρο της διατομής του στομίου.



Σχήμα 3.4- Απόκριση συντονιστή Helmholtz γύρω από την Κ.Σ.Σ. όταν σημειακή πηγή ομοιόμορφου φάσματος τοποθετείται α) στο κέντρο της κοιλότητας & β) στο κέντρο της διατομής του στομίου.

Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της ακουστικής απόκρισης κοινών συντονιστών με συντονιστές τύπου σωλήνα επιβεβαιώνει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο γεωμετρίες. Την επίδραση της διατομής του στομίου στην τιμή των συχνοτήτων συντονισμού. Ενώ στην περίπτωση του συντονιστή Helmholtz η ακτίνα του στομίου παίζει σημαντικό ρόλο στην Κ.Σ.Σ., στους συντονιστές τύπου σωλήνα η αλλαγή διατομής παίζει πολύ μικρότερο ρόλο στον προσδιορισμό των συχνοτήτων συντονισμού. Συγκεκριμένα, η επίδραση της διατομής στους συντονιστές σωλήνα περιγράφεται από την λεγόμενη διόρθωση των άκρων και, όπως φάνηκε από υπολογιστικές προσομοιώσεις σωλήνων ίδιου μήκους και διαφορετικής διατομής, η απόκλιση είναι αμελητέα (η Κ.Σ.Σ. για συντονιστή $\lambda/4$ με διατομή 30 mm υπολογίζεται στα 151 Hz, ενώ για $\lambda/4$ με διατομή 40 mm στα 150 Hz). Παρ' όλα αυτά, η διατομή των συντονιστών τύπου σωλήνα παίζει σημαντικό ρόλο στο εύρος των ενισχύσεων / ακυρώσεων, καθώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 αυτό αυξάνεται σημαντικά (~5-10 dB) και στις ενισχύσεις και στις ακυρώσεις, αυξάνοντας τη διατομή.

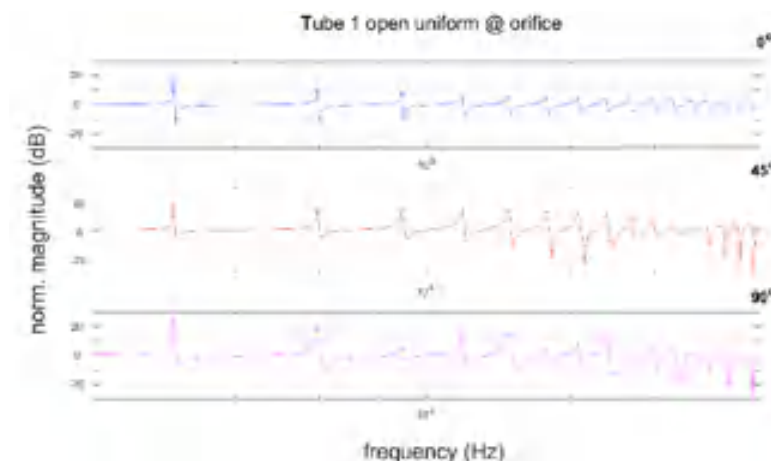


Σχήμα 3.6 – Ακουστική απόκριση συντονιστών $\lambda/4$ μήκους 560 mm διατομής

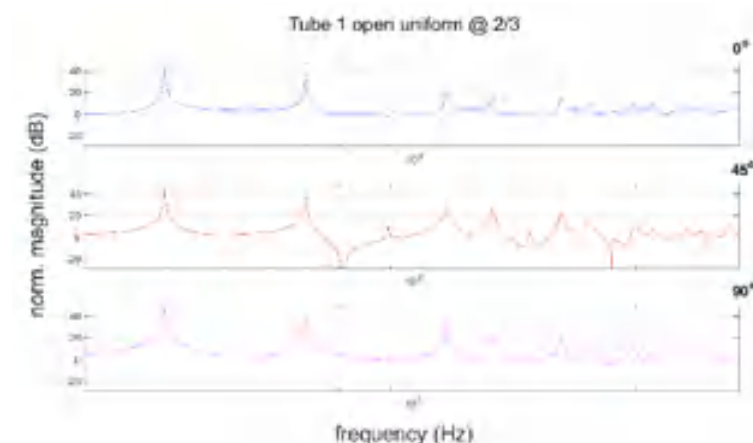
α) 30 mm & β) 40 mm.

Τέλος, παρατηρείται πως τα μοτίβα της απόκρισης των ακουστικών στοιχείων μεταβάλλονται και με τη γωνία τοποθέτησης του δέκτη μέτρησης. Αυτό φαίνεται πολύ καθαρά στα σχήματα 3.8 & 3.9 τα οποία αφορούν σε συντονιστές $\lambda/2$ με την πηγή σε δύο θέσεις. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στους συντονιστές $\lambda/4$, στους οποίους (βλ. Σχήμα 3.6) η διαφοροποίηση εντοπίζεται στις υψηλότερες συχνοότητες, όπου η ενισχύσεις στη γωνία 0° έχουν μεγαλύτερο εύρος με την γωνία 45° να

ακολουθεί και το μικρότερο εύρος ενίσχυσης να παρατηρείται στις 90° . Το ακριβώς αντίθετο παρατηρείται για το εύρος των ακυρώσεων σε ότι αφορά τους $\lambda/4$ συντονιστές, στις υψηλότερες συχνότητες.



Σχήμα 3.8 – Ακουστική απόκριση συντονιστή $\lambda/2$ με την πηγή στο κέντρο του στομίου



Σχήμα 3.9 – Ακουστική απόκριση συντονιστή $\lambda/2$ με την πηγή στα $2/3$ του μήκους του σωλήνα

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με ακουστική διέγερση ΠΗΠΛ, με τη διαφορά ότι το ακουστικό φάσμα αποκτά προφίλ υπερπαρατοφίλτρου 1ης τάξης, λόγω της χαρακτηριστικής απόκρισης των ΠΗΠΛ.

4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν την καταλληλότητα των ΠΗΠΛ για τη μελέτη συστημάτων ακουστικών συντονιστών με διέγερση εσωτερικά της δομής, η οποία μπορεί να προκύψει εύκολα από την αντιστροφή του

φασματικού προφίλ του Ν-παλμού. Αντίστοιχα, αποδεικνύεται ότι οι συντονιστές Helmholtz και τύπου σωλήνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ως ακουστικά φίλτρα για τη διαμόρφωση του φάσματος των ΠΗΠΛ.

5. Αναφορές

- [1] Sohn, C. H. & Park, J. H. “A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter-wave, and Helmholtz resonators” *Aerospace Science and Technology* 15, Issue 8, 606-614 (2011)
- [2] Polychronopoulos, S. et al, “Physical Modeling of the Ancient Greek Wind Musical Instrument Aulos: A Double-Reed Exciter Linked to an Acoustic Resonator” *IEEE Access* 9, 98150-98160 (2021)
- [3] Field, C. D. & Fricke,” Theory and applications of quarter-wave resonators: A prelude to their use for attenuating noise entering buildings through ventilation openings”, *F. R. Applied Acoustics* 53, 117-132 (1998)
- [4] Kaleris, K. et al, “Laser-plasma sound sources in atmospheric air: A systematic experimental study”, *JSV*. 570, 118000 (2023)
- [5] Oksanen, M. & Hietanen, “Photoacoustic breakdown sound source in air” *Ultrasonics* 32, 327–331 (1994)
- [6] Kaleris, K. et al, “Acoustic metamaterials characterization via laser plasma sound sources” *Nat. Commun. Mater.*, in print (2024)
- [7] Kaleris, K. et al, “Laser-sound: optoacoustic transduction from digital audio streams” *Sci. Rep.* 11, 476 (2021)
- [8] Kaleris, K. et al, “Laser-sound reproduction by pulse amplitude modulation audio streams”, *Sci. Rep.*, *Sci Rep* 14, 12102 (2024)



Υπολογιστική μελέτη της παραγωγής και διάδοσης υπερήχων σε στερεούς στόχους πυριτίου υπό την επίδραση παλμών laser

Ελένη Παπαδάκη^{1,2}, Εμμανουήλ Κανιολάκης Καλούδης^{1,2}, Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2}, Βασίλειος Σαμολαδάς⁴, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Μιχάλης Ταταράκης^{1,3}, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{1,2}, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2}, Β. Δημητρίου^{1,2,*}

¹Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος & Λέιζερ, ΕΛΜΕΠΑ, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

² Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, ΕΛΜΕΠΑ, 74100 Ρέθυμνο

³ Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, ΕΛΜΕΠΑ, 73133 Χανιά

⁴Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης,

*dimvasi@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επίδραση παλμικών laser σε στερεά υλικά μπορεί να βοηθήσει στη μελέτη των της δομής και των ιδιοτήτων τους. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη μέσω προσομοιώσεων της θερμικής και κυρίως της ακουστικής συμπεριφοράς στερεών στόχων πυριτίου υπό την επίδραση βραχέων παλμών laser. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι λόγω της μεγάλης και ταχείας απορρόφησης ενέργειας από τον στόχο δημιουργήθηκαν μικρού πλάτους επιφανειακά ακουστικά κύματα τα οποία διαδόθηκαν με ταχύτητα ~5000m/s σε όλη την έκταση του στερεού.

A Computational study of ultrasound generation and propagation in solid silicon targets under pulsed laser irradiation

ABSTRACT

The irradiation of solid materials by pulsed lasers is essential in studying their structure and properties. The purpose of this research is the computational study, through simulations, of the thermal and mainly acoustic behaviour of solid silicon (Si) targets under irradiation by short laser pulses of varying intensity. The simulation results showed that due to the large and rapid energy absorption by the target, surface acoustic waves of small amplitude were generated, propagating at a speed of approximately 5000 m/s throughout the solid.

Εισαγωγή

Η πηγή φωτός laser αποτελεί ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη της σύνθεσης, της δομής και των ιδιοτήτων της ύλης λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων της. Η αλληλεπίδραση laser - ύλης μπορεί να προσομοιωθεί αριθμητικά με κατάλληλη επιλογή των τιμών που αφορούν τις ιδιότητες του υλικού και τις παραμέτρους του laser. Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων αρκετές μελέτες της επίδρασης παλμών laser σε Si λόγω της ευρείας χρήσης του σε τεχνολογικές εφαρμογές [1-4]. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στο πρόβλημα της επίδρασης βραχέων παλμών laser διάρκειας πίκo και νάνο-δευτερολέπτων (ps & ns) στο Si όταν αναπτύσσονται θερμοκρασίες μικρότερες του σημείου ζέσης του. Με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method-FEM) [5] αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός λεπτού στόχου με ομοιόμορφο πυκνό πλέγμα, ώστε να προσομοιωθεί με επιτυχία η συμπεριφορά του Si υπό την επίδραση του παλμού laser. Για την περιγραφή των ιδιοτήτων του υλικού χρησιμοποιήθηκαν το εμπειρικό μοντέλο Johnson-Cook και η καταστατική εξίσωση Grüneisen [5] ικανά να περιγράψουν τη σύνθετη δυναμική του φαινομένου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι δημιουργούνται και διαδίδονται στο στόχο επιφανειακά ακουστικά κύματα (Surface Acoustic Waves-SAWs) σχετικά μικρού πλάτους, καθιστώντας την επίδραση παλμικών laser κατάλληλη για εφαρμογές όπως η κατεργασία, ο χαρακτηρισμός των υλικών καταστροφικός ή μη [6,7], η ιατρική απεικόνιση, κτλ.

1. Μοντελοποίηση και προσομοιώσεις

Για την περιγραφή της ακουστικής και μηχανικής απόκρισης του στόχου Si υπό την επίδραση παλμικών laser αναπτύχθηκε με τη μέθοδο FEM ένα κατάλληλο μοντέλο το οποίο προσομοιώθηκε στο λογισμικό LS-DYNA [5]. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο Υπολογιστικό Σύστημα Υψηλών Επιδόσεων (HPC) Advanced Research Information System (ARIS) [8].

1.1 Αλληλεπίδραση ύλης- παλμικών λέιζερ- Εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο

Κατά την επίδραση του laser σε στερεό το υλικό απορροφά τοπικά μέρος της ενέργειας του παλμού η οποία μεταφέρεται μέσω θερμικής αγωγιμότητας σε όλη την έκτασή του. Αρχικά συμβαίνει ταχύτατη αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή εστίασης του παλμού η οποία προκαλεί έντονη θερμική διαστολή και τοπική διόγκωση της επιφάνειας του στερεού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών θερμικών τάσεων. Λόγω των θερμικών τάσεων παράγονται επιφανειακά ακουστικά κύματα τα οποία διαδίδονται διαμέσου του στόχου. Το φαινόμενο διέπεται από την εξίσωση θερμικής αγωγής (1.1) (αγνοώντας φαινόμενα συναγωγής και θερμότητας λόγω ακτινοβολίας) και την εξίσωση της κυματικής διάδοσης (1.2) [9].

$$\rho(r,T)C_p(r,T)\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} - \nabla[k(r,T)\nabla T(r,t)] = \dot{Q}(r,t) - L \quad (1.1)$$

όπου T η θερμοκρασία, ρ η πυκνότητα, C_p η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση και k η θερμική αγωγιμότητα του υλικού και L_m η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του υλικού. Ο όρος $Q(r,t)$ περιγράφει την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και όγκου που απορροφά το υλικό. Στο κέντρο του στόχου αναπτύσσονται ισχυρές τάσεις λόγω της ταχείας θερμικής διαστολής και παράγονται υπερηχητικά κύματα (SAWs) των οποίων η διάδοση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\rho(r,T) \frac{\partial^2 U(r,t)}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 U(r,t) + (\lambda + \mu) \nabla[\nabla U(r,t)] - \alpha(3\lambda + 2\mu) \nabla T(r,t) \quad (1.2)$$

όπου U η μετατόπιση, α ο συντελεστής θερμικής διαστολής και λ, μ οι συντελεστές Lamé που εξαρτώνται από το είδος του υλικού [9,10].

1.2 Μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών του παλμικού λείζερ

Ο παλμός laser εφαρμόστηκε στο κέντρο της άνω επιφάνειας του στόχου και θεωρήθηκε ότι έχει Gaussian χωρικό και χρονικό προφίλ. Η ογκομετρική ροή ενέργειας (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου) που απορροφά ο στόχος δίνεται από την σχέση:

$$Q(r,t) = I_0(t)(1-R) \alpha_b e^{-4 \ln 2 \left(\frac{t-t_0}{t_0} \right)^2} e^{-(x^2+z^2)/r_0^2} e^{-a_b y} \quad (1.3)$$

όπου t_0 και r_0 είναι η διάρκεια του παλμού και η ακτίνα της δέσμης αντίστοιχα στο πλήρες εύρος του μισού της μέγιστης τιμής (FWHM), r το διάνυσμα θέσης, a_b ο συντελεστής απορρόφησης του Si, $I_0(t)$ η ένταση του λείζερ στην άνω επιφάνεια του στόχου και R η ανακλαστικότητα της. Ο όρος $a_b(1-R)I_0(t)$ εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που διεισδύει στον στόχο ενώ ο τελευταίος εκθετικός όρος δίνει την εξασθένηση του φωτός λόγω απορρόφησης σε βάθος y από την άνω επιφάνεια [11]. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων θεωρήθηκαν παλμοί σταδιακής αυξανόμενης έντασης ακτινοβολίας και Gaussian χωρο-χρονικού προφίλ ίδιας διαμέτρου 25μm και διαφορετικής διάρκειας 6ns και 10ps στο FWHM αντίστοιχα. Το μήκος κύματος θεωρήθηκε 532nm για τον ns ενώ 1064nm για τον ps παλμό αντίστοιχα.

1.3 Μοντελοποίηση του στερεού στόχου πυριτίου και των ιδιοτήτων του

Με χρήση του LS-DYNA λογισμικού που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός λεπτού στόχου Si κατάλληλων διαστάσεων και ομοιομορφης διακριτοποίησης. Η επιλογή των διαστάσεων και της διακριτοποίησης του στόχου έγινε με αρχικές δοκιμαστικές προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι στόχος διαστάσεων 450μm×9μm×450μm και διακριτοποίησης 1μm×0,3μm×1μm κατά μήκος των αξόνων x×y×z είναι κατάλληλος για την μελέτη της δημιουργίας και της διάδοσης των SAWs. Η συμπεριφορά του Si προσομοιώθηκε με το εμπειρικό μοντέλο Johnson-Cook (J-C) που είναι κατάλληλο να περιγράψει στερεά όταν δέχονται υψηλές τάσεις-καταπονήσεις [5]. Η ελαστοπλαστική τάση σ

υπολογίζεται από την εξίσωση (1.4) ενώ στην περίπτωση πολύ υψηλών τάσεων η πλαστική καταπόνηση από την (1.5).

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 e^{\frac{D_3 - p}{\sigma_{VM}}} \right) \left(1 + \frac{D_4 \ln \dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 + D_5 \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \quad (1.5)$$

Οι όροι A, B, C, n, m και D₁-D₅ [10,12,13,14] που αφορούν στο υλικό είναι πειραματικές παράμετροι της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, ενώ οι όροι T₀, T, T_m και σ_{VM} περιγράφουν τη θερμοκρασία του δωματίου, του στόχου, το σημείο τήξης του Si και την τάση Von Mises αντίστοιχα. Ο όρος $\dot{\varepsilon}$ δείχνει το ρυθμό παραμόρφωσης ενώ ο $\dot{\varepsilon}_0$ αποτελεί ρυθμό αναφοράς. Η υδροδυναμική συμπεριφορά του Si προσομοιώθηκε με την καταστατική εξίσωση Grüneisen που είναι κατάλληλη για να περιγράψει την πίεση εντός ενός στερεού υπό υψηλούς ρυθμούς συμπίεσης ή/και διαστολής. Η εξίσωση (1.6) δίνει την πίεση στερεού που διαστέλλεται συναρτήσει της ταχύτητας του ήχου στο υλικό C, της εσωτερικής ενέργειας προς τον αρχικό όγκο E και των παραμέτρων γ₀ και α₁ [5].

$$p = \rho_0 C^2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + [\gamma_0 + \alpha_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)] E \quad (1.6)$$

1.4 Προσομοιώσεις

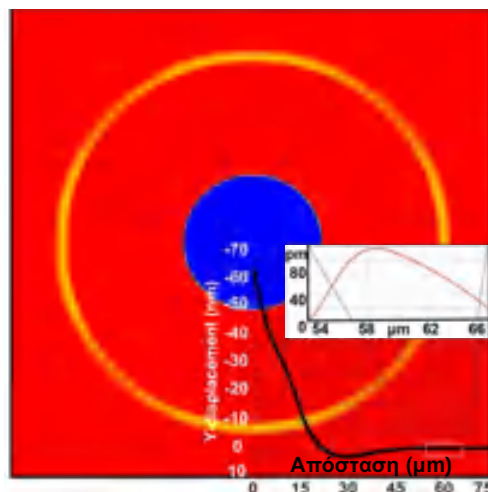
Αρχικά προσομοιώθηκε η επίδραση ns παλμών στο Si. Η ενέργεια/μονάδα επιφάνειας θεωρήθηκε 0,45J/cm²- 0,75J/cm² και 1,35J/cm² αντίστοιχα. Ακολούθως προσομοιώθηκε η επίδραση ps παλμών με αντίστοιχες τιμές 0,75J/cm²- 1,05J/cm² και 1,7 J/cm². Η επιλογή έγινε με σκοπό να επιτευχθεί παρόμοια θερμοκρασιακή κατανομή στο κέντρο του στόχου για τους ns και ps παλμούς σε κάθε φάση (ελαστική, πλαστική, τήξης), ώστε να μελετηθεί η επίδραση των φάσεων της περιοχής εστίασης στην παραγωγή και διάδοση των υπερήχων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

2. Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

2.1 Αποτελέσματα-γέννηση υπερήχων

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι κατά την επίδραση παλμών laser το Si απορροφά ενέργεια αυξάνοντας απότομα την θερμοκρασία του από 20°C σε πάνω από 1000°C. Στην ελαστική φάση η μέγιστη θερμοκρασία στο κέντρο του στόχου ήταν ~1150°C στην πλαστική ~1250°C και στην τήξης >1412°C που είναι το σημείο τήξης του πυριτίου. Το κέντρο του στόχου λόγω της έντονης θέρμανσης διογκώθηκε και αναπτύχθηκαν ισχυρές θερμομηχανικές τάσεις από 0,8-1,5 GPa οι οποίες με την σειρά τους οδήγησαν στην παραγωγή του υπερηχητικού κύματος στα όρια της διάγκωσης. Στο στιγμιότυπο που ακολουθεί φαίνεται η δημιουργία του υπερήχου τη στιγμή 22ns σε απόσταση ~58μm από το κέντρο του στόχου υπό την

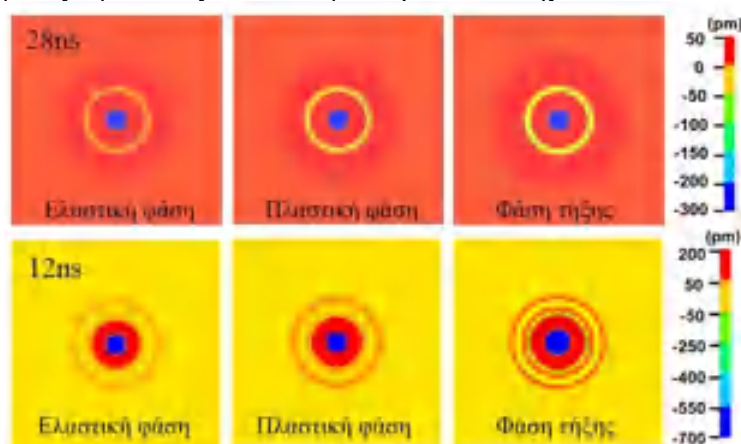
επίδραση παλμού διάρκειας 6ns στην περίπτωση τήξης. Στην περιοχή 54–66 μm έχει γίνει μεγέθυνση $\times 1000$ λόγω του μικρού πλάτους του παραγόμενου υπέρηχου.



Σχήμα 2.1 Δημιουργία του υπέρηχου τη στιγμή 22ns με το αντίστοιχο γράφημα της κάθετης μετατόπισης (y) συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του στόχου.

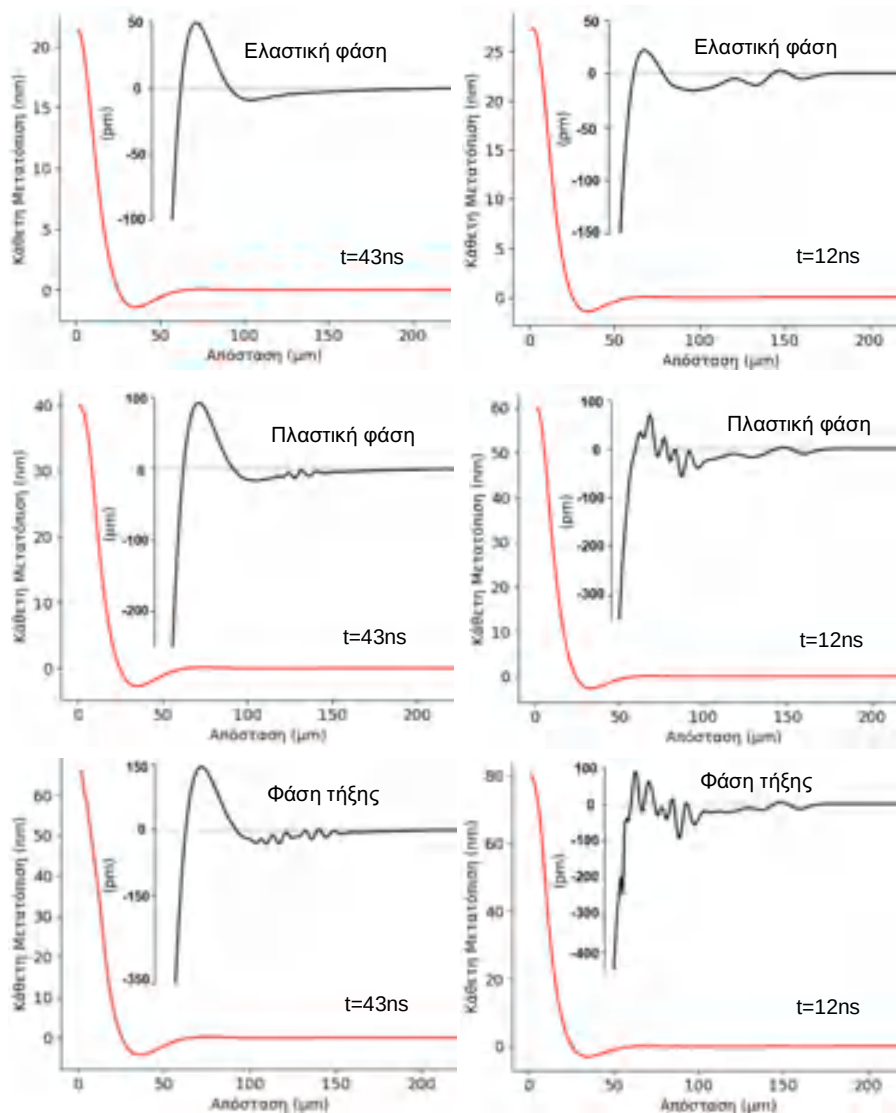
2.2 Αποτελέσματα-Διάδοση υπέρηχων

Για παλμούς διάρκειας 6ns ο υπέρηχος ανιχνεύεται με το πέρας του παλμού στα 22-23ns ανεξάρτητα της έντασης του λέιζερ, ενώ στην περίπτωση των 10ps στα 7-8ns πολύ μετά το πέρας του παλμού. Σε κάθε περίπτωση εμφανίζεται σε απόσταση 58 με 60 μm από το κέντρο του στόχου και 5ns μετά την ανίχνευσή του έχει διανύσει απόσταση $\sim 25 \mu\text{m}$, δηλαδή διαδίδεται με ταχύτητα $u = \Delta d / \Delta t \approx 5000 \text{ m/s}$. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται ο υπέρηχος 5ns μετά την ανίχνευσή του, τις στιγμές 28ns και 12ns για τις περιπτώσεις των ns και ps παλμών αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2 Σύγκριση υπέρηχων που δημιουργήθηκαν σε κάθε φάση υπό την επίδραση παλμών $\sim 5 \text{ ns}$ μετά την ανίχνευσή τους για ns παλμούς (πάνω σειρά) και ps παλμούς (κάτω σειρά)

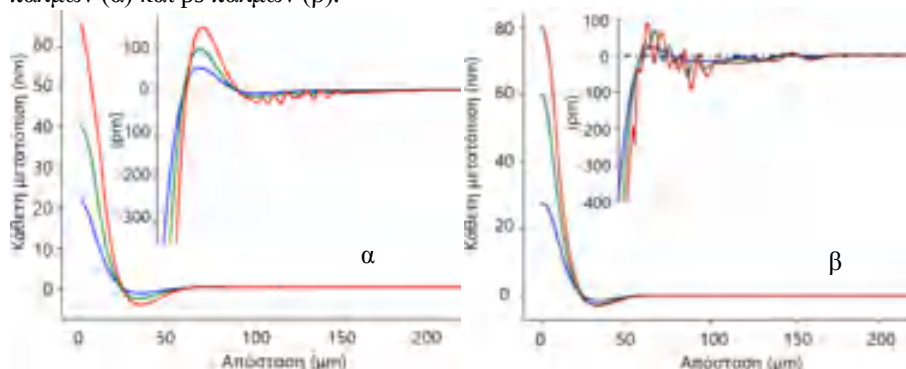
Η μορφή του υπέρηχου φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα της κάθετης μετατόπισης (y) κατά μήκος του άξονα x από 0-225 μm . Για $x > 50\mu\text{m}$ η μετατόπιση μεγεθύνεται $\times 1000$ για να φανεί ο υπέρηχος μικρού πλάτους. Τα διαγράμματα της πρώτης στήλης αφορούν επίδραση ns παλμών τη στιγμή 43ns ενώ της δεύτερης επίδραση ps παλμών τη στιγμή 12ns.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα της κάθετης μετατόπισης (y) κατά μήκος του άξονα x για κάθε περίπτωση και ένθετη εικόνα με $\times 1000$ zoom (μετά τα 50 μm στον άξονα x). Στην περίπτωση ns παλμών (αριστερή στήλη) το μήκος του υπέρηχου είναι σταθερό για όλες τις φάσεις, το πλάτος είναι ανάλογο της έντασης του παλμού και η μη γραμμική συμπεριφορά είναι μικρή ακόμα και σε φάση τήξης. Στην περίπτωση ps παλμών

(δεξιά στήλη) εμφανίζεται μείωση στο πλάτος λόγω μη γραμμικής διάδοσης, η οποία είναι εμφανής σε όλες τις φάσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται σε κοινό διάγραμμα η κάθετη μετατόπιση για την ελαστική, πλαστική περίπτωση και την περίπτωση τήξης υπό την επίδραση ns παλμών (α) και ps παλμών (β).



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα της κάθετης μετατόπισης (y) κατά μήκος του άξονα x.

Στα κοινά διαγράμματα είναι εμφανές ότι στην περίπτωση ns παλμών το πλάτος του υπέρηχου είναι ανάλογο της ενέργειας του παλμού, αφού το πλάτος στην πλαστική φάση είναι διπλάσιο και στην τήξη τριπλάσιο από την ελαστική. Στην περίπτωση ps παλμών λόγω έντονης μη γραμμικής συμπεριφοράς, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

2.3 Συμπεράσματα

Η μελέτη των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η ταχύτατη εναπόθεση ενέργειας από το laser στο στόχο οδηγεί σε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας του. Η ακόλουθη ταχύτατη θερμική διαστολή προκαλεί διόγκωση στο κέντρο του στόχου, μεγαλύτερη στην περίπτωση ps παλμών η οποία προκαλεί ανάπτυξη ισχυρών θερμομηχανικών τάσεων, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στην γέννηση υπερήχων στα όρια της διόγκωσης. Η εμφάνιση του υπέρηχου γίνεται σε σταθερή απόσταση από το κέντρο του στόχου ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά του παλμού. Ο χρόνος εμφάνισής του εξαρτάται από την διάρκεια και το μήκος κύματος και ελάχιστα από την ένταση του παλμού. Το πλάτος του εξαρτάται από τη διάρκεια το μήκος κύματος και έντονα από την ενέργεια του παλμού. Οι έντονες παραμορφώσεις που προκαλούνται στο κέντρο του στόχου οδηγούν σε μη γραμμική διάδοση του υπέρηχου, η οποία γίνεται ιδιαίτερα εμφανής για μεγάλες εντάσεις (τήξη) για ns παλμούς, ενώ είναι εμφανής σε όλες τις φάσεις σε περίπτωση ps παλμών. Συνοψίζοντας σε περίπτωση επίδρασης ns παλμών ο υπέρηχος εμφανίζεται με το πέρας του παλμού, το πλάτος του είναι μικρό και η μη γραμμική συμπεριφορά εμφανίζεται κυρίως στη φάση τήξης. Σε περίπτωση επίδρασης ps παλμών ο υπέρηχος εμφανίζεται πολύ μετά το πέρας του παλμού και έχει περίπου ίδιο πλάτος. Η μη γραμμική συμπεριφορά εμφανίζεται από την ελαστική φάση και γίνεται πολύ έντονη στην πλαστική περιοχή και στην φάση τήξης. Η μελέτη της δημιουργίας και

διάδοσης υπερήχων στο Si χρειάζεται περαιτέρω μελέτη λόγω της κρυσταλλικής δομής και των ημιαγωγικών ιδιοτήτων του.

3. Αναφορές

- [1] Kyota, H.; Higashi, M.; Curosu, T.; Lida, M. Numerical simulation and validation of subsurface modification and crack formation induced by nanosecond-pulsed laser processing in monocrystalline silicon. *J. Appl. Phys.* 130, 239901 (2021)
- [2] Acosta-Zepeda, C.; Saavedra, P.; Bonse, J.; Haro-Poniatowski, E., Modeling of silicon surface topographies induced by single nanosecond laser pulse induced melt-flows. *J. Appl. Phys.* 125, 175101 (2019)
- [3] Marine, W.; Bulgakova, N.M.; Patrone, L.; Ozerov, Insight into electronic mechanisms of nanosecond-laser ablation of silicon. *J. Appl. Phys.* 103, 094902 (2008)
- [4] Wang, D.; Wang, Z.; Zhang, Z.; Yue, Y.; Li, D.; Maple, C.ε. Direct modification of silicon surface by nanosecond laser interference lithography. *Appl. Surf. Sci.* 282, 67–72 (2013)
- [5]. Hallquist, J. LS-DYNA Theory Manual; Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, USA, 2006.
- [6] Orphanos Y.; Dimitriou, V.; Kaselouris, E.; Bakarezos, E.; Vainos, N.; Tatarakis, M.; Papadogiannis, Integrated nanosecond laser full-field imaging for femtosecond laser-generated surface acoustic waves in metal film-glass substrate multilayer materials. *Appl. Phys. A*, 125, 269 (2019)
- [7] Liu, Z.; Lin, B.; Liang, X.; Du, A.; Ma, X. Fracture of single crystal silicon caused by nonlinear evolution of surface acoustic waves. *Eng. Fract. Mech.* 269, 108505 (2022)
- [8] Aris HPC Documentation. Available online: <http://doc.aris.grnet.gr/system/hardware/> (accessed on 26 September 2024)
- [9] Κασελοῦρης Ε. Study of matter behavior dynamics governed by the interaction with laser pulses and external strong currents. PhD Thesis (2016) <http://dx.doi.org/10.12681/eadd/39101>
- [10] Παπαδάκη. Ε. Finite element study of the dynamic behavior of Si targets in sequential irradiation by ns laser pulses. Master thesis (2021)
- [11] Dimitriou, V.; Kaselouris, E.; Orphanos, Y.; Bakarezos, M.; Vainos, N.; Tatarakis, M.; Papadogiannis, N.A. Three-dimensional transient behavior of thin films surface under pulsed laser excitation. *Appl. Phys. Lett.* 103, 114104 (2013)
- [12] Available online: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=599> (accessed on 20 September 2024).
- [13] Available online: https://encyclopediaofmath.org/wiki/Lam%25C3%25A9_constants (accessed on 26 September 2024).
- [14] Available online: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/thermal.html> (accessed on 26 August 2024).

Ευχαριστίες: Ευχαριστώ θερμά το Εθνικό Δίκτυο Υποδομών Τεχνολογίας και Έρευνας (ΕΔΥΤΕ Α.Ε) για την ευγενική παροχή υπολογιστικών πόρων μέσω του υπερυπολογιστή ARIS στο πλαίσιο του έργου pr016025 LaMPIOS III. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας



Προσεγγιστική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από απορροφητική σφήνα

Πηνελόπη Μενούνου^{1,*}, Λευτέρης Παναγόπουλος², Πέτρος Νικολάου³

¹Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών,
Πανεπιστημιούπολη Πατρών, 26504, Πάτρα.

²Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών,
Πανεπιστημιούπολη Πατρών, 26504, Πάτρα.

³Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών,
Πανεπιστημιούπολη Πατρών, 26504, Πάτρα.

[*menounou@upatras.gr](mailto:menounou@upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίθλαση των ακουστικών κυμάτων γύρω από απορροφητικές σφήνες, στο πεδίο των συχνοτήτων. Στα πλαίσια της εργασίας, προτείνονται κατάλληλες τροποποιήσεις σε μια πρόσφατα δημοσιευμένη προσεγγιστική λύση τεσσάρων όρων των συγγραφέων για ακουστικά ανακλαστικές σφήνες, έτσι ώστε η λύση να μπορεί να εφαρμοστεί για απορροφητικές σφήνες. Συγκεκριμένα, οι τέσσερις επιμέρους όροι της λύσης για ανακλαστικές σφήνες πολλαπλασιάζονται με κατάλληλους συντελεστές ανάκλασης, οι οποίοι με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη γωνιακή θέση της πηγής και του δέκτη, αλλά και από την ακουστική αγωγιμότητα του υλικού που επενδύει τη σφήνα. Η σειρά τοποθέτησης των συντελεστών ανάκλασης και οι τιμές των γωνιών πρόσπτωσης επιλέγονται έπειτα από πολλαπλές αριθμητικές συγκρίσεις μεταξύ της τροποποιημένης προσεγγιστικής λύσης και της ακριβούς λύσης των Hewett-Morris, για την ειδική περίπτωση επίπεδης προσπίπτουσας ακτινοβολίας και σφήνας εσωτερικής γωνίας 90 μοιρών. Στη συνέχεια η λύση επεκτείνεται για σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα, με κατάλληλη τροποποίηση των συντελεστών ανάκλασης. Αποτελέσματα από τη νέα λύση συγκρίθηκαν ικανοποιητικά με δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα, καθώς και με το προσεγγιστικό μοντέλο Nord2000.

ABSTRACT

In the current study, the diffraction of acoustic waves around absorbing wedges is investigated in the frequency domain. In this work, appropriate modifications to a recently published four-term approximate solution for acoustically reflective wedges (Menounou et. al. 2024) are proposed, so that the solution can be applied to absorbing wedges. The four individual terms of the solution are multiplied by appropriate reflection coefficients, which themselves depend on the angular position of the source and receiver, but also on the acoustic admittance of the material covering the faces of the wedge. The order of

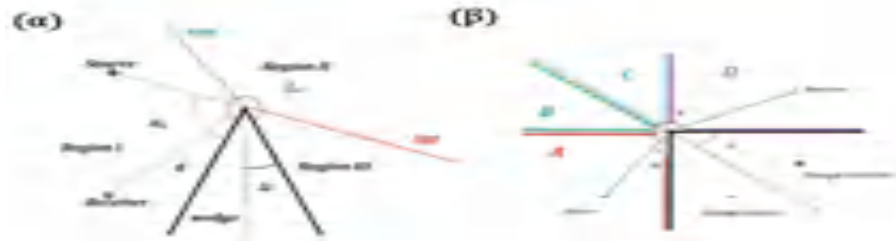
placement of the reflection coefficients and the values of the angles of incidence are selected after multiple numerical comparisons between the modified approximate solution and the exact Hewett-Morris solution, for the special case of plane incident waves and a wedge with an internal angle of 90 degrees. The solution is then extended for spherical incident waves. Results from the new solution for spherical incident waves were satisfactorily compared with published experimental data, as well as with the approximate Nord2000 model.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια συνήθης τακτική που ακολουθείται από πολλούς ερευνητές [1] αφορά την τροποποίηση λύσεων για ανακλαστικές σφήνες, ώστε να περιγράφουν το πεδίο περίθλασης γύρω από απορροφητικές σφήνες. Παρόμοιες προσεγγιστικές λύσεις, που εντάσσονται στην παραπάνω κατηγορία, έχουν δημοσιευτεί από τον Hayek [2]. Παρ' όλ' αυτά τα περισσότερα μοντέλα εξετάζουν την ειδική περίπτωση κατά την οποία η πηγή και ο δέκτης βρίσκονται εκατέρωθεν της διχοτόμου της σφήνας και πλησίον των επιφανειών της [3]. Ορισμένοι ερευνητές [4] έχουν αναπτύξει ταχύτερες λύσεις (λύσεις μακρινού πεδίου), οι οποίες στηρίζονται στη μετατροπή ακριβών λύσεων, αλλά μειονεκτούν ως προς την ακρίβειά τους για θέσεις δέκτη κοντά στα σύνορα σκιάς. Μια διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος ακολουθείται από τον Svensson [5] και αφορά την διακριτοποίηση των απορροφητικών επιφανειών της σφήνας κι έπειτα την προσομοίωση κάθε διακριτού τμήματος ως παλλόμενο έμβολο (virtual pistons). Στην παρούσα εργασία προτείνονται κατάλληλες τροποποιήσεις σε μια υπάρχουσα προσεγγιστική λύση τεσσάρων όρων για ανακλαστικές σφήνες και για επίπεδη κυματική διάδοση [6], ώστε η λύση να μπορεί να εφαρμοστεί για απορροφητικές σφήνες, αλλά και για τυχαίες γωνιακές θέσεις πηγής και δέκτη. Η νέα λύση έπειτα επεκτείνεται για τη περίπτωση σφαιρικής κυματικής διάδοσης. Ωστόσο, λόγω της ανυπαρξίας ακριβούς λύσης για το δοθέν πρόβλημα, εξετάσαμε την ακρίβεια της νέας λύσης μόνο στις περιοχές που ισχύει το προσεγγιστικό μοντέλο Nord2000.

1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 1.1 (α) απεικονίζεται ένας γωνιακός τομέας σχήματος σφήνας, όπου Ω η εσωτερική ημι-γωνία της σφήνας και β_w η εξωτερική γωνία της σφήνας. Ως θ_0, θ ορίζονται οι γωνιακές θέσεις της πηγής και του δέκτη αντίστοιχα. Το ακουστικό πεδίο γύρω από τη σφήνα σχηματίζεται από την επαλληλία του γεωμετρικού ακουστικού πεδίου (της πρόσπτωσης p_i και των ανακλάσεων p_r , από τις πλευρές της σφήνας) και του πεδίου περίθλασης p_d . Ο χώρος γύρω από τη σφήνα χωρίζεται σε 3 περιοχές (Region I, II, III). Η κάθε περιοχή περιέχει διαφορετικό αριθμό όρων γεωμετρικού πεδίου. Το πεδίο περίθλασης υπάρχει και στις 3 περιοχές. Οι περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους από τα σύνορα σκιάς SBR και SBI. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας το πεδίο χωρίζεται σε περιοχές (A,B,C,D) με σύνορα την ευθεία της διχοτόμου και τις ευθείες των όψεων τις σφήνας. Στο Σχήμα 1.1 (β) απεικονίζεται μια σφήνα εσωτερικής γωνίας 90° .



Σχήμα 1.1 (α) Γεωμετρία προβλήματος και περιοχές I, II, III. (β) Περιοχές A, B, C, D.

2. ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι συνοριακές συνθήκες Robin χρησιμοποιούνται ώστε να προσομοιάσουν όλες τις ενδιάμεσες σφήνες μεταξύ πλήρως ανακλαστικής και υπερ-μαλακής σφήνας. Πρόκεινται για γραμμικό συνδυασμό των συνοριακών συνθηκών Neumann και Dirichlet στις επιφάνειες της σφήνας και ορίζονται ως:

$$(-1) \frac{\partial p_t}{\partial \mathbf{n}} + i k \mu p_t = 0, \quad (2.1)$$

όπου k ο αριθμός κύματος και μ η ακουστική αγωγιμότητα (admittance), η οποία προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\mu = Z_{air}/Z_c, \quad (2.2)$$

όπου Z_c η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση του υλικού της επιφάνειας της σφήνας και $Z_{air} = \rho_0 c$ η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση του αέρα. Στα πλαίσια της εργασίας, θεωρούμε πως οι επιφάνειες της σφήνας επενδύονται με πορώδη ηχοαπορροφητικά υλικά, και άρα σύμφωνα με το μοντέλο δύο παραμέτρων του Miki [7] η ακουστική εμπέδηση του υλικού επένδυσης δίνεται από τη σχέση:

$$Z_c = \rho_0 c \left(1 + 5,50 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right) + i \rho_0 c \left(-8,43 \left(10^3 \frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right), \quad (2.3)$$

όπου: σ η ροϊκή αντίσταση σε μονάδες CGS και f η συχνότητα της πηγής σε Hz. Για $\mu \rightarrow \infty$ οι συνθήκες Robin περιγράφουν ακουστικά μαλακές σφήνες, ενώ για $\mu = 0$ ακουστικά σκληρές σφήνες.

3. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΛΥΣΗ ΓΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΕΣ ΣΦΗΝΕΣ

Σε πρόσφατη δημοσιευμένη λύση των συγγραφέων [6] παρουσιάστηκε αναλυτική προσεγγιστική λύση για το πεδίο περίθλασης από ανακλαστικές σφήνες, τόσο για επίπεδα όσο και για σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα. Η λύση αποτελείται από 4 επιμέρους όρους.

$$p_{d_{RIGID}}^{plane} = P_{++} + P_{+-} + P_{--} + P_{-+}, \quad (3.1)$$

$$p_{d_{RIGID}}^{sphere} = P_{++}^s + P_{+-}^s + P_{--}^s + P_{-+}^s, \quad (3.2)$$

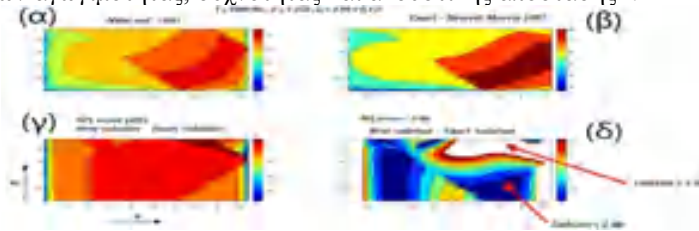
Για υπερ-μαλακές σφήνες, οι όροι P_{++} και P_{-+} πολλαπλασιάζονται με το (-1) . Στην παρούσα εργασία οι παραπάνω λύσεις τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να περιγράφουν περίθλαση από απορροφητικές σφήνες. Με βάση τη δουλειά του Jonasson [8], η λύση για απορροφητική σφήνα μπορεί να προκύψει από τη λύση για σκληρή σφήνα μετά από πολλαπλασιασμό κατάλληλων συντελεστών. Συγκεκριμένα το πεδίο περίθλασης επίπεδου κύματος γύρω από απορροφητική σφήνα δίνεται από:

$$p_{d_{ABSORPTIVE}}^{plane} = Q_{S-IR}P_{++} + Q_{IS-R}Q_{IS-R}P_{+-} + P_{--} + Q_{IS-R}P_{-+} \quad (3.3)$$

Οι ποσότητες Q_{S-IR} , Q_{IS-R} ονομάζονται συντελεστές ανάκλασης επίπεδων κυμάτων (plane wave reflection coefficients) και υπολογίζονται από τον τύπο:

$$Q_x = (\sin \varphi_x - \mu) / (\sin \varphi_x + \mu). \quad (3.4)$$

Ο υπολογισμός των Q_x γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η λύση 3.3 να παρουσιάζει το ελάχιστο δυνατό σφάλμα σε σύγκριση με την ακριβή λύση των Hewett-Morris [9] για επίπεδα κύματα. Η νέα λύση προκύπτει έπειτα από πολλαπλές δοκιμές γωνιών φ_{S-IR} και φ_{IS-R} και διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας. Τα ορίσματα φ_{S-IR} και φ_{IS-R} προσδιορίζονται ανάλογα με τη γωνιακή θέση της πηγής και του δέκτη. Έχει παρατηρηθεί ότι τα ορίσματα δεν αλλάζουν τιμές όσο η πηγή παραμένει σε μία από τις περιοχές A,B,C,D και ο δέκτης παραμένει σε μία από τις περιοχές A,B,C,D Σχήμα 1.1 (β). Στο σημείο αυτό αναζητούνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί θέσεων πηγής-δέκτη. Για το λόγο αυτό, κατασκευάζεται αγκύλη δύο θέσεων, η οποία περιλαμβάνει στη πρώτη θέση τη περιοχή που μπορεί να ανήκει η πηγή και στη δεύτερη θέση τη περιοχή που μπορεί να ανήκει ο δέκτης {Source,Receiver}. Έτσι, καταλήγουμε στους 8 συνδυασμούς: {A,A}, {A,B}, {A,C}, {A,D}, {B,A}, {B,B}, {B,C}, {B,D}. Προκειμένου η σύγκριση της νέας λύσης με την ακριβή να γίνει για όλους τους συνδυασμούς πηγής – δέκτη, επιλέξαμε την αποτύπωση των αποτελεσμάτων σε ισοϋψείς ηχητικής στάθμης SPL ως προς θ , θ_0 το οποίο ονομάζεται διάγραμμα πολικότητας (βλ. [10]). Τόσο τα SPL των δύο μεθόδων (Σχήμα 3.1 (α), Σχήμα 3.1 (β)), όσο και η μεταξύ τους διαφορά (Σχήμα 3.1 (γ)) αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα πολικότητας. Επιπλέον, θεωρήσαμε χρήσιμο να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα πολικότητας των διαφορών για διαφορές μικρότερες των 3^{ov} dB, αφού καθίστανται πιο ευδιάκριτες οι ζώνες συρρίκνωσης των διαφορών (Σχήμα 3.1 (δ)). Τα διαγράμματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1 κατασκευάζονται για πληθώρα τιμών αγωγιμότητας, συχνότητας και ακουστικής απόστασης kr .



Σχήμα 3.1 Διαγράμματα πολικότητας: (α) νέας λύσης, (β) ακριβούς λύσης, (γ) διαφορών, (δ) διαφορών, για διαφορές μικρότερες από 3 dB.

Στον Πίνακα 3.1 προτείνονται οι τιμές των γωνιών $\varphi_{S-IR}, \varphi_{IS-R}$, συναρτήσεων των προαναφερθέντων συνδυασμών, οι οποίες δίνουν την ελάχιστη διαφορά.

Για τη περίπτωση σφαιρικής ακτινοβολίας, οι συντελεστές ανάκλασης δίνονται από τη σχέση:

$$Q_x^{spherical} = Q_x + (1 - Q_x)F_{blf}(w_x), \quad (3.5)$$

όπου: w_x η αριθμητική απόσταση (numerical distance) και F_{blf} η δίκλαδη συνάρτηση απώλειας συνόρων (Boundary loss function) (βλ.[11]). Στο μονοπάτι περίθλασης $IS - R$, για τον υπολογισμό της αριθμητικής απόστασης εισάγουμε την ακτίνα της πηγής r_0 , ενώ στο μονοπάτι $S - IR$ την απόσταση r .

Πίνακας 3.1 Γωνίες $\varphi_{S-IR}, \varphi_{IS-R}$ συναρτήσεων συνδυασμών θέσεων πηγής-δέκτη.

Συνδυασμοί	$\{A, A\}$	$\{A, B\}$	$\{A, C\}$	$\{A, D\}$	$\{B, A\}$	$\{B, B\}$	$\{B, C\}$	$\{B, D\}$
φ_{S-IR}	θ	$\pi/2$	$\pi/2$	$\beta_w - \theta$	θ	$\pi/2$	$\pi/2$	$\beta_w - \theta$
φ_{IS-R}	θ_0	θ_0	θ_0	θ_0	θ_0	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$

Σε αντίθεση με τη λύση που προτείνει ο Jonasson [8], η προτεινόμενη λύση λαμβάνει υπόψη όλους τους συνδυασμούς πηγής δέκτη και οι συντελεστές ανάκλασης προκύπτουν μέσα από συγκρίσεις με την ακριβή λύση.

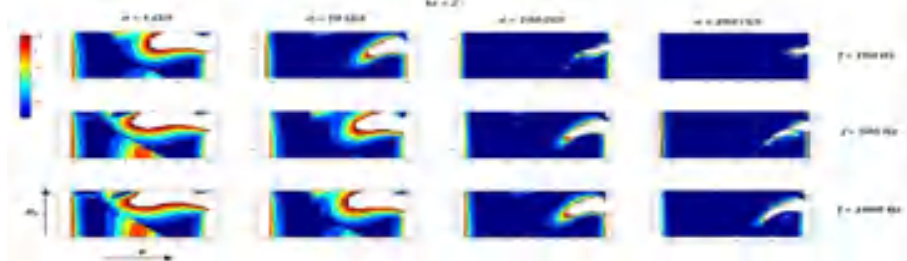
4. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΝΕΑΣ ΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΟΥΣ ΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ $\Omega = \pi/4$ rad

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι τιμές σφάλματων μεταξύ της νέας και της ακριβούς λύσης, για σφάλμα μικρότερο από 3 dB, ακουστική απόσταση (kr) ίση με 2 και δώδεκα διαφορετικές τιμές αγωγιμότητας, που προκύπτουν από τους συνδυασμούς $f = [100, 500, 1000]$ Hz και $\sigma = [1, 10, 100, 300]$ CGS. Από τα διαγράμματα των διαφορών SPL φαίνεται πως η περιοχή (θ, θ_0) των διαφορών πάνω από 3 dB διευρύνεται όταν αυξάνεται ο λόγος f/σ ($Re(\mu) \sim 1$ και $Im(\mu) \sim 0$).

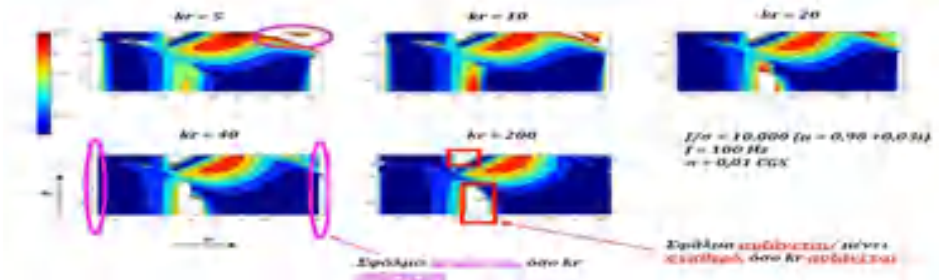
Σε όλες τις περιπτώσεις, οι διαφορές υπερβαίνουν τη τιμή των 3ων dB, όταν ο δέκτης απέχει $7,3^\circ$ από τις επιφάνειες της σφήνας. Επιπλέον, εμφανίζονται υψηλές διαφορές για τους συνδυασμούς: $\{B, C\}, \{B, D\}$. Αξίζει να σημειωθεί πως για μειούμενο λόγο f/σ οι περιοχές διαφορών υψηλότερων από 3 dB απομακρύνονται από τη περιοχή $\{B, C\}$ και παρατηρούνται μόνο στη περιοχή $\{B, D\}$. Επιπλέον, παρατηρούμε πως για τις περιπτώσεις: $f = 100$ (Hz), $\sigma = 0,1$ (CGS) και $f = 1000$ (Hz), $\sigma = 0,1$ (CGS) τα αντίστοιχα διαγράμματα των διαφορών αποκτούν πανομοιότυπες τιμές, στις ίδιες περιοχές (θ, θ_0). Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται και ανάμεσα στις περιπτώσεις $f = 100$ (Hz), $\sigma = 1$ (CGS) και $f = 1000$ (Hz), $\sigma = 10$ (CGS). Εκτεταμένος αριθμητικός έλεγχος επιβεβαιώνει πως σταθερός λόγος f/σ συνεπάγεται την εμφάνιση διαφορών στις ίδιες περιοχές (θ, θ_0) και με τις ίδιες τιμές.

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν για μια χαμηλή τιμή ακουστικής απόστασης kr ($kr = 2$). Για τον λόγο αυτό, εξετάζονται και υψηλότερες τιμές kr ($kr = [5, 10, 20, 40, 200]$) και κατασκευάζονται τα διαγράμματα των διαφορών (Σχήμα 4.2) για

τη περίπτωση $f = 100 \text{ (Hz)}$ και $\sigma = 0,01 \text{ (CGS)}$, όπου το πραγματικό τμήμα της αγωγιμότητας πλησιάζει τη μονάδα. Από το Σχήμα 4.3 διαφαίνεται πως οι περιοχές διαφορών μειώνονται για τις περιπτώσεις $\{B, C\}$ και $\{B, D\}$ όταν το γινόμενο kr αυξάνεται. Ακόμη, όσο αυξάνεται το γινόμενο kr , παρατηρείται πως οι δύο μέθοδοι εμφανίζουν διαφορές μικρότερες από 3 dB πλησιέστερα των επιφανειών της σφήνας. Για πολύ υψηλές τιμές kr (π.χ. $kr = 200$), δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές κοντά στις επιφάνειες της σφήνας. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούνται σταθερές διαφορές στο τμήμα $\theta \in (94^\circ, 108^\circ) \cap \theta_0 \in (121^\circ, 135^\circ)$. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εμφάνιση διαφορών στη περιοχή: $\theta \in (108^\circ, 121^\circ) \cap \theta_0 \in (0.5^\circ, 69.5^\circ)$, καθώς αυτές εμφανίζονται για αυξανόμενη ακουστική απόσταση.



Σχήμα 4.1 Διαγράμματα πολικότητας διαφορών για διαφορές μικρότερες από 3 dB. $kr = 2, f = [100, 500, 1000] \text{ Hz}$, $\sigma = [1, 10, 100, 300] \text{ CGS}$.

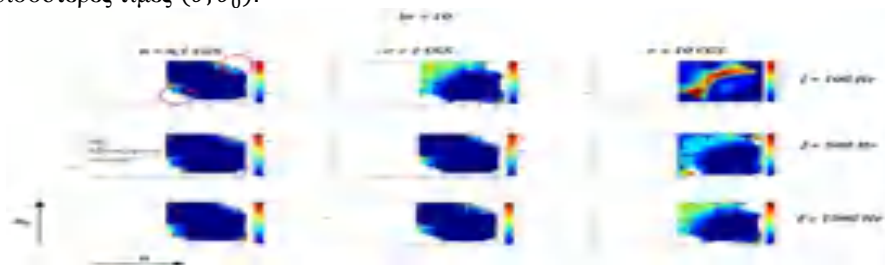


Σχήμα 2.2 Διαγράμματα πολικότητας διαφορών για διαφορές μικρότερες από 3 dB. $kr = [5, 10, 20, 40, 200]$, $f = 100 \text{ Hz}$, $\sigma = 0,01 \text{ CGS}$, $\mu = 0,98 + 0,03i$.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΝΕΑΣ ΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ NORD2000 (ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ)

Στο παρόν κεφάλαιο γίνονται συγκρίσεις μεταξύ της προτεινόμενης λύσης και του μοντέλου Nord2000 [3]. Το μοντέλο Nord2000 πρόκειται για μια προσεγγιστική λύση για το πρόβλημα της περίθλασης του ήχου, γύρω από απορροφητική σφήνα και για πρόσπτωση σφαιρικών κυμάτων. Ισχύει υπό τη παραδοχή πως η πηγή και ο δέκτης βρίσκονται εκατέρωθεν της εξωτερικής διχοτόμου της σφήνας. Συνεπώς για τις συγκρίσεις κατασκευάζουμε τα διαγράμματα πολικότητας των διαφορών SPL των δύο λύσεων μόνο για τους συνδυασμούς: $\{A, C\}$, $\{A, D\}$, $\{B, C\}$, $\{B, D\}$. Για απορροφητική σφήνα εσωτερικής γωνίας 90 μοιρών, $kr = 10$ και 9 διαφορετικές τιμές ακουστικής

αγωγιμότητας, τα αποτελέσματα των συγκρίσεων μεταξύ της νέας λύσης και του μοντέλου Nord2000 απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1. Παρατηρούμε πως η διαφορά των δύο μεθόδων υπερβαίνει τη τιμή των 3^{ov} dB, το πολύ στις περιοχές που οριοθετούνται από τα μωβ πλαίσια, για υψηλό λόγο f/σ αλλά και για γωνιακές θέσεις πηγής ή δέκτη μικρότερες των 4.5 μοιρών. Οι περιοχές αυτές συρρικνώνονται σταδιακά, όσο μειώνεται ο λόγος f/σ και το πραγματικό τμήμα της αγωγιμότητας πλησιάζει το μηδέν. Όμοια με τις συγκρίσεις για επίπεδα κύματα, η διαφορά μειώνεται για αυξανόμενη ακουστική απόσταση. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων για οξείες σφήνες δεν υπερέρβη τα 3 dB για τα περισσότερα εξεταζόμενες περιοχές (θ, θ_0) , παρά μόνο για θέσεις πηγής ή δέκτη μικρότερες των 4.5 μοιρών. Για αμβλείες σφήνες, το σφάλμα εμφανίζεται και σε περισσότερες τιμές (θ, θ_0) .

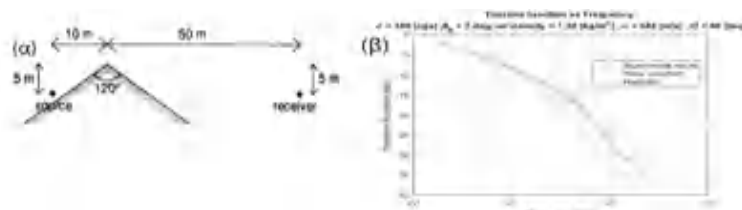


Σχήμα 3.1 Διαγράμματα πολικότητας διαφορών, για διαφορές μικρότερες από 3 dB. $kr = 10$, $f = [100, 500, 1000]$ Hz, $\sigma = [0.1, 1, 10]$ CGS, $\Omega = 90^\circ$.

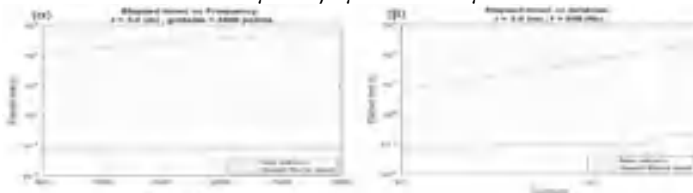
6. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΕΛΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΣ ΔΙΕΚΠΕΡΑΙΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο συγκρίνεται η προτεινόμενη λύση, για σφαιρική ακτινοβολία και $\Omega = 60^\circ$, με τα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα του Koers [1]. Στο Σχήμα 6.1 (α) απεικονίζεται η γεωμετρία της πειραματικής διάταξης και στο Σχήμα 6.1 (β) αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης λύσης σε κοινό διάγραμμα με τις πειραματικές μετρήσεις. Ο Koers έλαβε μετρήσεις του ακουστικού πεδίου περίθλασης, για φάσμα συχνοτήτων τρίτο-οκτάβας (third-octave band spectra), από 16 έως 4000 Hz. Από το Σχήμα 6.1 (β) καθίσταται σαφές πως η νέα λύση, για την περίπτωση σφαιρικής κυματικής διάδοσης και $\Omega = 60^\circ$ προσεγγίζει με υψηλή ακρίβεια τις πειραματικές μετρήσεις. Από τα αποτελέσματα των συγκρίσεων, αποκτούμε ενδείξεις πως η νέα προσεγγιστική λύση μπορεί να γενικευτεί για γωνίες $\Omega \neq 45^\circ$ και για σφαιρική κυματική διάδοση, τουλάχιστον στη περίπτωση που η πηγή βρίσκεται στη περιοχή A και ο δέκτης στη περιοχή D.

Εκτός από την ακρίβεια που προσφέρει, η νέα λύση είναι και υπολογιστικά καλύτερη σε σχέση με την ακριβή. Από το Σχήμα 6.2 (α) παρατηρούμε πως η νέα λύση για επίπεδα κύματα είναι 100 φορές ταχύτερη από την ακριβή λύση. Ακόμη, δεν εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής. Από το Σχήμα 6.2 (β) γίνεται εμφανές πως ο χρόνος διεκπεραίωσης της νέας λύσης αυξάνεται με πολύ μικρότερο ρυθμό σε σχέση με το χρόνο διεκπεραίωσης της ακριβούς λύσης, όσο αυξάνονται τα εξεταζόμενα σημεία του πλέγματος.



Σχήμα 4.1 (α) Γεωμετρία πειραματικής διάταξης. (β) Σύγκριση νέας λύσης και μοντέλου Nord2000 με πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 6.2 (α) Χρόνος διεκπεραίωσης vs συχνότητα πηγής. (β) Χρόνος διεκπεραίωσης vs μέγεθος πλέγματος.

7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] E. Salomons, «Sound Propagation in Complex Outdoor Situations with a Non-Refracting Atmosphere» *Acta Acustica* **83** pp 436-454 (1997)
- [2] S. Hayek, «Mathematical modeling of absorbent highway noise barriers», *App. Ac.* **31** pp 77-100 (1990)
- [3] B. Plovsing, J. Kragh, Nord2000, «Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model», *Delta Acoustics & Vibration Report AV1849/00* (2006)
- [4] B. Lim, «Effect of absorptive surfaces on the sound diffraction by a right-angle wedge», *J. Acoust. Soc. Jpn (E)* **8**, 5 (1987)
- [5] P. Svensson, «Diffraction modeling for scattering objects with non-rigid surfaces» in *10th Convention of the European Acoustics Association*, σελίδες 103-106 (2023)
- [6] P. Menounou, «Βελτιωμένες ημι-εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηχομείωσης πίσω από ακουστικά σκληρή σφήνα» in *11^ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Ακουστική 2022»*, σελίδες 472-479 (2022)
- [7] Yasushi Miki, «Acoustical properties of porous materials – Modifications of Delany Bazley models», *J. Acoust. Soc. Jpn (E)* **11**, 1 (1990)
- [8] H. G. Jonasson, «Diffraction by wedges of finite acoustic impedance with applications to depressed roads», *J. Sounds Vib.* **25** (4), pp 577-585 (1972)
- [9] D. Hewett, «Diffraction by a right-angled impedance wedge: An edge source formulation», *J. Acoust. Soc. Am.*, **137** (2), pp 633-639 (2015)
- [10] P. Menounou, «Polarity of the diffracted signal around a rigid wedge» in *11^ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Ακουστική 2022»*, σελίδες 456-463 (2022)
- [11] C. I. Chessell, «Propagation of noise along a finite impedance boundary», *J. Acoust. Soc. Am.*, **62** (4), pp 826-854 (1977)



New analytical solution for the calculation of the acoustic diffraction field around a rigid edge in time and frequency domain

Petros Nikolaou¹, Anastasia Marketou², Sotirios Salagas¹, Penelope Menounou¹

¹Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, University of Patras Campus, 26504, Patras, Greece.

²Department of Flow Physics and Technology, Aerospace Engineering, TU Delft, Mekelweg 5, 2628 CD Delft, Netherlands.

ABSTRACT

Analytical approximate solutions for the diffraction by a rigid wedge are derived in both frequency and time domain. The analysis starts with the exact solution in time domain. A new type of plot is presented which helps to understand how diffraction evolves around the boundaries of geometrical acoustics discontinuity. Analytical approximate solution for all types of incident radiation are presented as short time asymptotics of the exact solutions in time domain. The three solutions are presented in a unified form. Finally, using the Fourier transform approximate solutions are obtained in the frequency domain in a unified form for all types of incident radiation.

Νέα αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από ακουστικά σκληρή σφήνα στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αναλυτικές προσεγγιστικές λύσεις για την περίθλαση από μία ακουστικά σκληρή σφήνα προτείνονται τόσο στο πεδίο των συχνοτήτων όσο και στο πεδίο του χρόνου. Η ανάλυση ξεκινά με την ακριβή λύση στο πεδίο του χρόνου. Παρουσιάζεται ένας νέος τύπος γραφήματος που βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η περίθλαση εξελίσσεται γύρω σύνορα της ασυνέχειας του γεωμετρικού ακουστικού πεδίου. Αναλυτικές προσεγγιστικές λύσεις για όλους τους τύπους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρουσιάζονται ως ασυμπτωτικές μικρών χρόνων των ακριβών λύσεων στο πεδίο του χρόνου. Οι τρεις λύσεις παρουσιάζονται σε μια ενιαία μορφή. Τέλος, χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fourier, προσεγγιστικές λύσεις λαμβάνονται στο πεδίο των συχνοτήτων σε μια ενιαία μορφή για όλους τους τύπους προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Introduction

Mathematical solutions for the diffraction field around a wedge appeared more than a century ago. The reader is referred to the work of ref. [1] for a review of rigorous solutions. Many analytical approximate solutions appeared over time as asymptotics of rigorous formulas in both time and frequency domain. Detail presentation of the analytical approximate solutions can be found in the introduction sections of ref [2] (for time domain) and ref [3] (for frequency domain). The benefit of the approximate solutions is that they are easier to calculate compared to the rigorous solutions and they also can provide benefits in physical interpretation of the diffraction phenomenon.

In this paper new analytical approximate solutions for the diffraction of a spherical wave by a rigid wedge are presented in both time and frequency domain. The study starts with a review of the exact solution in time domain. A new type of diffraction field plot is introduced, which aims to contribute to the understanding of diffraction formulation. A solution is initially derived as short time asymptotic of the exact solution in time domain. An approximate solution in frequency domain is then obtained using the Fourier transform. Finally, approximate solutions for cylindrical and plane waves are presented and the solution is reformulated into a unified form for all types of incident radiation.

1. Exact Solution in time domain

The studied solution was derived in a previous work of the authors' [2] as an approximation of the Biot-Tolstoy exact solution valid for short times. In the following we present the formulations of the Biot-Tolstoy the authors' approximate formula in the form of impulse responses.

The Biot-Tolstoy formula is given by:

$$p_{exact} = \sum_{j=1}^4 p_{exact}^j = \sum_{j=1}^4 -\frac{c}{2\gamma\pi} \frac{1}{r_s r_R} \frac{1}{\sinh(\zeta)} \frac{\sin(b_j)}{\cosh\left(\frac{\zeta}{\gamma}\right) - \cos(b_j)},$$

$$\zeta = \cosh^{-1}(F), \quad F = \frac{c^2 t^2 - r_s^2 - r_R^2 - (z_R - z_s)^2}{2rr_0} \quad (1.1)$$

$$b_j = \pm \frac{\theta_R}{\gamma} \pm \frac{\theta_s}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma}, \quad \gamma\pi = 2\pi - 2\Omega$$

where c is the speed of sound (θ_s, r_s, z_s) and (θ_R, r_R, z_R) are the source and receiver coordinates on a cylindrical frame of reference that has the edge of the wedge (z -axis) as symmetry axis z . The diffraction signal arrives to the receiver at time $t=L/c$, where L is the least diffraction path $L = \sqrt{(r_s + r_R)^2 + (z_s - z_R)^2}$. A detailed presentation of the wedge geometry is shown in Fig. 1 of ref [2]. The terms F and ζ are functions of time t and distances r_s, z_s, r_R, z_R , while the terms b_j are functions of the source, receiver and wedge angles $\theta_R, \theta_s, \Omega$. The solution is

summation of 4 similar terms that only have different terms b_j . In the present paper, b_j terms are defined as

$$\begin{aligned} b_1 &= -\frac{\theta_R}{\gamma} + \frac{\theta_S}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma}, b_2 = \frac{\theta_R}{\gamma} + \frac{\theta_S}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma}, \\ b_3 &= -\frac{\theta_R}{\gamma} - \frac{\theta_S}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma}, b_4 = \frac{\theta_R}{\gamma} - \frac{\theta_S}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma} \end{aligned} \quad (1.2)$$

. As it will be shown in the following b_j are important parameters for the diffraction problem and henceforth they will be called *diffraction angles*.

The unit step response of the Biot -Tolstoy can be calculated as,

$$p_{exact}^{us} = \sum_{j=1}^4 p_{exact}^{us,j} = \sum_{j=1}^4 \int_{L/c}^t p_{exact}^j dt, \quad (1.3)$$

Despite the singularity of the impulse response, it can be proven that the unit step response is not singular. Specifically, one can express p_{exact}^j as,

$$\begin{aligned} p_{exact}^j &= \frac{-\text{sign}(\sin b_j)}{c\pi t} \frac{\partial M_j}{\partial t}, \\ M_j &= \arctan \left[\frac{\tanh\left(\frac{1}{2\gamma} \text{arccosh}(F)\right)}{d_j} \right], d_j = \sqrt{\frac{1 - \cos b_j}{1 + \cos b_j}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

then the Hölder inequality yields:

$$|p_{exact}^{us,j}| = \left| \int_{L/c}^t p_{exact}^j dt \right| \leq \int_{L/c}^t |p_{exact}^j| dt \leq \left\| \frac{1}{c\pi t} \right\|_{\infty} \cdot \left\| \frac{\partial M_j}{\partial t} \right\|_1 = \frac{|M_j|}{\pi L} \quad (1.5),$$

where $\left\| \frac{1}{c\pi t} \right\|_{\infty} = \text{ess sup} \left(\frac{1}{c\pi t} \right) = \max \left(\frac{1}{c\pi t} \right) = \frac{1}{c\pi L/c} = \frac{1}{\pi L}$ ('ess sup' is the essential supremum) and $\left\| \frac{\partial M_j}{\partial t} \right\|_1 = \int_{L/c}^t \left| \frac{\partial M_j}{\partial t} \right| dt = |M_j|$ the first norm of $\left| \frac{\partial M_j}{\partial t} \right|$.

Thus, it is proven that $p_{exact}^{us,j}$ is bounded.

2. Diffraction Signal new type of plots

The exact unit step response can be found by Eq. (1.3) with no singularities using a numerical quadrature technique. The authors have used the 'quadgk' command of MATLAB which is based on adaptive Gauss-Kronrod quadrature.

The diffraction signal depends primarily on the angle parameters $\theta_R, \theta_S, \Omega$. The shadow boundaries divide the diffraction field in regions that contain different number of geometrical acoustics contributions (incidence or reflections). For an open wedge the two shadow boundaries are the shadow boundary of incidence and the shadow boundary of reflection from the face of the wedge facing the source or the shadow boundaries of the reflections from both wedge faces. For closed wedges

the signal might be subject to multiple reflections before reaching the receiver. Starting from one face of the edge multiple reflections occur between the faces. The phenomenon stops when the last reflection does not illuminate the opposing edge, thus creating a shadow boundary. The same process is repeated starting from the other face of the wedge to determine the other shadow boundary. This last reflection is called *exiting reflection*. For closed wedges, the shadow boundary is the plane determined by the image source of the exiting reflection (named *exiting image source*) and the edge line. For open it is the plane determined by the image source of the sources of reflection or the actual source and the edge line. The magnitude of the exiting reflections, or first reflections, or incident signal is represented by $1/R_l$, where R_l is the distance of the receiver and the corresponding image source or source. The angular locations of the shadow boundaries θ_{b1}, θ_{b2} and of the image source $\theta_{is1}, \theta_{is2}$ differ by π . The shadow boundary angular locations can be found by:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{b1}}{\gamma} &= s_1 \frac{\pi + \theta_s}{\gamma}, \quad s_1 = \text{sign} \left[\sin \left(\frac{\pi + \theta_s}{\gamma} \right) \right] \\ \frac{\theta_{b2}}{\gamma} &= s_2 \frac{\pi - \theta_s}{\gamma}, \quad s_2 = \text{sign} \left[\sin \left(\frac{\pi - \theta_s}{\gamma} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

and thus,

$$\begin{aligned} \theta_{is1} &= \theta_{b1} + \pi \\ \theta_{is2} &= \theta_{b2} + \pi \end{aligned} \quad (2.2)$$

Based on the sign parameters s_1, s_2 Eq. (1.2) can be reformulated as,

$$\begin{aligned} b_1 &= -\frac{\theta_R}{\gamma} + s_1 \frac{\theta_{b1}}{\gamma}, \quad b_2 = \frac{\theta_R}{\gamma} + s_1 \frac{\theta_{b1}}{\gamma}, \\ b_3 &= -\frac{\theta_R}{\gamma} + s_2 \frac{\theta_{b2}}{\gamma}, \quad b_4 = \frac{\theta_R}{\gamma} + s_2 \frac{\theta_{b2}}{\gamma} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Equation (2.3) allows us to interpret the terms b_j as normalized distances between θ_R or $-\theta_R$ from the shadow boundary locations θ_{b1} and θ_{b2} . Specifically, it can be proven that:

$$\begin{aligned} \text{for } s_1 = '+', \quad & \begin{cases} |p_{exact}^{us,1}| = |p_{exact}^{us,1}|_{\max} = \frac{1}{2R_l} & \text{at } b_1 = 0 \Leftrightarrow \theta_R = \theta_{b1} \\ |p_{exact}^{us,2}| = |p_{exact}^{us,2}|_{\max} & \text{at } |b_2|_{\min}, b_2 \neq 0 \end{cases} \\ \text{for } s_1 = '-', \quad & \begin{cases} |p_{exact}^{us,1}| = |p_{exact}^{us,1}|_{\max} & \text{at } |b_1|_{\min}, b_1 \neq 0 \\ |p_{exact}^{us,2}| = |p_{exact}^{us,2}|_{\max} = \frac{1}{2R_l} & \text{at } b_2 = 0 \Leftrightarrow \theta_R = \theta_{b1} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Same holds for s_2 and the parameters b_3, b_4 . From the two factors $p_{exact}^{us,1}$ and $p_{exact}^{us,2}$ associated with the shadow boundary BI only one handles the discontinuity of the geometrical acoustic signal at the shadow boundary. For example, for $s_1 = '+'$ only

b_1 becomes zero in $0 \leq \theta_R \leq \gamma\pi$ and thus only $|p_{exact}^{us,1}|$ becomes half of the geometrical acoustic field $1/R_1$, $|p_{exact}^{us,1}|$ then decreases until it reaches a minimum at $\theta_R = \theta_{b1} + \pi$. Consider now a Riemann space defined as $-\gamma\pi \leq \theta_R \leq 0$. Then consider Eq. (1.3) in the union of physical and Riemann spaces $-\gamma\pi \leq \theta_R \leq \gamma\pi$. For $s_1 = '+'$, it is $b_2 = 0$ and it is $|p_{exact}^{us,2}|$ that becomes half of the geometrical acoustic field $1/R_1$ at $\theta_R = -\theta_{b1}$. $|p_{exact}^{us,2}|$ then decreases until it reaches a minimum at $\theta_R = -\theta_{b1} + \pi$. The locations $\theta_R = -\theta_{b1}$ and $\theta_R = -\theta_{b2}$ are considered angular locations of shadow boundaries of an imaginary source-wedge-receiver in Riemann space. In short, these shadow boundaries are called *Riemann Boundaries*. In conclusion, we can define the diffraction angles b_j as normalized distances of the receiver from the shadow boundaries or the Riemann boundaries.

The diffraction angles are significant parameters of the diffraction study. In the present paper we propose a way to visualize the diffraction signal as it changes with the angles $\theta_R, \theta_S, \Omega$. A figure of $p_{exact}^{us,j}$ contours vs b_j and Ω can be created representing all terms b_j ($j=1,2,3,4$) and $p_{exact}^{us,j}$. This figure is named *diffraction map* because for a given set of $\theta_R, \theta_S, \Omega$ each value of $p_{exact}^{us,1}, p_{exact}^{us,2}, p_{exact}^{us,3}, p_{exact}^{us,4}$, can be found on the graph at the locations $(b_1, \Omega), (b_2, \Omega), (b_3, \Omega), (b_4, \Omega)$, respectively [see Figure 2.1(a)]. Furthermore, each pair of angles (b_j, Ω) can be visualized in a polar plot see Figure 2.1(b). Each polar plot resembles a clock with two hands, one indicating the wedge half angle, the *wedge angle hand*, and another indicating the angle b_j , the *diffraction angle hand*.

The diffraction signal becomes maximum at $b_j = 0$, which corresponds to the location of a shadow boundary and minimum at the location of the corresponding image source $b_j = \pi$ or $-\pi$.

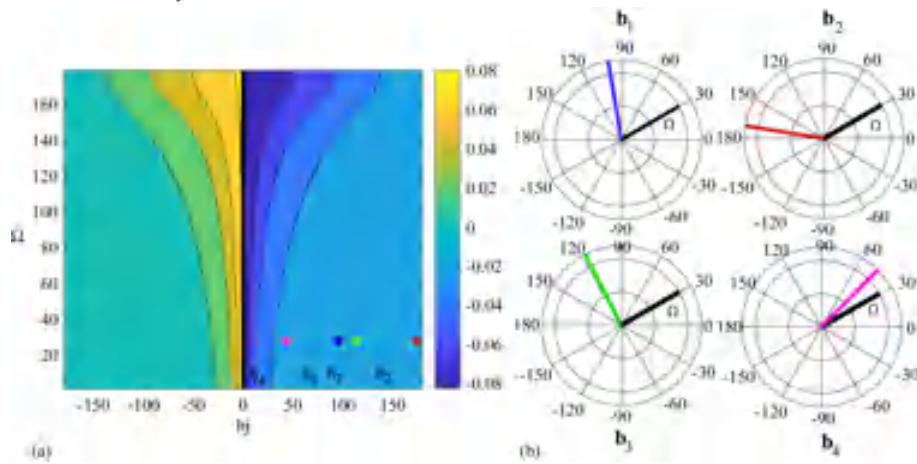


Figure 2.1 a) contours of p_{exact}^j versus (b_j, Ω) ; (b) an example of (b_j, Ω) for the 4 terms of p_{exact}^j .

3. Analytical approximate time domain solution

The authors' approximate impulse response comes derives from the Biot-Tolstoy for short times. Specifically, for $\zeta \ll 1$, $\zeta / \gamma \ll 1$ the Biot-Tolstoy formula is approximated by,

$$p_{irf} = \sum_{j=1}^4 p_{irf}^j = \sum_{j=1}^4 -\frac{1}{4\gamma\pi} \sqrt{\frac{2c}{r_R r_S L}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \frac{h \sin(b_j)}{\tau + h[1 - \cos(b_j)]}, \quad (3.1)$$

where L is the length of the least diffraction path, h a distance parameter with, $h = \gamma^2 r_R r_S / cL$, and τ the time that starts counting the time when diffraction is first pereceived by the receiver (L/c). It is $\tau = t - L/c$. τ is called diffraction time.

As opposed to the Biot-Tolstoy the unit step response for our proposed solution can be found analytically. The proposed approximate unit step response is:

$$p_{appr}^{us} = \sum_{j=1}^4 p_{appr}^{us,j} = \sum_{j=1}^4 -\frac{1}{4\gamma\pi} \sqrt{\frac{2c}{r_R r_S L}} h \sin(b_j) \frac{2}{\sqrt{\tau_{lag}^j}} \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}^j}}\right), \quad (3.2)$$

where $\tau_{lag}^j = h[1 - \cos(b_j)]$ a time parameter. Similar to b_j , τ_{lag}^j expresses the proximity of the receiver to the shadow boundary as described by Eq. (2.4). τ_{lag}^j , however also expresses the proximity of the receiver and the source to the edge and also becomes smaller as the wedge angle decreases.

Figure 3.1 shows contours of the exact unit step calculation and of Eq. (1.3) at several diffraction times τ . Good agreement between the two solutions is observed for the two shorter times, while differences between the two solutions appear for two larger times. Numerical experimentation has shown that the proposed approximate solution yields less than 5% error ($error = 100 |p_{appr}^{us} - p_{exact}^{us}| / |p_{exact}^{us}|$) for $\tau \leq 0.02 \cdot \pi r_S r_R / L \cdot c$ and $\Omega \leq 160$.

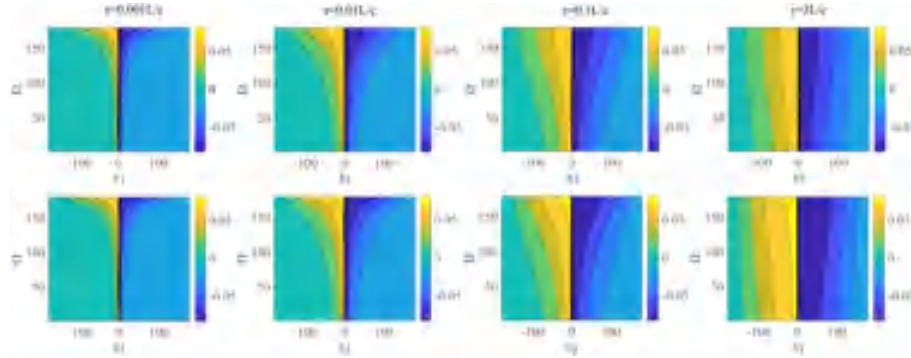


Figure 3.1. (first row) contours of $p_{exact}^{us,j}$ versus (b_j, Ω) ; (second row) contours of $p_{appr}^{us,j}$ versus (b_j, Ω) for several times.

As opposed to another approximate solution derived previously by the authors, the approximate solution presented in this paper has an extended region of validity. Furthermore, the proposed solution has the same time dependence namely $(1/\sqrt{\tau})[1/(\tau + \tau_{lag}^j)]$ as the previously derived solution. As a result, the proposed solution retains the benefits of the solution in ref.. Those are: i) The impulse response is integrable and the primitive functions of the impulse response can be found analytically. The primitive functions can be used to compute analytically the convolution integral that describe the diffraction response caused by an arbitrary signal (see ref). Furthermore, the second primitive function can be used to accelerate the numerical calculation of the convolution integral by orders of magnitude. (see also ref.). ii) It can be proven that the impulse response of a source-wedge-receiver configuration is equal to the impulse response of another source-edge-receiver configuration on a half-plane. In other words, all source-wedge-receiver problems can be solved simply by solving an equivalent and simpler half-plane problem. This property is named *mapping property*. iii) A normalized time can be defined in which the impulse response or primitive function for all source-wedge-receiver configurations can be represented by a single curve. The normalized time is called *diffraction number* and the curve *generator curve*. iv) The analytical Fourier transform of the impulse response can be found leading to an approximate diffraction solution in frequency domain.

4. Analytical approximate frequency domain solution

The Fourier transform of the impulse response of Eq. (3.1) yields:

$$P_d = \sum_{j=1}^4 P_d^j = \sum_{j=1}^4 -i \frac{1}{L} e^{i(kL - \frac{\pi}{4}) - i\omega\tau_{lag}^j} \frac{\sin(b_j)}{2\sqrt{1 - \cos(b_j)}} \left[\frac{1-i}{2} + iF\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \omega\tau_{lag}^j\right) \right], \quad (4.1)$$

where ω is the angular frequency of the source. Good agreement has been observed as frequency increases. Specifically, numerical experimentation has shown that relative error for the magnitude of the two solutions remains under 5% for frequencies $f \leq \pi r_s r_R / Lc$ and wedge angle $\Omega \leq 155^\circ$. Also note, that Eq. (4.1) has similar form to another solution presented by the authors in ref. [3]. As a result Eq. (4.1) can also be used to handle diffraction by directional sources (see ref. [3] for details).

5. Unified form for all types of incident signals

Approximate solutions for wedge diffraction in time domain and frequency domain are presented in a unified form for all types of incident radiation. The approximate solutions are derived for plane and cylindrical incidence using the methodology presented in ref. [2] for the spherical incidence.

In time domain the solutions are:

$$P_d = \sum_{j=1}^4 P_d^j = \sum_{j=1}^4 -i P_{amp} P_{spr} * D^j, P_{amp} = \begin{cases} -c / 2\gamma\pi r_R r_S & \text{sph} \\ \frac{-c}{\gamma\pi^2 r_R} \sqrt{\frac{c}{r_S}} \frac{H_0^{(1)}(t-r_S/c)}{\sqrt{t^2 - r_S^2/c^2}} & \text{cyl} \\ -c / 2\gamma\pi r_R & \text{pl} \end{cases}$$

$$P_{spr} = \begin{cases} \frac{\sqrt{r_R}}{\sqrt{2c}\sqrt{\tau}}, \text{ pl} \\ \frac{\sqrt{r_S r_R} H(t-r_R/c) \sqrt{t-r_S/c}}{c\sqrt{(\tau+r_S/c)(r_S/c+2L/c)}}, \text{ cyl} \\ \frac{\sqrt{r_S r_R}}{\sqrt{\tau}\sqrt{2cL}}, \text{ sph} \end{cases}, D^j = \begin{cases} \frac{\sin(b_j)}{1 + \frac{c}{r_R} \frac{\tau}{\gamma^2} - \cos(b_j)}, \text{ pl} \\ \frac{\sin(b_j)}{1 + \frac{c^2 [\tau + r_S/c][r_S/c + 3L/c]}{2r_R r_S \gamma^2} - \cos(b_j)}, \text{ cyl} \\ \frac{\sin(b_j)}{1 + \frac{\tau c L}{\gamma^2 r_S r_R} - \cos(b_j)}, \text{ sph} \end{cases}, (5.1)$$

where (*) denotes convolution only for the case of cylindrical radiation. In the two other cases (*) reduces to simple multiplication. The Fourier transform of Eq.(5.1) yields the following frequency domain approximate solutions:

$$P_d = \sum_{j=1}^4 P_d^j = \sum_{j=1}^4 -i P_{amp} P_{spr} D^j \Psi^j, P_{amp} = \begin{cases} 1/L & = P_{amp, sph} & \text{sph.} \\ H_0^{(1)}(kr_S) & = P_{amp, cyl} & \text{cyl.} \\ 1 & = P_{amp, pl} & \text{pl.} \end{cases}$$

$$P_{spr} = \begin{cases} e^{i(kL - \frac{\pi}{4})} & \text{sph.} \\ \sqrt{\frac{r_S}{L}} e^{i(kr_R - \frac{\pi}{4})} & \text{cyl.}, L = \begin{cases} \sqrt{(r_R + r_S)^2 + (z_R - z_S)^2} & = L_{sph} & \text{sph.} \\ r_R + r_S & = L_{cyl} & \text{cyl.} \\ r & = L_{pl} & \text{pl.} \end{cases} \\ e^{i(kr_R - \frac{\pi}{4})} & \text{pl.} \end{cases} (5.2)$$

$$D^j = \frac{\sin(b_j)}{2\sqrt{1 - \cos(b_j)}}, \Psi^j = e^{-i\omega\tau_{lag}^j} \left[\frac{1-i}{2} + iF\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \omega\tau_{lag}^j\right) \right]$$

References

- [1] J. J. Bowman, T. B. Senior, and P. L. Uslenghi, Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes (Revised edition), (North-Holland Pub. Co, New York, 1987).
- [2] P. Menounou, M. I. Spiropoulos, and P. Nikolaou, “ Approximate time domain solution for studying infinite wedge diffraction, its parameters, and characteristics,” J. Acoust. Soc. Am. 153 (2), 1399–1411 (2023).
- [3] P. Menounou and P. Nikolaou, “An extension to the directive line source model for diffraction by half planes and wedges,” Acust. Acta united Acust. 102, 307–321 (2016).
- [4] Shampine, L.F. "Vectorized Adaptive Quadrature in MATLAB®." J. Comp. and Appl. Math. Vol. 211, 131–140 (2008).



Εισαγωγή κινησιολογικών δεδομένων αλληλεπίδρασης μουσικού - μπαγκέτας - κυμβάλου σε FEM-BEM μοντέλα δονητικής και ακουστικής απόκρισης

Στέλλα Πασχαλίδου^{1,*}, Κώστας Τσάμης¹, Χρυσούλα Αλεξανδράκη¹, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2,3}, Βασίλης Δημητρίου^{1,2,3}

¹ Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο

²Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Ε. Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74133, Ρέθυμνο

³Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τρία Μοναστήρια, 74100, Ρέθυμνο

*pashalidou@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάμε τη μηχανική, δονητική και ακουστικοδυναμική συμπεριφορά ενός κυμβάλου κατασκευασμένου από κράμα μπρούτζου B20, μέσω προσομοίωσης με αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων-οριακών στοιχείων FEM-BEM στο πεδίο του χρόνου. Η καινοτομία της εργασίας έγκειται στη χρήση πραγματικών τριδιάστατων δεδομένων σωματικής κίνησης, που καταγράφηκαν κατά την αλληλεπίδραση μουσικού-μπαγκέτας-κυμβάλου και τα οποία παρείχαν τις συνθήκες φόρτισης της αλληλεπίδρασης μπαγκέτας-κυμβάλου στο υπολογιστικό μοντέλο. Η συνδυασμένη καταγραφή κίνησης με προσομοιώσεις FEM-BEM επιτρέπει τον υπολογισμό των παραγόμενων ήχων σύμφωνα με τις αποκλίσεις που εισάγονται σκόπιμα από τους συμμετέχοντες κατά την πραγματική εκτέλεση. Προοδευτικά εντεινόμενες ελεύθερες κρούσεις χρησιμοποιήθηκαν ως συνθήκες φόρτισης τόσο για το πείραμα όσο και για την προσομοίωση. Μια ποιοτική σύγκριση των καταγεγραμμένων και προσομοιωμένων ήχων πραγματοποιήθηκε για τη διαπίστωση του εάν οι μεταβολές αυτές αποτυπώνονται στον ήχο που παράγεται από την προσομοίωση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία προάγει μια νέα προοπτική στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την κατασκευή μουσικών οργάνων λαμβάνοντας υπόψη τις εκτελεστικές αποκλίσεις κατά την πραγματική εκτέλεση και ερμηνεία.

Input of motion data for musician-drumstick-cymbal interaction into FEM-BEM vibrational and acoustic response models

ABSTRACT

In the present work, we study the mechanical, vibrational and acoustic dynamic behavior of a cymbal made of B20 bronze alloy, through simulation with finite-

element FEM-BEM numerical methods in the time domain. The novelty of the work lies in the use of real 3D body motion data, recorded during the musician-drumstick-cymbal interaction, which provided the loading conditions of the drumstick-cymbal interaction in the computational model. Combined motion capture with FEM-BEM simulations allows the calculation of produced sounds according to deviations intentionally introduced by participants during actual performance. Progressively intensifying free impacts were used as loading conditions for both experiment and simulation. A qualitative comparison of the recorded and simulated sounds was performed to determine whether these changes are reflected in the sound produced by the simulation. The proposed methodology promotes a new perspective in the design, optimization and construction of musical instruments by taking into account executive deviations during actual performance and performance.

Εισαγωγή

Τα κύμβαλα είναι κοινά κρουστά όργανα και αναντικατάστατα μέρη των σετ τυμπάνων. Η ιστορία αυτών των μουσικών οργάνων (ιδιόφωνων) χρονολογείται από την αρχαιότητα, όταν παίζονταν με διάφορους τρόπους, πιο συχνά με μπαγκέτα, και εξακολουθούν να αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των μουσικών οργάνων πολλών ειδών μουσικής. Χρησιμοποιούνται σε κρουστά σύνολα, τζαζ συγκροτήματα, ροκ συγκροτήματα, καθώς και σε μεγάλες ορχήστρες. Συνήθως, τα σετ τυμπάνων περιλαμβάνουν τουλάχιστον τέσσερις διαφορετικούς τύπους κυμβάλων, συγκεκριμένα, splash, crash, ride και hi-hat. Ο ήχος που παράγεται από ένα κύμβαλο είναι σύνθετος και σχετίζεται εγγενώς με τα δονητικά του χαρακτηριστικά, τα οποία εξαρτώνται από τις διαστάσεις, το σχήμα και το υλικό του [1]. Συνήθως, τα κύμβαλα κατασκευάζονται από κράματα που βασίζονται στον χαλκό. Ανάλογα με τον κατασκευαστή και τον τύπο του κυμβάλου, μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων, όπως το αλουμίνιο, το ασήμι και ο χρυσός, μπορεί να προστεθούν στον χαλκό. Τα κράματα μπρούντζου όπως το B20 (80 τοις εκατό χαλκός, 20 τοις εκατό κασσίτερος) και το B8 (92 τοις εκατό χαλκός, 8 τοις εκατό κασσίτερος) χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως από γνωστούς κατασκευαστές κυμβάλων [2]. Επιπλέον, τα κράματα ορείχαλκου από χαλκό και ψευδάργυρο επιλέγονται για την κατασκευή τους με προκαθορισμένα ακουστικά χαρακτηριστικά. Στην [3], πραγματοποιήθηκαν προηγμένες αριθμητικές προσομοιώσεις με πεπερασμένα στοιχεία που περιλαμβάνουν ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και συχνотικής απόκρισης, ανάλυση στο πεδίο συχνότητας και στο πεδίο χρόνου με τη μέθοδο FEM-BEM (συνοριακών στοιχείων) για να μελετηθεί η ακουστοδυναμική συμπεριφορά τους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοσυχνοτήτων συμφωνούν με τις πειραματικές μετρήσεις που βρίσκονται στη σχετική βιβλιογραφία. Ωστόσο, κατά την γνώση των συγγραφέων, η πραγματική κίνηση της μπαγκέτας για την κρούση και δόνηση των κυμβάλων δεν έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία [3-6].

Στην παρούσα ερευνητική εργασία, επικεντρωνόμαστε στην εισαγωγή των δεδομένων πραγματικής κίνησης της κινούμενης μπαγκέτας που αλληλεπιδρά με ένα κύμβαλο με συζευγμένες δονητικές ακουστικές αριθμητικές προσομοιώσεις. Μια FEM-BEM προσομοίωση περιγράφει την χρονικά μεταβαλλόμενη ακουστική δυναμική ενός splash πιατινιού από κράμα μπρούντζου B20. Τα δεδομένα πραγματικής τριδιάστατης κίνησης που καταγράφηκαν κατά την αλληλεπίδραση ντράμερ-μπαγκέτας-κυμβάλου καθορίζουν τις τιμές μετατόπισης, ταχύτητας και

επιτάχυνσης της κινούμενης μπαγκέτας σε διάφορες συνθήκες παιξίματος, παρέχοντας τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης στα αριθμητικά μοντέλα. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται στη χρήση πραγματικών τριδιάστατων δεδομένων σωματικής κίνησης ως δεδομένα εισόδου στο υπολογιστικό μοντέλο. Μια ποιοτική σύγκριση των καταγεγραμμένων και προσομοιωμένων ήχων πραγματοποιείται για να αποκαλύψει εάν οι αλλαγές του καταγεγραμμένου ήχου εκδηλώνονται στον ήχο που παράγεται από την προσομοίωση.

1. Μαθηματική Μοντελοποίηση

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και η μέθοδος συνοριακών στοιχείων (BEM) είναι πολύτιμες μαθηματικές μέθοδοι που είναι ικανές να προσομοιώσουν τη δονητική ακουστική συμπεριφορά μουσικών οργάνων όταν αλληλεπιδρούν με οποιοδήποτε τύπο φορτίων, δονήσεων και μεταβολών στις περιβαλλοντικές συνθήκες (δηλαδή, θερμοκρασία, υγρασία) [7]. Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις FEM-BEM στο πεδίο του χρόνου. Η θεμελιώδης εξίσωση κίνησης για την δομική ανάλυση σε μητρωϊκή μορφή είναι:

$$[M]\left\{\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right\} + [C]\left\{\frac{\partial U}{\partial t}\right\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας, $\{U\}$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης, $[C]$ είναι το μητρώο απόσβεσης, $[K]$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας, και $\{F\}$ είναι το διάνυσμα φορτίου. Η απόσβεση στο σύστημα μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας έναν πολλαπλασιαστή του μητρώου δυσκαμψίας που σχηματίζει το μητρώο απόσβεσης ως $[C] = \beta[K]$, όπου β είναι η σταθερά απόσβεσης Rayleigh.

Το μαθηματικό μοντέλο FEM-BEM επιλύεται με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA, το οποίο επιλύει δονητικά ακουστικά προβλήματα, συνδυάζοντας τον επιλύτη χρονικά μεταβαλλόμενης προσομοίωσης FEM με τον ακουστικό επιλύτη BEM. Ο αέρας που περιβάλλει τη δονητική δομή μοντελοποιείται με BEM, όπου υπολογίζεται η πίεση του εκπεμπόμενου ήχου. Για την ανάλυση FEM-BEM, αρχικά πραγματοποιείται η ανάλυση FEM στο πεδίο του χρόνου και η δυναμική απόκριση της δομής μετατρέπεται στο πεδίο της συχνότητας μέσω του FFT. Στη συνέχεια, οι υπολογιζόμενες ταχύτητες στην επιφάνεια παρέχουν τις οριακές συνθήκες για τους ακουστικούς υπολογισμούς των BEM [3].

Η εξίσωση Helmholtz διέπει τη μετάδοση των ακουστικών κυμάτων (ανάλυση BEM στο πεδίο της συχνότητας) σε ένα ιδανικό ρευστό, χωρίς την παρουσία οποιασδήποτε πηγής όγκου [3]:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

όπου p είναι η ακουστική πίεση και k ο κυματαριθμός. Με το θεώρημα του Green, η Εξίσωση (2) μετασχηματίζεται σε μια ολοκληρωτική εξίσωση. Έτσι, η πίεση σε οποιοδήποτε σημείο στο ρευστό μέσο εκφράζεται ως ένα ολοκλήρωμα της επιφανειακής πίεσης και της επιφανειακής ταχύτητας μιας δονούμενης δομής:

$$P_Q(\omega) = \int_S \left(G \frac{\partial p(\omega)}{\partial n} - p(\omega) \frac{\partial G}{\partial n} \right) dS \quad (3)$$

όπου $P_Q(\omega)$ είναι η ηχητική πίεση σε ένα σημείο πεδίου Q , S είναι η επιφάνεια της δομής, n είναι το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια S , $p(\omega)$ είναι η επιφανειακή πίεση, ω είναι η γωνιακή συχνότητα του ακουστικού κύματος και G είναι η συνάρτηση Green, η οποία δίνεται από:

$$G = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (4)$$

όπου r είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου ολοκλήρωσης της επιφάνειας και του σημείου πεδίου Q . Για προβλήματα δονητικής ακουστικής, η διατήρηση της ορμής στην οριακή επιφάνεια της δονητικής δομής οδηγεί στην εξής οριακή συνθήκη:

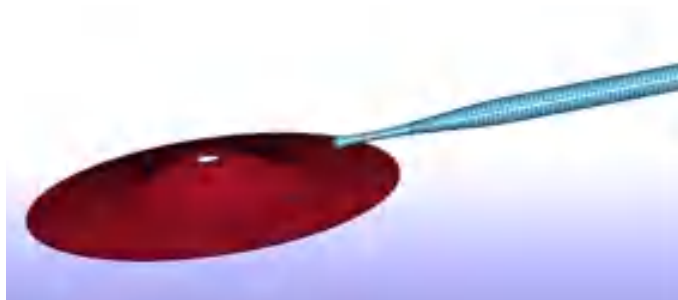
$$\partial p(\omega)/\partial n = -i\rho\omega v_n(\omega) \quad (5)$$

όπου ρ είναι πυκνότητα του ρευστού και $v_n(\omega)$ κάθετη ταχύτητα στην επιφάνεια S . Αυτή η εξίσωση συσχετίζει την κανονική παράγωγο της πίεσης με την ταχύτητα.

2. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση

Η γεωμετρία CAD ενός splash Zildjian κυμβάλου 8 ιντσών (20,32 cm) έχει σχεδιαστεί μαζί με τη γεωμετρία ξύλινης μπαγκέτας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η διάμετρος της καμπάνας για το splash cymbal είναι 78 mm και η εσωτερική διάμετρος είναι 12,3 mm. Το πάχος από το κέντρο μέχρι την άκρη του πιατινιού ποικίλει και στην άκρη γίνεται 0,5 mm. Το μήκος της μπαγκέτας είναι 39,4 cm. Το πιατίνι μοντελοποιείται ως παραμορφώσιμο σώμα, ενώ η μπαγκέτα ως μη παραμορφώσιμο σώμα. Η γεωμετρία διακριτοποιείται με 30000 επιφανειακά FEM στοιχεία (τετραγωνικά στοιχεία) (σχήμα 1). Η γεωμετρία της σφαίρας αέρα που περιβάλλει το πιατίνι αποτελείται από 2000 στοιχεία BEM. Χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες, βιβλιογραφικές τιμές για ιδιότητες υλικού (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) του κράματος B20 για το πιατίνι [8], καρυδιάς για τη μπαγκέτα [9] και σταθερή τιμή 0.001 για το λόγο απόσβεσης [3]. Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, οι μετατοπίσεις καθορίζονται για τους κόμβους που οριοθετούν την κεντρική τρύπα, προσομοιώνοντας τη στήριξη του κύμβαλου βάσει των πειραματικών μετρήσεων [3]. Το χρονικό βήμα για τη χρονικά μεταβαλλόμενη μηχανική ανάλυση είναι 1 μs.

Ένα εύρος συχνοτήτων 0–8000 Hz λαμβάνεται υπόψη για τις δονητικές ακουστικές προσομοιώσεις FEM-BEM πεδίου. Οι συχνότητες εξόδου ρυθμίζονται επίσης σε αυτό το εύρος, ενώ η ανάλυση ορίζεται στο 1 Hz. Ο αέρας είναι το ακουστικό μέσο στη θερμοκρασία δωματίου με πυκνότητα $1,21 \text{ kgm}^{-3}$ και ταχύτητα ήχου 340 ms^{-1} σε πίεση αναφοράς 20 μPa. Ένας κόμβος χωρίς μάζα τοποθετείται 0,5 m πάνω από το σημείο κρούσης του κυμβάλου, το οποίο θεωρείται ότι έχει συντεταγμένες $(X,Y,Z) = (0,0,0) \text{ m}$, όπου το X αντιστοιχεί στην απόσταση μήκους, το Y αντιστοιχεί στην απόσταση του πλάτους και το Z αντιστοιχεί στην απόσταση του ύψους. Αυτός ο κόμβος αντιστοιχεί σε μια υποτιθέμενη θέση μικροφώνου στο ακουστικό πεδίο, όπου μετράται η ηχητική πίεση που προκύπτει από την κρούση. Η χωρική θέση της μπαγκέτας σε σχέση με το κύμβαλο και οι τιμές της ταχύτητάς της υπό διαφορετικές συνθήκες, που καταγράφονται από ένα τριδιάστατο σύστημα καταγραφής κίνησης, εισάγονται ως αρχικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης στο μοντέλο FEM-BEM.



Σχήμα 1. Πλέγμα του splash πιατινιού και της μπαγκέτας

Οι εξαρτώμενες από το χρόνο προσομοιώσεις FEM-BEM του μοντέλου αλληλεπίδρασης μπαγκέτας-κύμβαλου έχουν υψηλές υπολογιστικές ανάγκες. Επομένως, για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιείται ο υπερ-υπολογιστής Υψηλής Απόδοσης (HPC) ARIS για παράλληλη επεξεργασία.

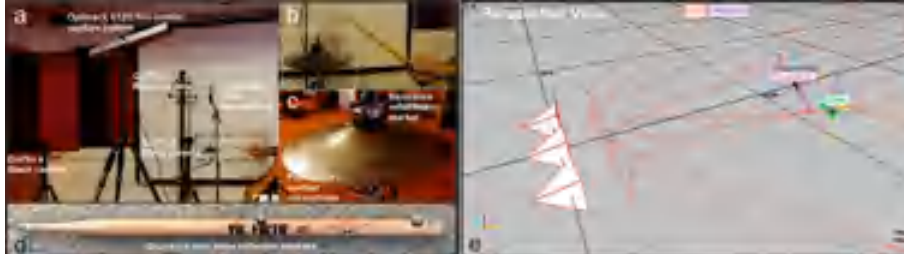
3. Πειραματική Διαδικασία

Ένα σύστημα καταγραφής κίνησης (motion capture - mocap) με χρήση σημειωτών (ανακλαστικών σφαιριδίων) χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των πραγματικών συνθηκών φόρτισης που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις FEM-BEM. Συγκεκριμένα, τα τριδιάστατα δεδομένα θέσης καταγράφηκαν με ένα παθητικό οπτικό σύστημα (Optitrack V120:Trio) χωρικής ακρίβειας μικρότερης του χιλιοστού που αποτελούνταν από μια σειρά έξι υπέρυθρων ευρυγώνιων καμερών υψηλής ταχύτητας (Optitrack Primex 13W) με ρυθμό δειγματοληψίας 120 Hz. Ένα άκαμπτο σώμα μοναδικής γεωμετρίας δημιουργήθηκε πάνω στη μπαγκέτα με τη βοήθεια τριών ανακλαστικών σημειωτών (Σχήμα 2): δύο τοποθετημένων κατά μήκος του άξονά της —λίγο πριν και λίγο μετά το σημείο επαφής με το χέρι— και ενός που τυλίχθηκε γύρω από την κεφαλή της μπαγκέτας με ανακλαστικό συγκολλητικό υλικό. Ένα ακόμα άκαμπτο σώμα μοναδικής γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του καρπού, όπως είχε γίνει στο παρελθόν για την παρακολούθηση κίνησης ολόκληρου του σώματος στις [10,11]. Μονοφωνικός ήχος καταγράφηκε από ένα πυκνωτικό μικρόφωνο καρδιοειδούς τύπου (LineAudio CM4), τοποθετημένο περίπου 50 cm πάνω από το πιατίνι, στη μέση της απόστασης μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας, μέσω μιας συσκευής εγγραφής ήχου (Sound Devices MixPre-10 II) στα 96 kHz. Όλα τα ανακλαστικά αντικείμενα και υλικά του χώρου καλύφθηκαν για να αποφευχθούν αντανάκλασεις που θα μπορούσαν να ανιχνευτούν λανθασμένα από το σύστημα ως σημειωτές.

Από έναν επαγγελματία ντράμερ ζητήθηκε να εκτελέσει έξι κρούσεις με σταδιακά αυξανόμενη ένταση (δυναμικά επίπεδα που αντιστοιχούσαν σε pianissimo, piano, mezzo-piano, mezzo-forte, forte και fortissimo, που στη μουσική σημειογραφία συμβολίζονται με τα εξής σύμβολα: *pp*, *p*, *mp*, *mf*, *f*, *ff*), κατά τη διάρκεια των οποίων η μπαγκέτα ήταν ελεύθερη να αναπηδά. Όλες οι κρούσεις πραγματοποιήθηκαν σε συγκεκριμένη θέση πάνω στο πιατίνι των 8 ιντσών (στα 2/3 από το κέντρο) και με το πιατίνι προσαρμοσμένο με σταθερή και μέγιστη τάση πάνω στη βάση στήριξης. Η πειραματική διάταξη βιντεοσκοπήθηκε από τρεις κάμερες υψηλής ταχύτητας (GoPro 4 Black) τοποθετημένων σε διαφορετικές γωνίες. Για τον μετέπειτα συγχρονισμό ή την ευθυγράμμιση όλων των δεδομένων (κίνηση, ήχος, βίντεο) χρησιμοποιήθηκε

κατά τη διάρκεια του πειράματος μια κλακέτα, στην οποία προσαρτήθηκαν δύο ανακλαστικοί σημειωτές.

Η πειραματική διάταξη, μαζί με το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος Optitrack V120:Trio, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. (α) Πειραματική διάταξη που παρουσιάζει το σύστημα καταγραφής κίνησης Optitrack V120:Trio, τρεις κάμερες αναφοράς, το μικρόφωνο LineAudio CM4, το πιατίνι και τον ντράμερ, (β) μεγέθυνση της λεπτομέρειας του (α) στη θέση πιατίνι-ντράμερ, (γ) μεγέθυνση της λεπτομέρειας του (β) στο πιατίνι, τον δείκτη αναφοράς και το πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο επαφής, (δ) μπαγκέτα με τους τρεις προσαρτημένους ανακλαστικούς σημειωτές, (ε) το σύστημα συντεταγμένων του συστήματος Optitrack V120:Trio.

Η μέση δύναμη μιας κρούσης είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της ορμής ή ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας (πριν και μετά την κρούση):

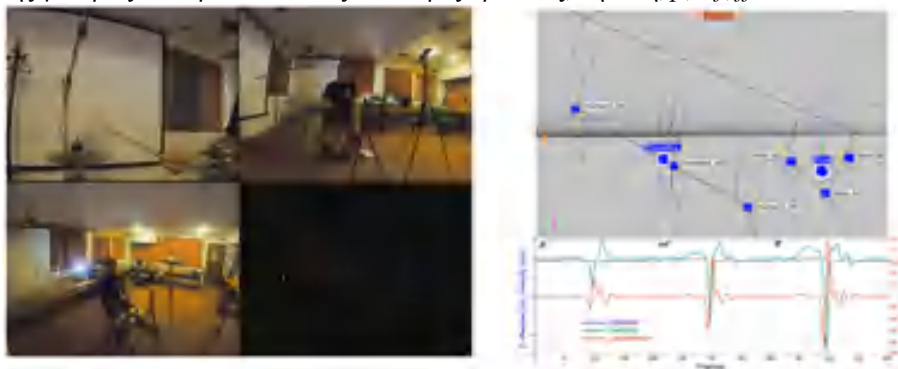
$$\{F\} = \left\{ \frac{\Delta p}{\Delta t} \right\} = [M] \left\{ \frac{\Delta v}{\Delta t} \right\} = [M] \left\{ \frac{v_{fin} - v_{init}}{\Delta t} \right\} \quad (6)$$

όπου $\Delta p/\Delta t$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής με το χρόνο, $\Delta p = [M]\Delta v$, Δv είναι η μεταβολή της ταχύτητας, και $[M]$ είναι ο πίνακας της μάζας. Για μια ανελαστική κρούση η μέγιστη δύναμη είναι διπλάσια της μέσης τιμής της, και, για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι αυτό ισχύει και για το πιατίνι που έχει πακτωθεί με μέγιστη τάση στη βάση στήριξης. Η ενεργός μάζα που χρησιμοποιείται σε κάθε μεμονωμένη κρούση μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την τεχνική κρατήματος της μπαγκέτας (το σημείο στήριξης που χρησιμοποιείται), καθώς και τη συνολική κίνηση του χεριού και την τροχιά του στον χώρο [12]. Επομένως, είναι δύσκολο να βρεθεί αξιόπιστος τρόπος υπολογισμού της εμπλεκόμενης μάζας. Έτσι, η μάζα θεωρείται σταθερός παράγοντας τόσο για την προσομοίωση όσο και για την πραγματική διέγερση και γι' αυτό παραλείπεται, με τη σχετική δύναμη να υπολογίζεται τελικώς ως ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας. Συνεπώς, μόνο η καταγεγραμμένη ταχύτητα και οι χωρικές συντεταγμένες της μπαγκέτας και του πιατινιού υιοθετούνται από το μοντέλο FEM-BEM.

Τα δεδομένα θέσης από το σύστημα καταγραφής κίνησης εκφράζονται σε μέτρα σε σχέση με ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων, με την αρχή του συνδεδεμένη στο κέντρο του συστήματος V120:Trio. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο περιβάλλον του Matlab. Τα ελλιπή δεδομένα συμπληρώθηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής του τελευταίου δείγματος πριν από κάθε κενό με το πρώτο δείγμα μετά από κάθε κενό. Οι τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης υπολογίστηκαν από το `mctimeder` στο `Mocap Toolbox` (v1.5) ως εκτίμηση της πρώτης/δεύτερης τάξης χρονικής παραγώγου αντίστοιχα. Για τη συμπίεση του θορύβου από την παραγωγή

χρησιμοποιήθηκε ένα φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky–Golay FIR με μήκος παραθύρου επτά καρτέ.

Το Σχήμα 3 αριστερά απεικονίζει την πειραματική διάταξη από τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης (κάμερες), καθώς και τα άκαμπτα σωμάτια μπαγκέτας και καρπού, αλλά και την αποτύπωση των ιχνών όλων των σημειωτών για μία κρούση, το Σχήμα 3 δεξιά-επάνω εμφανίζει τα ίχνη των χειρονομιών όλων των σημειωτών και των κεντροειδών των άκαμπτων σωμάτων για το τελευταίο, σκληρότερο χτύπημα, ενώ το Σχήμα 3 δεξιά-κάτω απεικονίζει τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση της κεφαλής της μπαγκέτας στον άξονα z για 200 καρτέ γύρω από τη χαμηλότερη θέση της για τρεις αντιπροσωπευτικές ελεύθερες κρούσεις, δηλαδή, p , mf , ff .



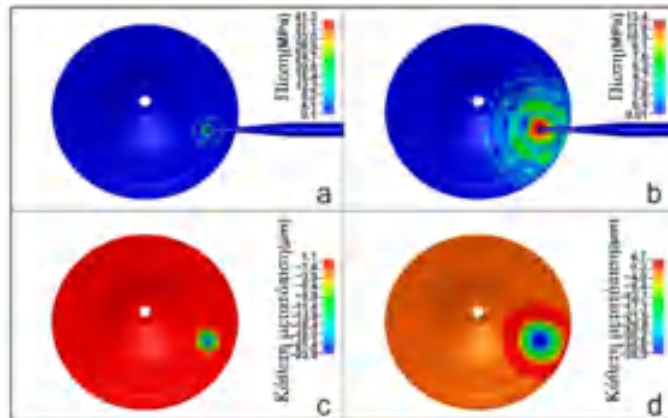
Σχήμα 3. Αριστερά: Η πειραματική διάταξη από τρεις διαφορετικές γωνίες θέασης, καθώς και η αποτύπωση των άκαμπτων σωμάτων μπαγκέτας και καρπού, αλλά και τα ίχνη όλων των σημειωτών για μία κρούση. Δεξιά-επάνω: Ίχνη για την κρούση ff για τους τρεις σημειωτές και τα κεντροειδή των άκαμπτων σωμάτων. Δεξιά-κάτω: Κατακόρυφη θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση της κεφαλής της μπαγκέτας για τα τρία αντιπροσωπευτικά χτυπήματα, p , mf και ff .

4. Αποτελέσματα και συζήτηση

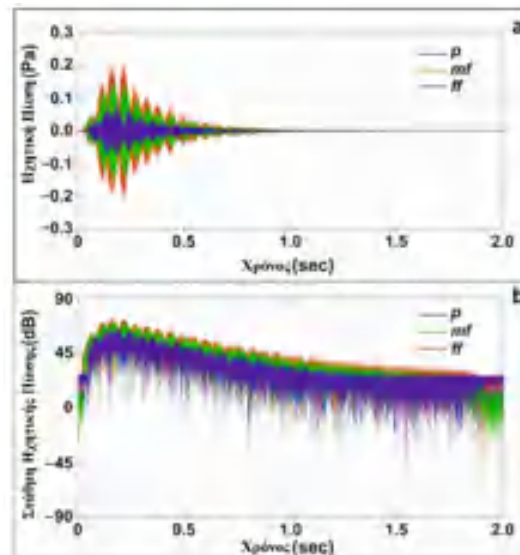
Στο σχήμα 4 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα πίεσης (a,b) και κατακόρυφης μετατόπισης (c,d) για δύο χρονικές στιγμές αμέσως μετά την κρούση μεταξύ μπαγκέτας και κυμβάλου για το ελεύθερο χτύπημα mf . Οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στο κύμβαλο στο σημείο κρούσης φτάνουν την τιμή των 40 MPa < τιμή αντοχής εφελκυσμού 125 MPa. Οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις στο σημείο κρούσης φτάνουν την τιμή των 38 μm , ενώ η μέση τιμή των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων, για χρόνο προσομοίωσης 2 s, είναι περίπου 15 μm . Είναι εμφανής η δημιουργία bending waves που διαδίδονται προς τα έξω από το σημείο κρούσης. Αυτά τα κύματα ανακλώνται στις άκρες του οργάνου και οδηγούν σε μοτίβα στάσιμων κυμάτων που σχηματίζουν τους κανονικούς τρόπους δόνησης [13]. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τις ελεύθερες κρούσεις p και ff . Επιπλέον, το μοντέλο είναι ικανό να παρέχει έναν υπολογισμό του χρόνου επαφής: υπολογίζεται ότι είναι 0,25 ms για το γρήγορο χτύπημα ff και 0,35 ms για το πιο αργό χτύπημα p .

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται η ηχητική πίεση και το επίπεδο ηχητικής πίεσης (SPL) του προσομοιωμένου εκπνεόμενου ήχου σε σημείο στον αέρα με συντεταγμένες $(X,Y,Z)=(0.5,0,0.5)$ m, για τρεις προοδευτικά ενισχυόμενες ελεύθερες

κρούσεις, p , mf και ff . Παρατηρείται η προοδευτική αύξηση του μέγιστου επιπέδου ηχητικής πίεσης στις κυματομορφές των p – mf – ff , επιβεβαιώνοντας ότι η συνεργασία της καταγραφής κίνησης και των προσομοιώσεων παρέχει μια έγκυρη προσέγγιση της δυναμικής συμπεριφοράς του πιατινιού, λόγω της μεταβαλλόμενης κρούσης της μπαγκέτας. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθούν οι μέγιστες υπολογισμένες τιμές πίεσης και SPL, οι οποίες, για το χτύπημα ff , είναι 0,2 Pa και 70 dB, αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Κατανομή πίεσης του κυμβάλου στο (α) 0,1 ms και (β) 0,3 ms μετά την πρόσκρουση της μπαγκέτας στο όργανο για την κρούση mf . Κατακόρυφη μετατόπιση του κυμβάλου στο (γ) 0,1 ms και (δ) 0,3 ms μετά την πρόσκρουση της μπαγκέτας στο όργανο για την κρούση mf .



Σχήμα 5. Υπολογισμένες τιμές (α) ηχητικής πίεσης και (β) SPL του εκπεμπόμενου ήχου για τρεις σταδιακά ενισχυόμενες ελεύθερες κρούσεις p , mf , ff .

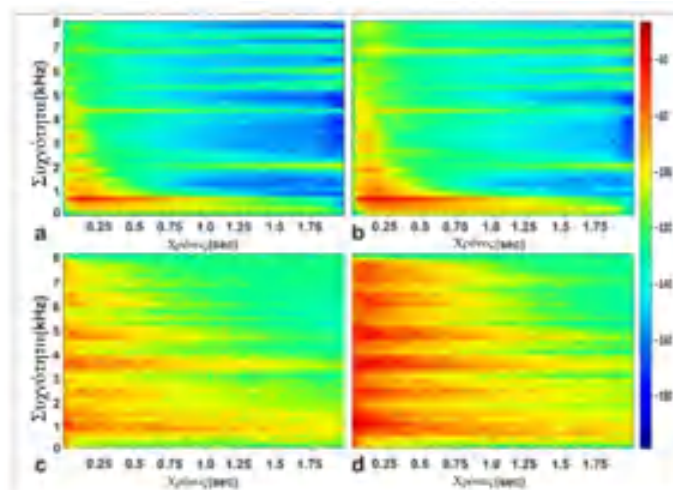
Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της FEM-BEM προσομοίωσης στο σημείο $(X, Y, Z) = (0.5, 0, 0.5)$ m, όπως απεικονίζεται από το φασματογράφημα πίεσης του splash cymbal που χτυπήθηκε από τις ελεύθερες κρούσεις mf και ff , στο

Σχήμα 6α και Σχήμα 6β, αντίστοιχα. Δείχνει επίσης τα ηχητικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν για τα ίδια χτυπήματα p και ff , στο Σχήμα 6γ και Σχήμα 6δ, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των ζευγών των φασματογραμμάτων των κρούσεων p και ff στην πειραματική μέτρηση και υπολογιστική προσέγγιση διαπιστώνουμε ότι η υπολογιστική προσέγγιση ακολουθεί τη συμπεριφορά του πραγματικού ήχου, δηλαδή μια αύξηση της ηχητικής πίεσης και παραγωγή ενός πιο πλούσιου φάσματος της ισχυρότερης ως προς την πιο ασθενή κρούση.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση ακολουθεί τις αποκλίσεις που εισάγονται σκόπιμα από τους μουσικούς κατά την μουσική εκτέλεση. Η απόκλιση που παρατηρείται στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου ανάμεσα στο μοντέλο και τον καταγεγραμμένο αποδίδεται στους εξής παράγοντες:

- Οι διαφορετικές τιμές στις παραμένουσες τάσεις κατά τα στάδια κατεργασίας που αναφέρθηκαν δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο
- Η τιμή της απόσβεσης που τέθηκε στο μοντέλο είναι σταθερή και βιβλιογραφική και όχι πειραματικά προσδιορισμένη
- Η γεωμετρική προσέγγιση του μοντέλου CAD σε βαθμούς παρεμβολής
- Τα πιατίνια σε υψηλές συχνότητες παρουσιάζουν μη γραμμική χαστική ακουστική συμπεριφορά
- Η περιορισμένη για τις ανάγκες του πειράματος συχνότητα δειγματοληψίας των δεδομένων κίνησης

Στο μέλλον σκοπεύουμε να βελτιώσουμε τη γεωμετρική παρεμβολή και να συμπεριλάβουμε μικρές γεωμετρικές αποκλίσεις (σφυρηλάτηση) και παράλληλα τη μελέτη συμπεριφοράς ακατέργαστου επίπεδου μεταλλικού δίσκου.



Σχήμα 6. Αποτελέσματα από την ανάλυση FEM-BEM για το σημείο $(X,Y,Z) = (0.5,0,0.5)$ m, όπως παρουσιάζονται στο φάσμα πίεσης για το πιατίνι που χτυπήθηκε από τις κρούσεις p και ff (εικόνες a και b). Επίσης, απεικονίζονται τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα ήχου για τις ίδιες κρούσεις p και ff (c και d αντίστοιχα).

5. Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προοπτικές

Η προτεινόμενη μεθοδολογία προάγει μια νέα προοπτική στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση και την κατασκευή μουσικών οργάνων λαμβάνοντας υπόψη τις

εκτελεστικές αποκλίσεις κατά την πραγματική εκτέλεση και ερμηνεία, τις οποίες ενσωματώνουμε με χρήση της πραγματικής τριδιάστατης κίνησης που ενεργοποιεί τις ταλαντώσεις ενός πιατινιού ως δεδομένα φόρτισης στο μοντέλο. Απώτερος μελλοντικός στόχος είναι να αναπτύξουμε και να εκπαιδεύσουμε μοντέλα μηχανικής μάθησης για το σχεδιασμό νέων πιατινιών προκαθορισμένων υλικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ικανά να ανταποκρίνονται ηχητικά στις πραγματικές κινήσεις ενός μουσικού ανάλογα με τις προτιμήσεις του ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου.

6. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε για την υποστήριξη με υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Ελληνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (GRNET) στην Εθνική εγκατάσταση HPC ARIS-στο πλαίσιο του έργου pr016025-LaMPIOS III.

7. Αναφορές

- [1] T. D. Morrison et al. «Acoustics of percussion instruments: An update» *Acoustical Science and Technology*, **25**, 406-412 (2004)
- [2] Available online: <https://www.modrndrummer.com/2011/10/what-you-need-to-know-about-cymbal-alloys/> (accessed on 17 October 2024)
- [3] E. Kaselouris et al. «A detailed FEM Study on the Vibro-acoustic Behaviour of Crash and Splash Musical Cymbals» *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, **16**, 948-955 (2022)
- [4] F. Kuratani et al. «Understanding the effect of hammering process on the vibration characteristics of cymbals» *Journal of Physics: Conference Series*, **744**, 12110 (2016)
- [5] T. Samejima «Nonlinear physical modeling sound synthesis of cymbals involving dynamics of washers and sticks/mallets» *Acoustical Science and Technology*, **42**, 314-325 (2021)
- [6] A. Tatsuhiro et al. «Relationship between chaotic vibrations and acoustic properties of percussion cymbals» *Results in Engineering*, **14**, 100419 (2022)
- [7] E. Kaselouris et al. «A Review of Finite Element Studies in String Musical Instruments» *Acoustics*, **4**, 183-202 (2022)
- [8] Meinl. The Meinl Cymbals Catalogue—Inspire; Meinl: Gutenstetten, Germany, 2004
- [9] P. Mania et al. Effect of Slope Grain on Mechanical Properties of Different Wood Species» *Materials*, **13**, 1503 (2020)
- [10] S. Paschalidou «Effort inference and prediction by acoustic and movement descriptors in interactions with imaginary objects during Dhrupad vocal improvisation» *Wearable Technologies*, **3**:e14, 1-28 (2022)
- [11] S. Paschalidou, T. Eerola, M. Clayton «Voice and movement as predictors of gesture types and physical effort in virtual object interactions of classical Indian singing» in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Movement and Computing (MOCO '16)*, 1-2 (2016)
- [12] S. Dahl «Striking movements: A survey of motion analysis of percussionists» *Acoustical Science and Technology*, **32**, 168-173 (2011)
- [13] S. Schedin et al. Transient wave response of a cymbal using double-pulsed TV holography» *Journal of the Acoustical Society of America*, **103**, 1217-1220 (1998)



Εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από σφήνες

Σωτήριος Σαλάγας¹, Πηνελόπη Μενούνου¹ και Πέτρος Νικολάου¹
¹Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras,
University of Patras Campus, 26504, Patras, Greece.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εμπειρικές λύσεις για την περίθλαση σφαιρικού κύματος γύρω από σφήνα παρουσιάζονται στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι λύσεις μπορούν να επιταχύνουν τον υπολογισμό της περίθλασης σε σχέση με τις αντίστοιχες αναλυτικές κατά τάξεις μεγέθους διατηρώντας παράλληλα την ίδια ακρίβεια. Με βάση τη γνώση των συγγραφέων εμπειρική λύση για χαμηλές συχνότητες παρουσιάζεται για πρώτη φορά. Οι προτεινόμενες λύσεις συγκρίνονται ως προς την ακρίβεια και την υπολογιστική ταχύτητά τους με άλλες υπάρχουσες εμπειρικές λύσεις.

Empirical formulas for the calculation of the diffraction field around wedges

ABSTRACT

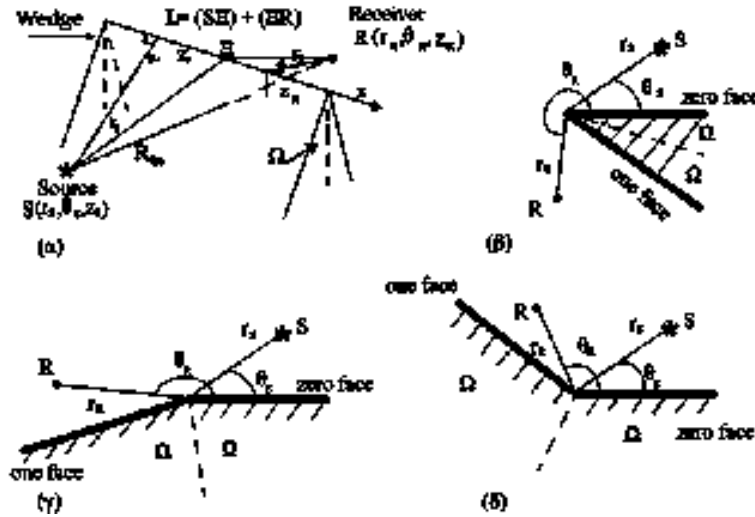
Empirical formulas for the diffraction of spherical incident wave around a wedge in frequency domain are presented. The solutions can accelerate the calculation of diffraction by orders of magnitude of computational time compared to analytical models. To the best of the authors' knowledge an Empirical formula for wedge diffraction for low frequencies is presented for the first time. The proposed solutions are compared to existing empirical formulas, in terms of accuracy and computational time.

Εισαγωγή

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται οι εμπειρικές λύσεις για το πρόβλημα της περίθλασης σφαιρικού κύματος γύρω από σφήνα στο πεδίο των συχνοτήτων που έχουν προταθεί στην αναφορά [1]. Οι εμπειρικές λύσεις προσφέρουν έναν εύκολο και γρήγορο υπολογισμό της περίθλασης. Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις οι εμπειρικές λύσεις απαιτούν τάξεις μεγέθους λιγότερο υπολογιστικό χρόνο για τον υπολογισμό τους.

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε μία καινούργια αναλυτική προσεγγιστική λύση (δεν ισχύει για χαμηλές συχνότητες) για την περίθλαση σφαιρικού κύματος από ακουστικά σκληρή ακμή.[2] Η αναλυτική λύση περιέχει όρους με ολοκληρώματα Fresnel. Μια εμπειρική λύση προκύπτει από την προσέγγιση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων των όρων των ολοκληρωμάτων Fresnel. Η εμπειρική παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 1. Όπως και η προσεγγιστική λύση από την οποία προέκυψε η εμπειρική λύση δεν ισχύει για χαμηλές συχνότητες. Στο κεφάλαιο 2 προτείνονται διορθωτικοί όροι οι οποίοι επεκτείνουν την ισχύ της εμπειρικής λύσης και στις χαμηλές συχνότητες. Προκύπτει μια εμπειρική λύση η οποία ισχύει σε όλο το εύρος των συχνοτήτων. Με βάση τη γνώση των συγγραφέων μία τέτοια λύση παρουσιάζεται για πρώτη φορά. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται και συγκρίνεται με άλλες λύσεις η ακρίβεια των προτεινόμενων λύσεων σε σχέση με την ακριβή αναλυτική λύση.

Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 0.1. Για την ανάλυση χρησιμοποιείται κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (θ, r, z) που έχει σαν άξονα συμμετρίας (άξονας z) την ακμή της σφήνας. Οι συντεταγμένες της πηγής και του δέκτη είναι $S(\theta_S, r_S, z_S)$ και $R(\theta_R, r_R, z_R)$ αντίστοιχα. Η γωνία της σφήνας ορίζεται ως 2Ω . Υπάρχουν ανοικτές σφήνες $0 \leq \Omega < \pi/2$ [Σχήμα 0.1(β) και (γ)] και κλειστές σφήνες [Σχήμα 0.1(δ)] $\pi/2 < \Omega < \pi$. Η μία πλευρά της σφήνας θεωρείται σταθερή στη θέση $\theta = 0$. Αυτή η πλευρά ονομάζεται «zero face». Η δεύτερη πλευρά μπορεί να αλλάξει τη θέση της $\theta = 2\pi - 2\Omega$ και ονομάζεται «one face». Η ελάχιστη απόσταση που διανύει ο ήχος από την πηγή μέχρι τον δέκτη λόγω περίθλασης είναι $L = \sqrt{(r_S^2 + r_R^2) + (z_R - z_S)^2}$.



Σχήμα 0.1 Γεωμετρία της Σφήνας.

Η ανάλυση βασίζεται σε πρόσφατη αναλυτική προσεγγιστική λύση των συγγραφέων την περίθλαση σφαιρικού κύματος γύρω από σκληρή σφήνα στο πεδίο των συχνοτήτων. Η λύση είναι:

$$P_d = \sum_{j=1}^4 P_d^j = \sum_{j=1}^4 -i \frac{1}{L} e^{i(kL - \frac{\pi}{4})} D^j \Psi^j \quad (0.1)$$

$$D^j = \frac{\sin(b_j)}{2\sqrt{1 - \cos(b_j)}}, \quad \Psi^j = e^{-i\omega\tau_{lag}^j} \left[\frac{1-i}{2} + iF\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \omega\tau_{lag}^j\right) \right]$$

$$b_j = \pm \frac{\theta_R}{\gamma} \pm \frac{\theta_S}{\gamma} + \frac{\pi}{\gamma}, \quad \gamma\pi = 2\pi - 2\Omega, \quad \tau_{lag}^j = \gamma^2 \frac{r_S r_R}{LC} (1 - \cos(b_j)) \quad (0.2)$$

όπου $F(x) = \int_0^x e^{i\frac{\pi}{2}z^2} dz$ είναι το μιγαδικό ολοκλήρωμα Fresnel, k ο αριθμός κύματος $k=2\pi f/c$ (f η συχνότητα της πηγής) και ω η γωνιακή συχνότητα της πηγής.

Οι προτεινόμενες λύσεις συγκρίνονται με την ακριβή λύση περίθλασης σφαιρικού σήματος για ακουστικά σκληρή σφήνα:

$$P_{exact} = \sum_{j=1}^4 P_{exact}^j$$

$$P_{exact}^j = -\frac{1}{2\pi\gamma} \int_0^\infty \frac{e^{ikR}}{R} \frac{\sin(b_j)}{\cosh(\zeta/\gamma) - \cos(b_j)} d\zeta \quad (0.3)$$

$$R = \sqrt{r_S^2 + r_R^2 + 2r_S r_R \cosh(\zeta) + (z_R - z_S)^2}$$

Με βάση την αναφορά [1] οι δύο λύσεις εξ. (0.1) και εξ. (0.5) συμφωνούν για

$$\Gamma = krr_0/L > 2. \quad (0.4)$$

1. Εμπειρική Λύση

Η προτεινόμενη εμπειρική λύση βασίζεται στην παρατήρηση ότι η συνάρτηση Ψ^j που περιέχει τα ολοκληρώματα Fresnel Εξ. (0.1) είναι συνάρτηση μιας μεταβλητής:

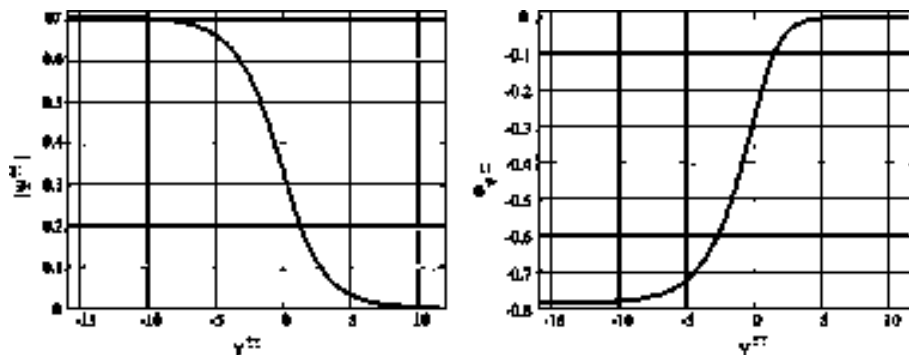
$$\Psi^j = \Psi^j(S^j), \quad S^j = \omega \tau_{lag}^j = \frac{kr_S r_R}{L} \gamma^2 (1 - \cos(b_j)). \quad (1.1)$$

Η ποσότητα Ψ^j είναι μιγαδική με:

$$\Psi^j = \Psi_{real}^j + i\Psi_{imag}^j = |\Psi^j| e^{i\Phi_{\Psi^j}}, \quad (1.2)$$

όπου Ψ_{real}^j και Ψ_{imag}^j το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της Ψ^j , αντίστοιχα, $|\Psi^j|$ το μέτρο και Φ_{Ψ^j} η φάση της Ψ^j . Έχει παρατηρηθεί ότι το μέτρο και η φάση της Ψ^j είναι συναρτήσεις τύπου S ως προς μια μεταβλητή Y^j (βλέπε Σχήμα 1.1) όπου:

$$Y^j = \ln(S^j). \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.1 Μέτρο (αριστερά) και φάση (δεξιά) της Ψ^j Εξ. (0.1) ως προς την μεταβλητή Y^j Εξ. (1.2).

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση η συνάρτηση Ψ^j μπορεί να προσεγγιστεί με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η προσέγγιση θα γίνει σε ένα διάστημα $S^j \in [10^{-7}, 10^5]$ ώστε να συμπεριλαμβάνονται όλες οι πιθανές τιμές του S^j . Έπειτα από αριθμητική μελέτη προέκυψε ότι το καλύτερο μοντέλο για την Ψ^j είναι άθροισμα λογιστικών συναρτήσεων $a_n / (1 + e^{b_n Y^j + c_n})$, όπου a_n, b_n, c_n είναι συντελεστές ελαχίστων τετραγώνων. Τελικά η προτεινόμενη προσέγγιση είναι:

$$|\Psi^j(Y^j)| = \sum_{n=1}^3 \left[\frac{a_n}{1 + e^{b_n Y^j + c_n}} \right] + d \quad (1.4)$$

Οι συντελεστές a_n, b_n, c_n και d δίνονται στην αναφορά [1]. Η προσέγγιση της Εξ. (1.4) έχει ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος ίση με $\text{RMSE} = 1.667 \times 10^{-5}$.

Παρομοίως για τη φάση βρίσκουμε:

$$\Phi_{\Psi^j_{emp}} = \left(\sum_{n=1}^4 \frac{A_n}{1 + e^{B_n Y^j + C_n}} \right) + D \quad (1.5)$$

Τελικά η εμπειρική λύση δίνεται από:

$$P_{d,emp}^j = \sum_{j=1}^4 -i \frac{1}{L} e^{i \left(kL - \frac{\pi}{4} \right)} D^j |\Psi_{emp}^j| e^{i \Phi_{\Psi^j_{emp}}} . \quad (1.6)$$

2. Εμπειρική λύση διορθωμένη για μικρές συχνότητες

Η Εξ. (1.6) όπως και η Εξ. (0.1) από την οποία προέκυψε δεν είναι έγκυρες για χαμηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα ισχύουν για $\Gamma = k r r_0 / L > 2$. Στον παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται μια εμπειρική λύση που ισχύει για χαμηλότερες συχνότητες. Η λύση προκύπτει ως διόρθωση της Εξ. (1.6) για χαμηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα προτείνεται η πρόσθεση δύο διορθωτικών όρων στο μέτρο και στη φάση του Ψ^j . Η Διορθωμένη μορφή του Ψ^j έχει τη μορφή:

$$\Psi_{ext,emp}^j = \left(|\Psi_{emp}^j| + |\Psi_{corr}^j| \right) e^{i(\Phi_{\Psi_{emp}^j} + \Phi_{\Psi_{corr}^j})}, \quad (2.1)$$

όπου $|\Psi_{corr}^j|$ και $\Phi_{\Psi_{corr}^j}$ οι διορθωτικοί όροι του μέτρου και της φάσης.

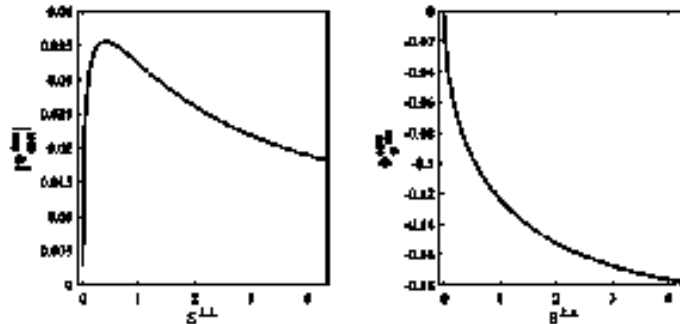
Συγκεκριμένα οι διορθωτικοί όροι ορίζονται ως οι διαφορές μέτρου και φάσης της εμπειρικής [Εξ. (1.6)] από την ακριβή λύση [Εξ. (0.4)]. Έστω ότι η ακριβής λύση

μπορεί να γραφτεί ως $-i \frac{1}{L} e^{i \left(kL - \frac{\pi}{4} \right)} D^j |\Psi_{exact}^j| \Phi_{\Psi_{exact}^j}$, όπου $|\Psi_{exact}^j|$ και $\Phi_{\Psi_{exact}^j}$ το

μέτρο και η φάση της. Τότε οι διορθωτικοί όροι $|\Psi_{corr}^j|$ και $\Phi_{\Psi_{corr}^j}$ δίνονται από:

$$\begin{aligned} |\Psi_{corr}^j| &= |\Psi_{exact}^j| - |\Psi_{emp}^j| \\ \Phi_{\Psi_{corr}^j} &= \Phi_{\Psi_{exact}^j} - \Phi_{\Psi_{emp}^j} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Για δεδομένο Γ και δεδομένη γωνία σφήνας 2Ω οι διαφορές οι διορθωτικοί όροι έχουν τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Διορθωτικοί όροι $|\Psi_{corr}^j|$ και $\Phi_{\Psi_{emp}^j}$ της Εξ. (1.6) για χαμηλές συχνότητες.

Μορφή για σταθερό Γ και σταθερή γωνία σφήνας 2Ω .

Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα (μέσω του Γ) τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η διόρθωση στο μέτρο και στη φάση. Επιπλέον, όσο μεγαλώνει η γωνία της σφήνας τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η διόρθωση. Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν, ύστερα από εκτεταμένη αριθμητική μελέτη, στην παρακάτω εξίσωση:

$$|\Psi_{corr}^j| = A \left(\sqrt[3]{S^j} e^{-BS^j} + C \right) \quad (2.3)$$

$$\Phi_{\Psi_{corr}^j} = \frac{A'}{\sqrt{1 + e^{-Y^j}}}$$

Όπου $A = a_1 \gamma^{b_1} + c_1$, $a_1 = n_1 e^{-\left(\frac{X-n_2}{n_3}\right)^2}$, $b_1 = n_4 X + n_5$, $c_1 = n_6 e^{-X}$, $B = \frac{a_2}{\gamma}$, $a_2 = n_7 e^{-X} + n_8$, $C = a_3 \left(1 / (1 + e^{-\pi \gamma + 4}) - 1/3 \right)$, $a_3 = n_9 e^{-(n_9 X)^2} + n_{10}$, $X = \ln(\Gamma)$. Οι συντελεστές $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8, n_9, n_{10}$ δίνονται στην αναφορά [1].

Τελικά η διορθωμένη για μικρές συχνότητες εμπειρική λύση δίνεται από:

$$P_{d,emp}^j = \sum_{j=1}^4 -i \frac{1}{L} e^{i \left(kL - \frac{\pi}{4} \right)} D^j |\Psi_{ext,emp}^j| e^{i \Phi_{\Psi_{ext,emp}^j}} \quad (2.4)$$

3. Ακρίβεια και υπολογιστικοί χρόνοι των εμπειρικών λύσεων

Σε αυτό το κεφάλαιο η προτεινόμενη λύση συγκρίνεται ως προς την ακρίβεια της με άλλες αντίστοιχες εμπειρικές λύσεις. Η ακρίβεια ορίζεται ως η μέγιστη διαφορά της ηχομείωσης μιας λύσης πίσω από τη σφήνα με την ηχομείωση της ακριβούς λύσης. Η ηχομείωση ορίζεται ως

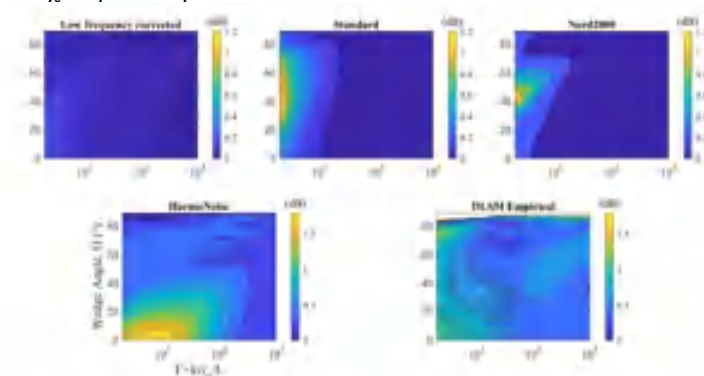
$$IL = -10 \log_{10} \left(\frac{P_d^{rms}(R)}{P_o^{rms}(R)} \right)^2 \quad (3.1)$$

Όπου $P_d^{rms}(R)$ είναι η rms τιμή της περίθλασης πίσω από τη σφήνα ενώ $P_0^{rms}(R)$ η τιμή του ελεύθερου πεδίου. Η μέγιστη διαφορά ηχομείωσης ως προς όλες τις μεταβλητές του προβλήματος μιας εμπειρικής λύσης από την ακριβή λύση ορίζεται ως:

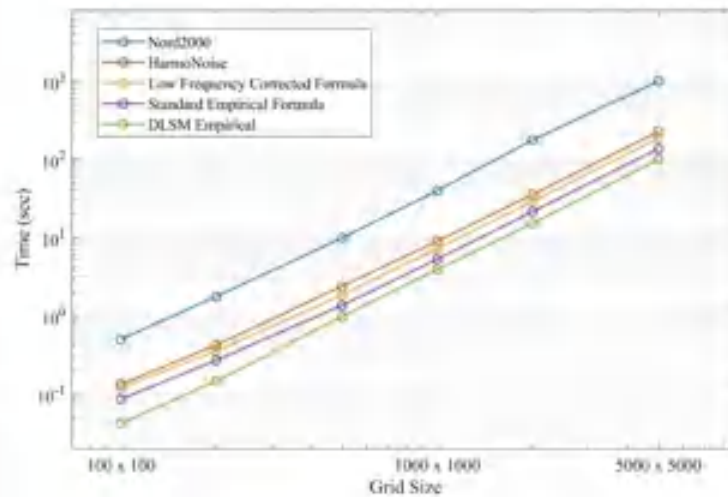
$$err_{IL}^{\max} = |IL_{emp} - IL_{exact}|_{\max} = \left(20 \log_{10} \frac{|P_{exact}^j|}{|P_{d,emp}^j|} \right)_{\max}. \quad (3.2)$$

Στο σχήμα 3.1 συγκρίνονται οι λύσεις Harmonoise[3], η Nord 2000[4], DLSM Empirical[5] (μια παλαιότερη λύση των συγγραφέων) την εμπειρική λύση της εξίσωσης (1.6) (αναφερόμενη ως «standard») και τη διορθωμένη εμπειρική λύση για χαμηλές συχνότητες (αναφερόμενη ως «low frequency corrected formula»). Περιοχές όπου οι διαφορές $err_{IL}^{\max}$ ξεπερνούν τα 1.8dB απεικονίζονται με άσπρο. Από το σχήμα φαίνεται ότι το Nord 2000 και η standard λύση Εξ. (1.6) είναι ακριβέστερες σε σχέση με τις Harmonoise και DLSM Empirical. Η διορθωμένη λύση χαμηλών συχνοτήτων δίνει την ελάχιστη διαφορά $err_{IL}^{\max}$ σε όλες τις συχνότητες. Γενικά έχει βρεθεί ότι η λύση χαμηλών συχνοτήτων είναι έγκυρη για $\Gamma > 0.5$. Για παράδειγμα για $r_s = 0.02m$, $r_R = 1m$, και $z_R = z_s = 0$ η λύση μπορεί να υπολογιστεί με σφάλμα μικρότερο από 0.4dB για συχνότητα τόσο χαμηλή όσο τα 27.5Hz.

Οι λύσεις συγκρίνονται επίσης και ως προς τον υπολογιστικό τους χρόνο. Από το σχήμα 3.2 φαίνεται πως όσο αυξάνονται οι διαστάσεις του μεγέθους του πλέγματος τόσο αυξάνονται οι υπολογιστικοί χρόνοι σε κάθε μια περίπτωση. Η κλίση σε κάθε μία περίπτωση γραφήματος από τα παραπάνω είδη του εκάστοτε θορύβου παραμένει σταθερή και ίση με όλες τις άλλες. Η μεταβολή ως προς το μέγεθος του πλέγματος παραμένει ίδια σε κάθε μία περίπτωση. Για το πιο πυκνό πλέγμα 10000x10000 το Nord2000 θέλει 66min, το Harmonoise θέλει 15min, η διορθωμένη λύση για χαμηλές συχνότητες 12min, η «standard» εμπειρική λύση 9min ενώ η λιγότερο ακριβής DLSM empirical 6.5min. Η ακριβέστερη λύση χαμηλών συχνοτήτων έχει αυξημένο χρόνο σε σχέση με την standard» εμπειρική λύση αλλά όχι περισσότερο από 30%.



Σχήμα 3.1 Μέγιστες διαφορές $err_{IL}^{\max}$ [Εξ. (2.2)] ηχομείωσης εμπειρικών και εμπειρικών λύσεων από την ακριβή λύση.



Σχήμα 3.2 Υπολογιστικοί χρόνοι διάφορων εμπειρικών και ημι-εμπειρικών λύσεων.

References

- [1] P. Menounou, S. Salagas, and P. Nikolaou, "Empirical Formulas for the Prediction of the Diffraction Field around rigid, absorbing, single or multiple Wedges", under Review in Applied Acoustics.
- [2] P. Nikolaou, A. Marketou, S. Salagas, and P. Menounou, "New analytical solution for the calculation of the acoustic diffraction field around a rigid edge in time and frequency domain," Proceedings of the panhellenic conference ACOUSTICS 2024 (2024).
- [3] E. Salomons, D. v. Maercke, J. Defrance, and F. d. Roo, "The Harmonoise Sound Propagation Model," Acust. Acta Acust97, 62-74 (2011).
- [4] B. Plovsing and J. Kragh. "Nord2000. Validation of the propagation model." DELTA Acoustics & Vibration Report (2006).
- [5] Menounou and V. Asimakopoulos, "Empirical formulas for predicting the insertion loss behind wedges," Appl. Acoust. 182, 108166 (2021).



Προβλήματα αποκατάστασης & ηχοπροστασίας στα αρχαία θέατρα της Δ. Ελλάδας & της Ηπείρου

Νίκος Μπάρκας
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση επιχειρεί μια ανάλυση των κοινωνικών & θεατρικών εξελίξεων της ελληνιστικής περιόδου (-4^{ος} / -2^{ος} αιώνας) και τα βασικά χαρακτηριστικά των αρχαίων θεάτρων ελληνιστικού τύπου, σε αναφορά με τον προηγούμενο τύπο της κλασσικής εποχής και τις μετέπειτα ρωμαϊκές επεμβάσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση και τα προβλήματα της σύγχρονης επαναλειτουργίας ενός δείγματος έντεκα (11) αρχαίων θεάτρων στη Δ. Ελλάδα και στην Ήπειρο, στο πλαίσιο μιας μακροχρόνιας έρευνας (από το 2004) που χρηματοδοτήθηκε από ερευνητικό πρόγραμμα του Δ.Π.Θ. σε μεγάλο δείγμα θεατρικών χώρων της αρχαιότητας. Καταγράφονται τα δεδομένα των ηχομετρήσεων της περιόδου 2019 - 24 και αξιολογείται η δυνατότητα επανάχρησης.

Συνοπτικά, κατά την τρέχουσα περίοδο έχουν ενταθεί ή ολοκληρώθηκαν εκτεταμένες εργασίες αποκατάστασης, ενώ παραμένουν οι αστικές πιέσεις και οι κυκλοφοριακοί θόρυβοι που έχουν καταγραφεί στο περιβάλλον των αρχαίων θεάτρων.

Restoration & soundproofing issues in the ancient theaters of Western Greece & Epirus

ABSTRACT

The announcement attempts an analysis of the social & theatrical developments of the Hellenistic period (-4th / -2nd century) and the main characteristics of the ancient Hellenistic-type theaters, in reference to the previous type of the classical era and the later Roman interventions.

Then the current situation and the problems of modern re-operation of a sample of eleven (11) ancient theaters in Western Greece and Epirus are presented, in the context of a long-term research (since 2004) which was funded by a research program of the Democritus University of Thrace, in a large crowd of theaters of antiquity. The results of the sound measurements of the period 2019-24 are recorded and their existing building condition is evaluated.

In summary, extensive restoration works have been intensified or completed during the current period, while the urban pressures and the traffic noises recorded in the surroundings of the ancient theaters remain.

Εισαγωγή

Η ήττα των Αθηναίων στον πελοποννησιακό πόλεμο (-404) σήμανε την απαρχή μιας ταραχώδους πολιτικής - στρατιωτικής περιόδου περίπου 2,5 αιώνων, μέχρι την ολοσχερή κατάλυση της ανεξαρτησίας των ελληνικών πόλεων και την ενσωμάτωση τους στη ρωμαϊκή επικράτεια. Χαρακτηρίζεται από τη σύντομη εμφάνιση, ακμή και παρακμή διαδοχικών ηγέτιδων δυνάμεων, δηλαδή την επικράτηση ενός πολυπολιτισμού στα ελληνικά πράγματα :

-404/3, εγκατάσταση και πτώση του καθεστώτος των «τριάκοντα τυράννων» στην Αθήνα

-371, νίκη των Θηβαίων εναντίον των Σπαρτιατών στα Λεύκτρα

-370, συνένωση των ηπειρωτικών φυλών

-362, τελική συντριβή των Σπαρτιατών από τους Θηβαίους στη Μαντινεία

-350 (περίπου), ίδρυση της Αιτωλικής Συμπολιτείας

-338, νίκη των Μακεδόνων εναντίον συνασπισμένων ελληνικών πόλεων στη

Χαιρώνεια

-335, ολοσχερής καταστροφή της Θήβας από τους Μακεδόνες

-331, νίκη των Μακεδόνων εναντίον των Σπαρτιατών στη Μεγαλόπολη

-323, θάνατος του Αλέξανδρου, διαίρεση των κατακτήσεων στα επιγονικά

basíleia

-307/2, εκστρατεία των Ηπειρωτών στη Ν. Ιταλία & τη Σικελία

-280, ίδρυση της Αχαϊκής Συμπολιτείας

-272, εκστρατεία των Ηπειρωτών στη Ν. Ελλάδα, θάνατος του Πύρρου στο

Αργος

-233, ίδρυση του Κοινού των Ηπειρωτών

-218, καταστροφή του Θέρμου από τους στρατούς Ηπειρωτών & Μακεδόνων

1. Το θέατρο της ελληνιστικής εποχής

Όσον αφορά το θέατρο, η αναπόφευκτη διάλυση του ταμείου των αθηναϊκών συμμαχιών κατέστησε δυσβάσταχτα τα οικονομικά βάρη της οργάνωσης των δραματικών αγώνων. Στις νικητήριες πλάκες, ο ποιητής παραγκωνίστηκε από τον χορηγό και τον πρωταγωνιστή. Η συμμετοχή του χορού αποδυναμωνόταν σταδιακά, για να αναζητηθεί η θεαματικότητα και η πολύπλοκη δράση.

Η ανάπτυξη της σκηνικής ανωδομής (το επισκηνίο), με το λογείο στον όροφο και το θεολογείο στη στέγη του αθηναϊκού θεάτρου του Διόνυσου (τέλη του -5^{ου} αιώνα) καθόρισε τη μορφή των υπολοίπων θεάτρων που οικοδομήθηκαν στη διάρκεια του -4^{ου} αιώνα. Η στασιμότητα στα πολιτιστικά πράγματα των Αθηνών οδήγησε στην εξιδανίκευση του κλασικού προτύπου. Πολυάριθμα έργα δεκάδων συγγραφέων παρουσιάστηκαν σε τοπικούς θεατρικούς αγώνες ή παραστάσεις ευγενών χορηγών. Όμως τα ελάχιστα αποσπάσματα που σώθηκαν από εκείνη την ογκώδη δραματική παραγωγή, είναι η απόδειξη της αδυναμίας εξέλιξης της θεατρικής τέχνης κατά τους ελληνιστικούς χρόνους, εξαιτίας της προσήλωσης στο κλασικό πρότυπο. Οι διάσημοι ηθοποιοί υποδύονταν φημισμένους δραματικούς ήρωες με συρραφή αποσπασμάτων από έργα της κλασικής εποχής. Οι συγγραφείς περιόριζαν τη συμμετοχή του χορού για προβάλλουν τους υποκριτές. Οι συντεχνίες των ηθοποιών εξασφάλιζαν υπέρογκες αμοιβές, διπλωματικές ασυλίες και προνόμια. [1]

Το θέατρο έγινε το απαραίτητο δημόσιο οικοδόμημα κάθε μικρής ή μεγάλης πόλης που, ανάλογα με την περίοδο της οικοδόμησης ή της ανακατασκευής, ενσωμάτωνε στο θεατρικό χώρο τις αντίστοιχες εξελίξεις στο Διονυσιακό θέατρο. Με αυτό τον τρόπο, ο θεατρικός σχεδιασμός απέκτησε πολύ-κεντρικότητα, μια κοινή αφετηρία και επιμέρους δημιουργικές αναπροσαρμογές. Πρόκειται για ένα σύνολο εφαρμογών που συγκλίνει στον τύπο του ελληνιστικού θεάτρου. Το επίπεδο στάσης των υποκριτών υψώθηκε σταδιακά πάνω από την ορχήστρα, καθιστώντας προβληματική την επικοινωνία με το χορό και διασπώντας την ενότητα του θεατρικού χώρου. Το αμφιθέατρο απέκτησε μεγαλύτερη κλίση και απέκτησε σχήμα σφενδόνης, ώστε να διευκολυνθεί η οπτική επαφή με τη σκηνή που μετατράπηκε σε λίθινο, πολυώροφο κτίριο. Τελικά, η θεατρική δράση συγκεντρώθηκε στην (αρχικά ξύλινη και λυόμενη) εξέδρα του προσκήνιου.

Στα τέλη της ελληνιστικής εποχής (-2^{ος} αιώνας) κυριάρχησε η λαϊκή σάτιρα του μμο-θέατρου. Συχνά οι περιοδεύοντες θίασοι καταργούσαν τελείως τα χορικά, ή περιορισμένος αριθμός μελών χορού συνωθούνταν στην εξέδρα του προσκήνιου κατά της επαναλήψεις έργων της κλασικής εποχής (με εξαίρεση το αθηναϊκό θέατρο) ψάλλοντας κατ' εκτίμηση ορισμένα στάσιμα. Αυτές οι θεατρικές αλλαγές προετοίμασαν την κυοφορία της μορφής του ελληνο-ρωμαϊκού τύπου, που στόχευε στην παράλληλη εξυπηρέτηση της κλασικής θεατρικής παραγωγής, αλλά και αθλητικών ή γυμναστικών θεαμάτων. Η νέα μορφή εντοπίζεται για πρώτη φορά στη Δήλο (-250) και φέρει εμφανείς μετατροπές που εκ των υστέρων υιοθετήθηκαν από τους Ρωμαίους. [2], [3] Ήταν μια περίοδος ραγδαίας παρακμής για τα ελληνικά πράγματα:

- 189, υποταγή της Αιτωλικής Συνομοσπονδίας στη Ρώμη
- 168, νίκη των Ρωμαίων εναντίον των Μακεδόνων στην Πύδνα
- 167, κατάλυση του Κοινού των Ηπειρωτών από τους Ρωμαίους
- 148, κατάλυση του Βασιλείου των Μακεδόνων από τους Ρωμαίους
- 146, κατάλυση της Αχαϊκής Συμπολιτείας και εκθεμελίωση της Κορίνθου από τους Ρωμαίους

-31, ναυμαχία στο Άκτιο, ίδρυση της Νικόπολης από τον αυτοκράτορα Οκταβιανό, αναγκαστική μετοίκηση των κατοίκων από γειτονικές πόλεις.

Η θεατρική τέχνη απεκδύθηκε τη μορφωτική αποστολή της. Τα θέατρα περιόρισαν τη χωρητικότητά και απευθυνόταν στη διασκέδαση των ανωτέρων τάξεων. Η ορχήστρα κατατμήθηκε, στο πίσω ημικόκλιο τοποθετούνταν τα κινητά καθίσματα των ευγενών, ενώ το μπροστά κατέλαβε η εξέδρα του προσκήνιου, η οποία παρεμβλλόταν ανάμεσα στην ορχήστρα και την περίτεχνα διακοσμημένη σκηνική πρόσοψη. Τα άκρα της σκηνής προσέγγισαν τα αναλήμματα του κοίλου, καταργώντας τις παρόδους, οπότε την πρόσβαση στο θέατρο εξυπηρετούσαν εξωτερικές κλίμακες.

2. Η περίοδος της ρωμαϊκής κυριαρχίας

Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου σκληρής κατοχής (-2^{ος} / -1^{ος} αιώνας), οπότε οι ελληνικές πόλεις αναγκάστηκαν να υιοθετήσουν τα θεάματα των κατά τόπους ρωμαϊκών φρουρών, πολλά ελληνιστικά και ελληνο-ρωμαϊκά θέατρα υπέστησαν προσαρμογές, είτε για να φιλοξενήσουν ταυτόχρονα θεατρικές και γυμναστικές επιδείξεις, είτε για να μετατραπούν σε αρένες, παλαίστρες ή δεξαμενές για αναπαραστάσεις ναυμαχιών. Αυτές ανακατασκευές και οι διαδοχικές, πρόχειρες,

οικοδομικές φάσεις, όπως η προσθήκη διαζωμάτων και κερκίδων, η κατάργηση των χαμηλών βαθμίδων και η μεταφορά των τιμητικών θέσεων στην 4^η / 5^η σειρά, για να διευκολυνθεί η οπτική επαφή με υπερυψωμένο προσκήνιο, αποδιοργάνωσε τους θεατρικούς χώρους, διαστρέβλωσε τις σχέσεις των λειτουργικών στοιχείων και κυρίως περιόρισε τις δυνατότητες του οπτικού / ακουστικού σχεδιασμού. [4]

Με τη συστηματική επέκταση ενός ανυψωμένου προσκήνιου στο εσωτερικό της ορχήστρας, το παλιό, ισόγειο προσκήνιο είτε ενσωματώθηκε ως υποσκήνιο στο κτίριο της σκηνής (με την προσθήκη ενός συμπαγούς τοίχου στην πρόσοψη), είτε με αφαίρεση των διακοσμητικών στοιχείων της πρόσοψης και χτίσιμο των μεσοκίωνων διαστημάτων μετατράπηκε σε πίσω τοίχο του νέου προσκήνιου.

Πρόκειται για μια ιστορική καμπή που δείχνει ότι, κατά τη ρωμαϊκή κυριαρχία τερματίζονται οι προσπάθειες για τη δημιουργική αξιοποίηση των προηγούμενων οικοδομικών περιόδων. Με ελάχιστες εξαιρέσεις, η αυθεντική αρχιτεκτονική του ρωμαϊκού θεάτρου εμφανίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη Δύση και σε ορισμένες ανατολικές επαρχίες της αυτοκρατορίας. Το δυστύχημα της σύγχρονης τάσης προστασίας των αρχαίων ελληνικών θεάτρων είναι η αποκατάσταση αυτών, των μη-θεατρικών ρωμαϊκών παρεμβάσεων, με κραυγαλέο παράδειγμα τη συστηματική αναστύλωση και συμπλήρωση του περιμετρικού θωράκιου για τη διεξαγωγή θηριομαχιών στην ορχήστρα.

3. Τα θέατρα του δείγματος

Τα θέατρα της Ηπείρου και της Δ. Ελλάδος χαρακτηρίζονται από ορισμένες ιδιομορφίες που οφείλονται αφενός στην γεωγραφική απομόνωση που οδήγησε στη χρονική σύμπτυξη διαφόρων οικοδομικών φάσεων, σε σχέση με τα μεγάλα αστικά κέντρα της αρχαιότητας και αφετέρου στην καθυστερημένη έναρξη των εργασιών ανάδειξης και προστασίας, σε σχέση με άλλες περιοχές της ελλαδικής επικράτειας, με εξαίρεση τις εργασίες αποκατάστασης του θεατρικού χώρου της Δωδώνης από τον Κ. Καραπάνο (1875).

Ωστόσο, παρά τις εμφανείς ομοιότητες που εντοπίζονται στη μορφή και στα λειτουργικά στοιχεία ορισμένων εξ αυτών, τα θέατρα παρουσιάζουν και αποκλίσεις, κατάσταση που δεν επιτρέπει τη θεώρηση ενός ιδιαίτερου θεατρικού τύπου. Άλλωστε από τους 11 χώρους του δείγματος, τρεις εξυπηρετούσαν παράλληλα και πολιτικές / στρατιωτικές εκδηλώσεις (Στράτος, Καλυδώνα, Μακύνεια), ένας ανήκε σε ιερό (Δωδώνη), ένας ανήκει στη ρωμαϊκή εποχή (Νικόπολη) και τέλος για το μικρό θέατρο της Αμβρακίας δεν υπάρχουν δεδομένα θεατρικής λειτουργίας

3.1. Το θέατρο της Δωδώνης

Κατά την περίοδο της βασιλείας του Πύρρου (-3^{ος} αιώνας), η Ήπειρος εξελίχθηκε σε ισχυρό κράτος και ηγετική δύναμη στον ελλαδικό χώρο. Μεταξύ άλλων, ανακαινίστηκε το μαντείο και οικοδομήθηκε το θέατρο της Δωδώνης, όπου οργανωνόταν δραματικοί αγώνες και παρουσιαζόταν έργα της κλασσικής εποχής.

Το θέατρο χτίστηκε στη Δ πλαγιά ενός λόφου, με άνοιγμα εγκάρσια στην μακρόστενη κοιλάδα της Δωδώνης. Η ορχήστρα έχει ακτίνα 9,35μ. με πλακόστρωτη ζώνη (πλάτους περίπου 1,5μ) και αγωγό απορροής μπροστά από το κοίλο, το οποίο ακολουθεί τόξο 235 μοιρών, με 3 οριζόντια διαζώματα και 9 ακτινωτές κερκίδες (που διπλασιάζονται στο πάνω διάζωμα). Είχε συνολικά 55 σειρές βαθμίδων, (20, 15 και 20 αντίστοιχα), κατασκευασμένες με λίθους χωρίς συνδετικό κονίαμα, εκ

των οποίων οι 3 χαμηλότερες αποδομήθηκαν για να χτιστεί το προστατευτικό θωράκιο της ρωμαϊκής αρένας (ύψος περίπου 1,5μ). Για να παραληφθούν οι εδαφικές ωθήσεις στα πλευρικά και πίσω τμήματα του κοίλου χτίστηκαν αναλληματοί τοίχοι, με πύργους και προεξοχές.

Σε απόσταση 14,9μ μπροστά από το κοίλο σώθηκαν τα ερείπια ενός τοίχου με πύλη (στα αριστερά της βρέθηκαν ίχνη από εσωτερική, ξύλινη σκάλα, η οποία μάλλον οδηγούσε στον όροφο της σκηνής), με συμπαγή τοιχώματα εκατέρωθεν και τα θεμέλια από τις προβολές των παρασκηνίων, στη νοητή ευθεία των οποίων εντοπίστηκαν 4 κίονες ιωνικού ρυθμού και πιο μπροστά, 6 μεγάλες οπές σε κανονικά διαστήματα για τη θεμελίωση της ξύλινης εξέδρας του προσκήνιου, δηλαδή μια διαμόρφωση αντίστοιχη της κλασσικής εποχής, στο αθηναϊκό θέατρο του Διόνυσου, με καθυστέρηση περίπου 2 αιώνων.

Ύστερα από την εισβολή των Αιτωλών (-219) και την καταστροφή της σκηνής, σε μια σύντομη περίοδο νέας ακμής του ιερού, κατασκευάστηκε ο άνω οριζόντιος διάδρομος, το στηθαίο ασφαλείας και οι πύλες για την περιμετρική κυκλοφορία. Για χωρέσει το στάδιο Δ του θεάτρου, τροποποιήθηκαν συμμετρικά οι πάροδοι, αποκτώντας γωνιακό σχήμα και λίθινα πρόπυλα (3 κίονες με 2 ανοίγματα, εγκάρσια στον άξονα του κοίλου). Στις άκρες της νέας λίθινης εξέδρας του προσκήνιου, στο ύψος ενός ορόφου, με 17 ιωνικά ημικίονα στην όψη που προστατευόταν από τη δίρριχτη στέγη του κτιρίου της σκηνής, διαμορφώθηκαν 2 ακόμη πλευρικές βοηθητικές αίθουσες. [5], [6]

Με απόφαση της ρωμαϊκής συγκλήτου (-168) το ιερό της Δωδώνης πυρπολήθηκε και μάλλον ερήμωσε πρόσκαιρα. Ακολούθησε η πρόχειρη κατασκευή μιας ρωμαϊκής παλαίστρας και τελικά το θέατρο καταστράφηκε κατά τον 1^ο Μιθριδατικό πόλεμο (-86). Την περίοδο της αυτοκρατορίας (μετά τον 1^ο αιώνα) λειτούργησε πάλι, μάλλον αποκλειστικά για ρωμαϊκά θεάματα και έκλεισε οριστικά με το καταστρεπτικό διάταγμα του Θεοδόσιου (393).

Το θέατρο της Δωδώνης είναι από τους πρώτους θεατρικούς χώρους όπου οργανώθηκαν (τη δεκαετία του '60) σύγχρονες παραστάσεις αρχαίου δράματος. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον (άνεμος / πουλιά 42 dB[A]) με πολύ χαμηλό θόρυβο βάθους (28dB[A]). Απολαμβάνει ακόμη (όπως το θέατρο της Δήλου) ένα ήσυχο ηχητικό περιβάλλον, με ελάχιστες ανθρωπογενείς οχλήσεις (επισκέπτες, αγροτικές εργασίες από 50 ως 60 dB[A]), ενώ χάρη στη διόρθωση μιας αρχικά καταστροφικής χάραξης, η εγγύς οδική κυκλοφορία από τη νέα Εγνατία Οδό δεν επηρεάζει το θεατρικό χώρο.

3.2 Το θέατρο των Γιτώνων

Τα Γίτανα ήταν αρχαία πόλη της Θεσπρωτίας. Το θέατρο βρίσκεται στα όρια του αρχαίου οικισμού, κάτω από την ακρόπολη, περιβάλλεται από παραπόταμο του Καλαμά και μέχρι να ξεκινήσουν οι προγραμματισμένες εργασίες προστασίας, είναι ανοικτό μόνο για επίσκεψη.

Οι ανασκαφές (από το 1996) έφεραν στο φως την ορχήστρα, τα ερείπια των θεμελίων της σκηνής, καθώς και τμήμα του κοίλου, το οποίο φαίνεται ότι κτίστηκε εξ αρχής λίθινο, εκτός από μικρό τμήμα που λαξεύτηκε στη βραχώδη πλαγιά. Το άνοιγμα του κοίλου είναι Δ, προς το ποτάμι. Βρέθηκε σε σχετικά καλή κατάσταση, εκτός από τις ακραίες κερκίδες και τα ακριανά αναλήμματα. Στην υφιστάμενη κατάσταση εμφανίζεται ως τόσο μικρότερο του ημικυκλίου, με 2 διαζώματα, 28 βαθμίδες σε 5 κερκίδες και 4 ακτινωτές κλίμακες. Στην πρόσοψη του κοίλου είχαν

κατασκευαστεί 2 πολυγωνικοί αναλληματοί πύργοι, ενώ τα εδώλια των βαθμίδων σχηματίζονται με ορθογώνιους λίθους.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα του θεάτρου είναι η διείσδυση των υδάτων κατά τις υπερχειλίσεις του Καλαμά, όταν καταλαμβάνουν τις πρώτες βαθμίδες του κοίλου. Επίσης, η αποσάθρωση του ασβεστολιθικού υποβάθρου της πλαγιάς από τα υπόγεια ύδατα και την αποστράγγιση του λόφου, επιφέρει σταδιακά ανισορροπία στο κοίλο και μετατοπίσεις των βαθμίδων. [7]

Χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος (χαμηλός θόρυβος βάθους 29 dB [A]). είναι η ανεπαίσθητη η ροή του ποταμού (σε ελάχιστη απόσταση πίσω από τη σκηνή), με θορύβους της φύσης (πουλιά 41dB[A], άνεμος 50dB[A]) και σποραδικές αγροτικές εργασίες (38 - 40 dB[A]) πίσω από το λόφο της ακρόπολης.

3.3 Το θέατρο της Κασσώπης

Η αρχαία Κασσώπη βρέθηκε στις νότιες υπώρειες του Ζάλογγου, σε φυσικά οχυρή θέση (στα σημερινά όρια του νομού Πρέβεζας). Το θέατρο κατασκευάστηκε τον -3ο αιώνα κάτω από την ακρόπολη και εμφανίζει μεγάλη τυπολογική ομοιότητα με το (πιθανά σύγχρονο του) θέατρο της Δωδώνης. Κατά την τρέχουσα περίοδο είναι ανοικτό μόνο για επισκέψεις, μέχρι να ολοκληρωθούν οι εργασίες προστασίας.

Το κοίλο είχε πολυγωνικά αναλήμματα, περιμετρικό τοίχο με ανοίγματα στη στέψη, 2 διαζώματα (23 και 11 βαθμίδες αντίστοιχα, με εδώλια από ασβεστόλιθο), 10 κερκίδες (οι δύο ακρινές μισού πλάτους) και 11 ακτινωτές κλίμακες.

Η σκηνή ήταν ορθογώνια με δύο παρασκήνια, εκατέρωθεν του προσκήνιου που διέθετε 6 κίονες στην πρόσοψη και θεμελίωση για πιθανές ράμπες προς τις παρόδους και τις 2 κύριες οδούς της αρχαίας πόλης. Η ορχήστρα έχει διάμετρο 16 μ. περίπου, χωμάτινο δάπεδο και περιμετρικό αγωγό απορροής των ομβρίων με καλυπτήριες λίθινες πλάκες. [8]

Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον (θόρυβος βάθους 34dB[A]) με άνεμο/ πουλιά 46 dB[A] και εργασίες στο εργοτάξιο 60 dB[A].

3.4 Το μικρό θέατρο της Αμβρακίας

Το λεγόμενο μικρό θέατρο της Αμβρακίας, σε αντιδιαστολή με το μεγάλο που έχει καταστραφεί, βρέθηκε καταχωμένο ανάμεσα σε πολυκατοικίες, σε κεντρικό οικόπεδο της Άρτας (1976). Κατασκευάστηκε την περίοδο της βασιλείας του Πύρρου (μέσα -3^{ου} αιώνα) και λόγω μεγέθους, μάλλον λειτουργούσε ως ωδείο ή βουλευτήριο.

Αποκαλύφθηκε η ορχήστρα (με διάμετρο 6,7μ.) επιστρωμένη με ασβεστολιθικές πλάκες, εντός της οποίας εισχωρούσε κατά 2μ το προσκήνιο, του οποίου σώζεται τμήμα του στυλοβάτη. Το κοίλο είχε Ν άνοιγμα και 3 κερκίδες (σώζονται 4 βαθμίδες στην κεντρική και 3 βαθμίδες στις πλάγιες), με εδώλια από ασβεστόλιθους. [9]

Ο χώρος παραμένει περιφραγμένος, επηρεάζεται από τις δραστηριότητες του αστικού περιβάλλοντος (58-61dB[A]) και εμφανίζει υψηλό θόρυβο βάθους 40dB[A] ακόμα και σε μέρες αργίας.

3.5 Το ρωμαϊκό θέατρο της Νικόπολης

Η αρχαία Νικόπολη βρίσκεται περίπου 6χλμ έξω από την Πρέβεζα. Ιδρύθηκε, σε ανάμνηση της νίκης του Οκταβιανού στο Άκτιο (-31) και εποικίσθηκε ύστερα από τη βίαιη μετακίνηση των κατοίκων από τους οικισμούς της ευρύτερης περιοχής.

Το θέατρο βρέθηκε έξω από τα ΒΑ τείχη της αρχαίας πόλης, στη συμβολή της παλιάς εθνικής οδού Φιλιππιάδας - Πρέβεζας με επαρχιακή οδό. Το κοίλο έχει ΝΔ άνοιγμα, κτισμένο κατά τα ρωμαϊκά πρότυπα σε φυσικό πρανές και σε λίθινο τοξωτό υπόβαθρο. Χωριζόταν σε 3 διαζώματα, με περιμετρική στοά στη στέψη και είχε ημικυκλική ορχήστρα επιστρωμένη με μαρμάρινες και ασβεστολιθικές πλάκες. Το κτίριο της σκηνής (μήκος 37μ. και ύψος 12 μ.) διέθετε την τυπική ρωμαϊκή πρόσοψη (scaenae frons) και προσκήνιο (βάθους 8μ) με παρασκήνια ορθογώνιας κάτοψης. [10]

Υπέστη εκτεταμένες φθορές από το χρόνο και τη συστηματική λιθοθηρία. Στο παρελθόν φιλοξένησε ευκαιριακά θεατρικές εκδηλώσεις, ενώ κατά την τρέχουσα περίοδο συνεχίζονται εντατικά οι εργασίες αποκατάστασης. Βρίσκεται πλέον σε ημι-αστικό περιβάλλον (θόρυβος βάθους 33dB[A] και επηρεάζεται από τη βαριά οδική κυκλοφορία (59 - 68dB[A]) και τις εργασίες του εργοταξίου (70dB[A]),

3.6. Το θέατρο της Στράτου

Το αρχαίο θέατρο της Στράτου, με ΝΔ άνοιγμα προς τον Αχελώο, βρίσκεται δίπλα στα τείχη της οχύρωσης, στην κατασκευή της οποίας συνέδραμαν οι Μακεδόνες (-4^{ος} αιώνας). Η αρχαία πόλη ήταν χώρος συγκέντρωσης και κατάταξης στρατιωτών του Κοινού των Ακαρνανών, αλλά εγκαταλείφθηκε βιαίως μετά την κατάκτηση των Ρωμαίων, προς όφελος του εποικισμού της Νικόπολης (-1^{ος} αιώνας).

Ο θεατρικός χώρος έχει υποστεί εκτεταμένη λιθοθηρία και κινδυνεύει με κατολίσθηση. Το κοίλο έχει 1 ενιαίο διάζωμα, με 2 σωζόμενες (από τις συνολικά περίπου 11) κερκίδες και περίπου 33 εμφανείς σειρές βαθμίδων. Τα ακριανά αναλήμματα του κοίλου έχουν καταστραφεί. Σώζονται εδώλια από ψαμμίτη και τα καθίσματα της προεδρίας από άσπρο ασβεστόλιθο, στην 1^η σειρά. Η ορχήστρα (με διάμετρο περίπου 15μ) περιβάλλεται στο τόξο του κοίλου από διάδρομο (1,5μ περίπου) με σκεπαστό αγωγό απορροής, που συνεχίζεται υπογείως κατάντι. Στα ερείπια της σκηνής αναγνωρίστηκαν 3 οικοδομικές φάσεις (-4^{ος}, -3^{ος} και -2^{ος} αιώνα). Αρχικά η σκηνή ήταν ισόγεια, με ανοικτή πρόσοψη. Στην επόμενη ανακατασκευή προστέθηκε στεγασμένη κιονοστοιχία, με λογείο στον όροφο. Στην τελική φάση οικοδόμησης, απέκτησε παρασκήνια και πιθανά κεκλιμένες ράμπες.[11]

Κατά την τρέχουσα περίοδο, ο θεατρικός χώρος παραμένει κλειστό, μέχρι να ξεκινήσουν εργασίες προστασίας και στερέωσης. Το περιβάλλον είναι ημι-αγροτικό (εγκαταλειμμένες αγροτικές εγκαταστάσεις), με θόρυβο βάθους 34dB[A]. Θορύβους της φύσης (42dB[A]) και τον απόηχο της κυκλοφορίας στην επαρχιακή οδό Κουβαρά - Αγρινίου (44dB[A]).

3.7. Το θέατρο των Οινιάδων

Η αρχαία πόλη των Οινιάδων βρίσκεται κοντά στις εκβολές του Αχελώου. Σύμφωνα με τον E. Fiechter το θέατρο της κατασκευάστηκε στα μέσα του -4^{ου} αιώνα στη Ν πλευρά του περιτειχίσματος, πάνω από τους νεωσοίκους της τότε κοίτης του ποταμού. Τον -3^ο αιώνα η ισόγεια σκηνή απέκτησε όροφο και προσκήνιο με παρασκήνια στα πλάγια, από τα οποία σώζονται μόνο ερείπια των θεμελίων.

Μετά τις ρωμαϊκές επεμβάσεις, το κέντρο της ορχήστρας η οποία είχε ακτίνα περίπου 8μ, χωμάτινο δάπεδο με λίθινο περίγραμμα, και αγωγό απορροής, μετατοπίστηκε σε σχέση με τον άξονα του κοίλου, το οποίο είχε ΝΔ άνοιγμα, ενιαίο διάζωμα (11 κερκίδες με 12 κλίμακες) και μάλλον 30 βαθμίδες (εκ των σώζονται 19 σειρές). [12], [13]

Από το 1986 πραγματοποιήθηκαν τακτικά θεατρικές παραστάσεις. Κατά την τρέχουσα περίοδο παραμένει κλειστό για ανασκαφές στην ορχήστρα και τη σκηνή (67 dB[A]). Το περιβάλλον είναι φυσικό, με θόρυβο βάθους 31 dB[A]. Ο θεατρικός χώρος είναι προφυλαγμένος από τις σύγχρονες αγροτικές δραστηριότητες στην αντίπερα πλευρά του λόφου της ακρόπολης (απόηχος 37 dB[A]).

3.8. Το θέατρο της Πλευρώνας

Βρίσκεται περίπου 5χλμ ΒΔ του Μεσολογγίου. Κατασκευάστηκε σε επαφή με το Δ περιτείχισμα της αρχαίας πόλης, στα τέλη του -3^{ου} αιώνα (-235/4).

Μελετήθηκε από τον Ε. Fiechter και θεωρείται πως αρχικά ήταν μάλλον βουλευτήριο. Πρόκειται για σχετικά μικρό θέατρο, με περιορισμένο χώρο πίσω από την ορχήστρα (ακτίνας 5,8μ). Αυτή η στενότητα οδήγησε στην οικοδόμηση του κτιρίου της σκηνής σε επαφή με την οχύρωση, η οποία μάλλον ενισχύθηκε με ενδιάμεσο πρόσθετο, εξωτερικό αναλληματικό πύργο, όταν αυτή διαμορφώθηκε τελικά με όροφο και προσκήνιο. [14], [15]

Το θέατρο βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον (άνεμος 41 dB[A]), με επιρροή τον απόηχο της κυκλοφορίας (κατάντι) από τη νέα και την παλιά εθνική οδό (38 dB[A]) και χαμηλό θόρυβο βάθους (34 dB[A]). Στο παρελθόν φιλοξενήθηκαν ευκαιριακές παραστάσεις, αλλά κατά την τρέχουσα περίοδο παραμένει απροσπέλαστο, λόγω γενικευμένων εργασιών στερέωσης και διαμόρφωσης των προσβάσεων.

3.9. Το θέατρο της Καλυδώνας

Η Καλυδόνα υπήρξε αστικό κέντρο της αρχαίας Αιτωλίας, μέχρι τη βίαια μετοίκηση των κατοίκων στη Νικόπολη. Το θέατρο της (οικοδόμημα του -4^{ου} αιώνα) έχει χαρακτηριστικά ορθογώνια ορχήστρα (16 * 14 μ) και κοίλο, σύνθεση που παραπέμπει σε πρώτη ή κοινή χρήση βουλευτηρίου (όπως η γειτονική Μακόνεια).

Το κοίλο, με Ν άνοιγμα, είχε περίπου 26 ως 30 βαθμίδες, σε ενιαίο διάζωμα στις 3 πλευρές της ορχήστρας, χωρίς κλίμακες. Οι 9 χαμηλότερες βαθμίδες και η ισόγεια ορθογώνια σκηνή (3 δωμάτια και κεντρικό θύρωμα, διατηρούνται μόνο ερείπια των θεμελίων), ανήκουν στην πρώτη φάση. Οι υψηλότερες βαθμίδες ακολουθούν την ευθύγραμμη χάραξη, αλλά με καμπύλες συναρμογές στις γωνίες και οικοδομήθηκαν αργότερα, όπως ο όροφος της σκηνής και το προσκήνιο. [16]

Ο θεατρικός χώρος ανακαλύφθηκε κατά τη διάνοιξη της παλιάς εθνικής οδού (1967, κοντά στο Ευηνοχώρι), περίπου 50μ. ανάντι της σκηνής. Βρίσκεται σε ημιαστικό περιβάλλον με χαμηλό θόρυβο βάθους (32 dB[A]). Επηρεάζεται από την τοπική οδική κυκλοφορία (50 dB[A]) και ευκαιριακά έχει φιλοξενήσει παραστάσεις.

3.10. Το θέατρο της Μακόνειας

Το θέατρο της αρχαίας Μακόνειας είναι λαξευμένο σε βραχώδη πλαγιά με ΝΑ προσανατολισμό προς τον πατραϊκό κόλπο. Η ιδιόμορφη σύνθεση του χώρου παραπέμπει σε κάποιο είδος βουλευτηρίου, που μάλλον θα αποτέλεσε αρχική ή συμπληρωματική λειτουργία του.

Το κοίλο έχει σχήμα καμπύλου τόξου και 1 ενιαία κερκίδα με περίπου 14 βαθμίδες, χωρίς αναλήμματα, κλίμακες ή διάζωμα. Η ορχήστρα έχει επίσης σχήμα καμπύλου τόξου και περικλείεται στη Β πλευρά της από 3 ευθύγραμμες βαθμίδες με διακεκριμένες θέσεις και λίθινο θρόνο μπροστά από το Α άκρο της προεδρίας. Από το κτίριο της σκηνής (ισόγειο στην όψη, ημι-ισόγειο με όροφο στην κατωφέρεια) διασώζονται μόνο ερείπια, τα όρια των παρόδων και η θεμελίωση του προσκηνίου,

καθώς μεγάλο μέρος της σκηνής κατέρρευσε στην απότομη πλαγιά κατάντι ή αφαιρέθηκε για λιθοθηρία. [17]

Ο θεατρικός χώρος είναι επισκέψιμος και χρησιμοποιήθηκε ευκαιριακά για θεατρικές εκδηλώσεις. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον, όπου κυριαρχεί ο απόηχος της οδικής κυκλοφορίας στην παλιά και νέα εθνική οδό (48 dB[A]), αλλ' επίσης παρενοχλείτε ΒΑ ανάντι από την εγκατάσταση Α/γεννητριών σε απόσταση περίπου 700μ (42 dB[A]).

3.11. Το θέατρο της Συκιώνας

Η αρχαία Συκιώνα βρίσκεται σε λόφο που δεσπόζει στον Κορινθιακό, πάνω από το σημερινό Κιάτο. Παραδοσιακή σύμμαχος της Σπάρτης, κατελήφθη διαδοχικά στη διάρκεια του 4^{ου} αιώνα από τους Θηβαίους, τους Μακεδόνες και τον Πτολεμαίο Α' της Αιγύπτου. Απελευθερώθηκε από τον Δημήτριο Πολιορκητή (-303) και άκμασε (-2^{ος} αιώνας) προσχωρώντας στην Αχαϊκή Συμπολιτεία. Εξελίχθηκε σε κυρίαρχη πόλη μετά την καταστροφή της Κορίνθου (-146), αλλά τελικά χρεοκόπησε (-1^{ος} αιώνας) και παράκμασε.

Το θέατρο της πόλης είχε ΒΑ άνοιγμα, ορχήστρα ακτίνας περίπου 12μ (η οποία περιορίστηκε σε ημι-κύκλιο κατά τη ρωμαϊκή μετατροπή), με χωμάτινο δάπεδο και περιμετρικό αγωγό απορροής, που κατέληγε πίσω από το κτίριο της σκηνής. Το κοίλο (περιμετρική διάμετρος περίπου 125μ.) είχε 3 διαζώματα και συνολικά 60 βαθμίδες με λίθινα εδώλια. Το κάτω διάζωμα είχε 15 κερκίδες χωρισμένες με 16 κλίμακες (σώζονται περίπου 8 βαθμίδες). Η σκηνή ήταν διώροφη, με προσκήνιο, παρασκήνια και κεκλιμένες ράμπες προς τις παρόδους.

Μοναδικό δείγμα περιμετρικής διευθέτησης της κυκλοφορίας αποτελούν οι θολωτές δίοδοι στο μεσαίο διάζωμα (βούτες, μήκους 16μ, εκ των οποίων η δυτική χρειάζεται στερέωση) που εξασφάλιζαν την προσπέλαση των θεατών πίσω από το θέατρο και εξουδετέρωναν καθυστερημένες ηχοανακλάσεις από τις άκρες του κοίλου. [18]

Κατά την τρέχουσα περίοδο ο χώρος είναι κλειστός, αναμένοντας την έναρξη των εργασιών στερέωσης. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον (άνεμος 42 dB[A]), με περιορισμένη όχληση από τον απόηχο της κυκλοφορίας στην παλιά και νέα εθνική οδό (33 dB[A]) και χαμηλό θόρυβο βάθους (31 dB[A]).

4. Προβλήματα σύγχρονης επαναλειτουργίας

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενες δημοσιεύσεις, η ιδιόμορφη ακουστική συμπεριφορά των αρχαίων ελληνικών θεάτρων προσδιορίζεται από την ευχερή ανάδυση (rising) του ωφέλιμου σήματος, χάρη :

- στο χαμηλό θόρυβο βάθους (την ηχοπροστασία του χώρου)
- τον ανεμπόδιστο άμεσο ήχο (την οπτική χάραξη)
- την ανάδειξη έγκαιρων ηχοανακλάσεων (από την ορχήστρα, τη σκηνογραφία και το συνδυασμό τους)
- την υποβάθμιση κι εξουδετέρωση των καθυστερημένων ηχοανακλάσεων. [19]

Πρόκειται για μια επιτυχή αναλογία της αρχικής έντασης και της απόκρισης του χώρου, προς τη συνολική εκπεμπόμενη ενέργεια, σε συνθήκες χαμηλής αντήχησης. Ποσοτικά, η ανάδυση του θεατρικού μηνύματος, όταν εκφέρεται από φωνητικά έμπειρους ηθοποιούς, προϋποθέτει μια ευκρινή διαφορά 20 ως 25 dB[A] πάνω από το θόρυβο βάθους, καθώς και τη σαφή διάκριση των διαδοχικών τμημάτων της γλωσσικής αλυσίδας, διαδικασία που συνδέεται με τις χρονικές συνιστώσες και τις

ενεργειακές αναλογίες της ηχοδιάδοσης. Μια εύρυθμη θεατρική λειτουργία σε υπαίθριες συνθήκες εξαρτάται από τα ανθρωπομετρικά δεδομένα (φωνητικά και ακουστικά), την έκταση του θεατρικού χώρου, καθώς και τη συνδυασμένη εισφορά των λειτουργικών στοιχείων του θεάτρου (ορχήστρα, σκηνογραφία, πάροδοι, κοίλο) στη λεγόμενη παθητική, μεγαφωνική ενίσχυση του θεατρικού χώρου. [20]

Δυστυχώς, η τάση επιστροφής του αρχαίου δράματος (από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα) στους φυσικούς χώρους και η ελκυστικότητα των παραστάσεων στα αρχαία θέατρα, χαρακτηρίζεται από κρίσιμες αντιφάσεις :

- οι απαραίτητες εργασίες προστασίας των θεατρικών μνημείων περιλαμβάνουν συνήθως την αποκατάσταση των καταστρεπτικών, μη-θεατρικών ρωμαϊκών επεμβάσεων,

- οι παραστάσεις έργων της κλασικής εποχής δεν εξασφαλίζουν μια αντίστοιχη σκηνική διαμόρφωση (συνήθως διακρίνονται για την έλλειψη μιας ανακλαστικά επαρκούς σκηνογραφίας)

- η συμμετοχή φωνητικά ατάλαντων υποκριτών (με τη χρήση ηλεκτρακουστικού εξοπλισμού), σε συνθήκες αυξημένων θορύβων από το ανθρωπογενές ακουστικό περιβάλλον, δεν εξασφαλίζουν την καταληπτότητα του θεατρικού μηνύματος.

Τα ερευνητικά δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την περίοδο της πανδημίας στα αρχαία θέατρα της Δ. Ελλάδας και της Ηπείρου δείχνουν μια εκτεταμένη πύκνωση των εργασιών προστασίας (με την ευκαιρία της χρηματοδότησης από ευρωπαϊκούς πόρους) οι οποίες τείνουν να ολοκληρωθούν ή συνεχίζουν να θέτουν εκτός, όχι μόνο τη θεατρική λειτουργία, αλλά ακόμη και τις επισκέψεις σε διάφορους χώρους. Αναλυτικά (εξαιρώντας το μικρό της Αμβρακίας, όπως εξηγήθηκε παραπάνω) :

- σε όλα τα θέατρα (πλην Νικόπολης) απομένουν μόνο ερείπια θεμελίων της σκηνής, κατάσταση που σε θεατρικές παραστάσεις απαιτεί ανακλητές εφαρμογές σκηνογραφίας, για την ενεργοποίηση της ακουστικής κάθε θεατρικού χώρου,

- σε όλα τα θέατρα (πλην Γίτανων και Πλευρώνας) στο παρελθόν έχουν γίνει εκδηλώσεις, ευκαιριακά και χωρίς θεατρικές υποδομές,

- υπάρχει η δυνατότητα ασφαλούς (μερικής ή συνολικής) χρήσης του κοίλου σε 6/10 θέατρα (εκτός από Γίτανα, Κασσώπη, Πλευρώνα και Νικόπολη),

- όλα τα θέατρα (πλην Νικόπολης, όπου κατά τις παραστάσεις θα απαιτηθούν ευρύτερες κυκλοφοριακές ρυθμίσεις) βρίσκονται σε ηχητικό περιβάλλον με χαμηλό θόρυβο βάθους (< 35 dB[A]).

Η Δωδώνη, μάλλον το μεγαλύτερο σε χωρητικότητα ελληνιστικό θέατρο του δείγματος, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγχρονης επαναλειτουργίας.

Λαμβάνοντας υπόψη [21] :

- την ένταση της φωνής ενός έμπειρου ηθοποιού (περίπου 85dB στο 1μ,)
- τη μείωση κατά 34dB[A] (μέγιστη απόσταση 51μ. για το 80% των θέσεων)
- το χαμηλό θόρυβο βάθους (28dB[A]) στο σύγχρονο ηχητικό περιβάλλον,
- την επαύξηση του θορύβου βάθους εξαιτίας της παρουσίας του κοινού (5dB),
- τις θετικές ηχοανακλάσεις από την ορχήστρα (+3dB) ή το συνδυασμό της με ανακλητή σκηνογραφία (ως +6,5dB),

- η ανάδυση του ωφέλιμου σήματος εκτιμάται πως κυμαίνεται μεταξύ 21 και 24,5 dB, δηλαδή εξασφαλίζεται η ακουστική άνεση των θεατών σε μια σύγχρονη παράσταση αρχαίου δράματος.

5. Αναφορές

- [1] H.C. Baldry, *Το τραγικό θέατρο στην αρχαία Ελλάδα*, μετάφραση Γ. Χριστοδούλου - Λ. Χατζηκώστα, εκδόσεις Καρδαμίτσα, Αθήνα, 1981
- [2] Χ.Γ. Αθανασόπουλος *Προβλήματα στις εξελίξεις του συγχρόνου θεάτρου*, εκδόσεις Σιδέρη, Αθήνα, 1976
- [3] G. Izenour *Theatre design*, Mc Graw Hill, N.Y. 1977
- [4] H.D. Blume, *Εισαγωγή στο αρχαίο θέατρο*, μετάφραση Μ. Ιατρού, εκδόσεις Μ.Ι.Ε.Τ., Αθήνα 1986
- [5] Σ. Δάκαρης «Το ιερό της Δωδώνης», *Αρχαιολογικό Δελτίο* 16, Αθήνα 1966
- [6] Δήμος Δωδώνης *Το θέατρο*, ιστοσελίδα dodoni.gr/to-theatro, (ανακτήθηκε 20.8.24)
- [7] «Το θέατρο στα Γίτανα», igoumenitsamuseum.gr/view_sub_subpage/15/63/ (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [8] S. Dakaris, «Casopaia and the Elean Colonies», *Ancient Greek Cities* 4, Athens 1971
- [9] Η. Ανδρέου «Η αποκάλυψη του μικρού θεάτρου της Αμβρακίας» ιστοσελίδα ancienttheatersofepirus.gr/ (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [10] «Θέατρο Νικόπολης» ιστοσελίδα ancienttheatersofepirus.gr/ (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [11] «Αρχαίο θέατρο Στράτου» ιστοσελίδα aitoloakarnania.com.gr (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [12] Λ. Κολώνας, *Αρχαίοι Οινιάδες*, ΥΠΠΟ, Αθήνα 2008 (ανακτήθηκε 22/8/22)
- [13] E. Fiechter, *Die Theater von Oiniadai und Neu Pleuron*, W. Kohlhammer, Stuttgart, 1931.
- [14] Λ. Κολώνας *Νέα Πλευρώνα*, Υπουργείο Πολιτισμού, Αθήνα 2008, σσ 27-30
- [15] E. Fiechter, *Die Theater von Oiniadai und Neu Pleuron*, W. Kohlhammer, Stuttgart, 1931.
- [16] Ο. Βικάτου - Φ. Σαράντη, *Ο αρχαιολογικός χώρος και το Ηρώο της Καλυδώνας*, ΥΠΠΟ, Μεσολόγγι, 2013.
- [17] «Αρχαίο θέατρο Μακύνειας» ιστοσελίδα agriniovoice.gr/afieroma-ta-arxaia-theatra-tis-aitoloakarnanias/ (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [18] «Αρχαίο θέατρο Συκιώνας» ιστοσελίδα ancienttheater.culture.gr (ανακτήθηκε 26/8/24)
- [19] N. Barkas “Ancient Greek Theaters: current operation vs contemporary noise environmen“» ψηφιακά πρακτικά *Euronoise Crete*, pp 2133 - 2142 (ανακτήθηκε 22/8/22)
- [20] Fr. Canac, *L'Acoustique des Théâtres Antiques*, éditions CNRS, Paris 1967
- [21] N. Barkas “The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Greek Ancient Theatres“ *MDPI Acoustics*, 1, pp 337–353, 2019 (ανακτήθηκε 22/8/22)



Μελέτη ακουστικής αναβάθμισης στο νεοκλασικό κτήριο του Δημοτικού Ωδείου Βόλου

Αναστάσιος Κουκούλης
Πληροφορικός
MSc Acoustics, ΑΣΠ-ΕΑΠ
tasoyylis@hotmail.com

Γεώργιος Καλλίρης
Καθηγητής ΑΠΘ
ΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ
gkal@jour.auth.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Ομ. Καθηγ. Παν. Πατρών
τΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή μεθόδων ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας καθώς και ακουστικού σχεδιασμού για την αναβάθμιση της ακουστικής συμπεριφοράς του νεοκλασικού κτηρίου του Δημοτικού Ωδείου Βόλου. Μέσω της παρούσας μελέτης, εκτιμάται η ικανότητα στέγασης σε νεοκλασικά κτήρια, δραστηριοτήτων που βασίζονται στην ακουστική του χώρου καθώς και τις παρεμβάσεις που είναι αναγκαίες κατά την ανακατασκευή τους ή την αποκατάστασή τους για την βελτίωση της ακουστικής τους.

Acoustic upgrade study of the neoclassical building which hosts the Municipal Conservatory of Volos

ABSTRACT

This paper deals with the upgrade of acoustic design and the application of sound insulation and sound protection methods to improve the acoustic behavior of the neoclassical building of the Municipal Conservatory of Volos. The present study evaluates the ability of neoclassical buildings to host activities based on sound and space acoustics and assess the interventions which are necessary during their reconstruction or restoration to improve their acoustics regarding their future use.

Εισαγωγή

Το κτήριο του Δημοτικού Ωδείου Βόλου είναι ένα από τα καλύτερα δείγματα νεοκλασικού κτηρίου της πόλης του Βόλου και κατασκευάστηκε το 1882 για την στέγαση της Τράπεζας Ηπειροθεσσαλίας. Έπειτα από αρκετές επισκευές και αλλαγές χρήσης το 1984, αποκαταστάθηκε στην πρότερη μορφή του από την τεχνική υπηρεσία του Δήμου Βόλου, για τη χρήση του ως Δημοτικό Ωδείο της Πόλης του Βόλου. Η εσωτερική του διαρρύθμιση και διακόσμηση ακολούθησε το ύφος της νεοκλασικής αρχιτεκτονικής και του πρότερου χαρακτήρα του κτηρίου με ψηλοτάβανα δωμάτια, με περίτεχνες ξύλινες και γύψινες διακοσμήσεις, μαρμάρινα πατώματα και σκάλες, μεγάλες ξύλινες πόρτες και μεγάλα εξωτερικά παράθυρα και μπαλκονόπορτες. Οι παρεμβάσεις της αποκατάστασης του 1984 αφορούσαν εξολοκλήρου στα δομικά και οπτικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, χωρίς να περιλαμβάνουν καθόλου την ακουστική και την ηχομόνωση του.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται προδιαγραφές από πρότυπα και μετρήσεις από ωδεία που χαρακτηρίζονται για την καλή τους ακουστική, καθώς και έρευνες ικανοποίησης μουσικών, που αφορούν στην ηχητική των χώρων και σε συνήθειες τακτικές ηχητικού σχεδιασμού αυτών των χώρων. Στο σχεδιασμό των αιθουσών εκμάθησης και εξάσκησης μουσικής, πρότυπα όπως το BB93 (Building Bulletin 93) έκδοσης 2015 [1] της Βρετανικής Κυβέρνησης αναφέρουν γενικότητες για το χρόνο αντήχησης και τη διάχυση του ήχου και επικεντρώνονται στα ακουστικά θέματα από τον περιβαλλοντικό ήχο και στην ηχομόνωση από τους εξωτερικούς και τους εσωτερικούς θορύβους.

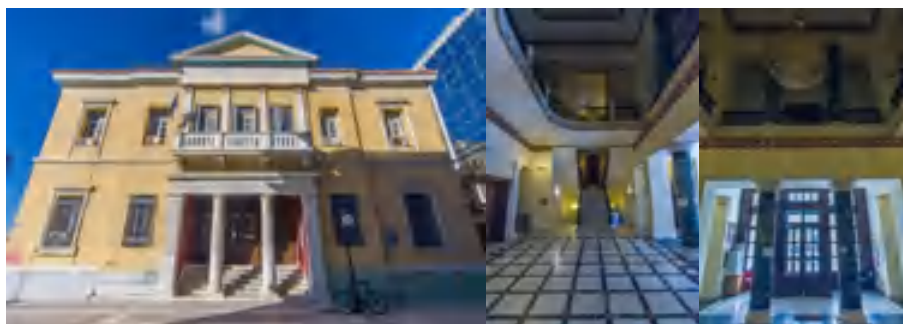
Οι χώροι διδασκαλίας των ωδείων συνήθως έχουν μικρές διαστάσεις και τα μαθήματα, ως επί το πλείστον, είναι ατομικά. Αυτές οι μικρές αίθουσες μουσικής διδασκαλίας θα πρέπει να καλύπτουν ορισμένες ηχητικές απαιτήσεις σχετικές με θέματα συντονισμών και στάσιμων κυμάτων, ιδανικό χρόνο αντήχησης, διαχυτικότητα χώρου και επαναλαμβανόμενους αντίλαλους (flutter echoes), ηχομόνωση και θόρυβο υπόβαθρου (εσωτερικό και εξωτερικό). Πρότυπα όπως το DIN 18041 [2] για εκπαιδευτικούς χώρους και το OeNorm 8115-3 [3] για χώρους μουσικής εξάσκησης συνιστούν χαμηλούς μέσους χρόνους αντήχησης σε αυτούς τους χώρους. Σύμφωνα με βιβλιογραφική μελέτη των (Björn, Weisheit, & Troge, 2018) [4] οι μουσικοί σπουδαστές και δάσκαλοι κατά την εκμάθηση και την εξάσκηση μουσικής προτιμούν στεγνούς (dry) χώρους, δηλαδή χώρους με χαμηλή αντήχηση, ενώ όταν εξασκούνται σε σύνολα και είναι πιο προχωρημένοι τεχνικά, αναζητούν αυξημένη αντήχηση αλλά όχι και υπερβολική για τον εκάστοτε χώρο. Σε ανάλογη μελέτη των (Pop, Osman, & Knight, 2019) [5] προτεινόμενες τιμές του χρόνου αντήχησης σύμφωνα με πρότυπα όπως το BB93 1015 το ANSI S 12.60 και το DfES 2002, για μουσικούς χώρους που συναντώνται σε ωδεία και μουσικές σχολές όπως αίθουσες διδασκαλίας, μουσικά στούντιο και control rooms είναι μικρότερες από 0,8 sec για επιφάνειες έως 70 m² και όγκο έως 200 m³.

Η ελλιπής ηχομόνωση και ο θόρυβος υπόβαθρου αποτελεί κύριο λόγο ενόχλησης μαθητών και σπουδαστών μουσικών σχολών. Οι υψηλές ηχητικές στάθμες από τα μουσικά όργανα σε συνδυασμό με την χαμηλή ηχομόνωση μεταξύ των αιθουσών αποπροσανατολίζει τους εκτελεστές από το αντικείμενο τους. Παρόμοια αρνητική επίδραση έχει και ο εξωτερικός περιβαλλοντικός, κυρίως κυκλοφοριακός θόρυβος. Το πρόβλημα των υψηλών ηχητικών στάθμων είναι συνέπεια της ελλιπούς απόσβεσης των χώρων και του υψηλού συνήθως χρόνου αντήχησης, εκθέτοντας τους σπουδαστές σε δόσεις ηχητικής ενέργειας πολύ μεγαλύτερης από τις προτεινόμενες για την ακουστική υγεία τους.

1. Χαρακτηριστικά του χώρου του Δημοτικού Ωδείου Βόλου

Το οικόπεδο του Ωδείου έχει διαστάσεις 40,90 μέτρα μήκος, 21,15 μέτρα πλάτος και εμβαδό 865,035 τετραγωνικά μέτρα. Το κτήριο του Ωδείου τοποθετείται στη γωνία των οδών Δημητριάδος και Μεταμορφώσεως, περιοχή με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο, και αποτελείται από δύο ορόφους, το ισόγειο και τον πρώτο όροφο, μικρό χώρο στο υπόγειο για αποθηκευτική χρήση και δώμα σε μέρος της σκεπής του. Το ισόγειο αποτελείται από 7 αίθουσες διδασκαλίας και μελέτης

μουσικής διαφόρων μεγεθών, μία αίθουσα γραφείου, μία μεγάλη αίθουσα εκδηλώσεων και συναυλιών και έναν μεγάλο χώρο υποδοχής (φουαγιέ) στο κέντρο του, ενώ ο πρώτος όροφος από 9 αίθουσες διδασκαλίας και μελέτης μουσικής διαφόρων μεγεθών, μία μεγάλη αίθουσα κρουστών και χορωδίας και έναν μεγάλο χώρο υποδοχής (φουαγιέ) στο κέντρο του, που αποτελεί συνέχεια σε κάθετο επίπεδο από το ισόγειο (βλ. εικόνα 1.1).



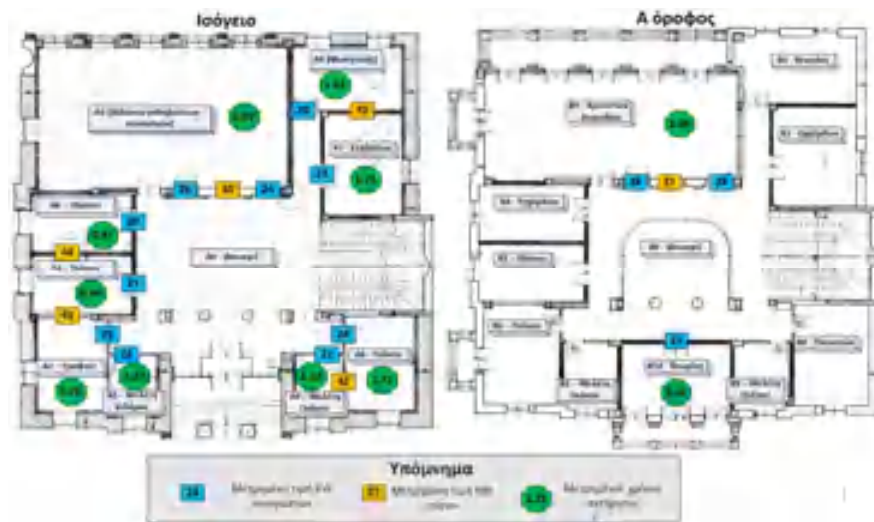
Εικόνα 1.1 Απόψεις του κτηρίου του Δημοτικού Ωδείου Βόλου.

Κατασκευαστικά το κτήριο του Ωδείου αποτελείται από εξωτερικούς τοίχους από μπετόν πάχους 80 έως 95 cm στο ισόγειο και 50cm στον Α΄ όροφο, με τελείωμα βαμμένου σοβά εσωτερικά και εξωτερικά, εσωτερικούς τοίχους από μπετόν ή τούβλο πάχους 15 έως 40 cm στο ισόγειο και στον Α΄ όροφο, με τελείωμα βαμμένου σοβά, κάλυψη μαρμάρου στο μεγαλύτερο μέρος του πατώματος και σε επιλεγμένα σημεία των τοίχων, κάλυψη ξύλου στο πάτωμα των αιθουσών συναυλιών και κρουστών, κάλυψη βαμμένου σοβά με έγχρωμα γύψινα διακοσμητικά στις οροφές των αιθουσών, πλάκα οροφής και ισογείου από μπετόν πάχους 30 cm, παράθυρα και μπαλκονόπορτες ξύλινες μεγάλου ύψους, 2,5 m για τα παράθυρα και 3,35 m για τις μπαλκονόπορτες με διπλό τζάμι (4 10 4) και εσωτερικές ξύλινες πόρτες, μονόφυλλες ή δίφυλλες μεγάλου ύψους και διαστάσεων 1 m x 2,55 m για τις μονόφυλλες και 1,25 m x 2,55 m για τις δίφυλλες.

2. Μετρήσεις ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας

Οι μετρήσεις θορύβου του εξωτερικού χώρου πραγματοποιήθηκαν απογευματινή ώρα, από τις 18:00 έως τις 20:00, που είναι ενδεικτική ώρα λειτουργίας του ωδείου, σε απόσταση 3 μέτρων από το κέλυφος του κτηρίου και σε ύψος 2 μέτρων από το έδαφος. Οι λήψεις των δεδομένων θορύβου έλαβαν μέρος σε τέσσερα σημεία περιμετρικά του κτηρίου και για χρονικό διάστημα 3 λεπτών για κάθε θέση μέτρησης, οπότε διαπιστώθηκε ότι οι κύριες πηγές θορύβου προέρχονται κυρίως από την κυκλοφορία των οχημάτων, από την ομιλία και τις δραστηριότητες των περαστικών, από τη λειτουργία μηχανημάτων ψύξης-θέρμανσης των γειτονικών κτηρίων. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι τιμές των μετρήσεων πλησιάζουν τις τιμές του δείκτη L_{den} που αναφέρονται στη χαρτογράφηση θορύβου του Υ.Π.Ε.Ν [6].

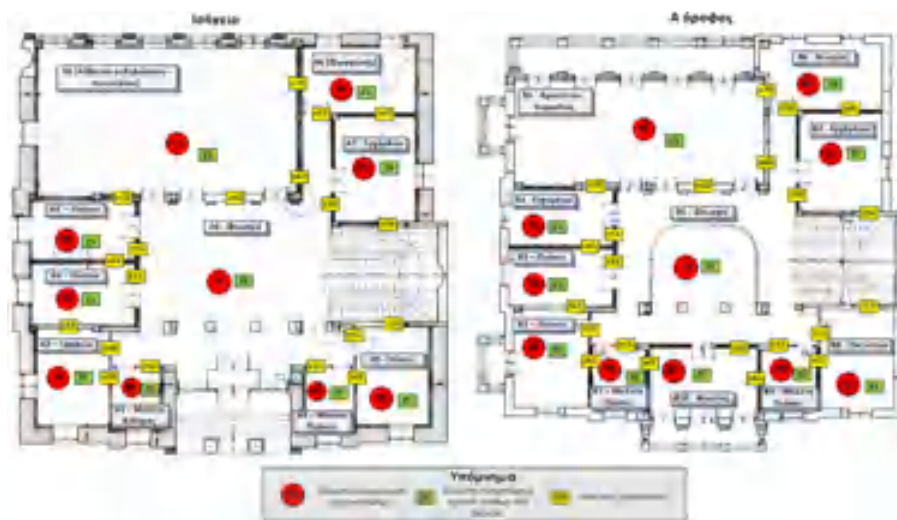
Οι μετρήσεις θορύβου βάθους του εσωτερικού χώρου του ΔΩΒ πραγματοποιήθηκαν απογευματινή ώρα, από τις 18:00 έως τις 20:00, που είναι ενδεικτική ώρα λειτουργίας του ωδείου, σε ημέρα αργίας χωρίς την παρουσία μαθητών και προσωπικού στους χώρους του. Ο εξοπλισμός μετρήσεων τοποθετήθηκε στο κέντρο κάθε αίθουσας μέτρησης και σε ύψος 1,2 μέτρων από το πάτωμα. Οι λήψεις των δεδομένων θορύβου έλαβαν μέρος σε τρεις αίθουσες στην αίθουσα Α5 (συναυλιών) στην Β5 (κρουστών) και στην Β10 (θεωρίας) για χρονικό διάστημα 3 λεπτών για κάθε θέση μέτρησης. Παράλληλα με τις μετρήσεις θορύβου βάθους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου αντήχησης σε επιλεγμένους χώρους του κτηρίου και καταγράφηκαν στην κάτωψη της εικόνας 2.1.



Εικόνα 2.1 Μετρήσεις δείκτη ηχομείωσης R_w και χρόνου αντήχησης σε χώρους του ΔΩΒ.

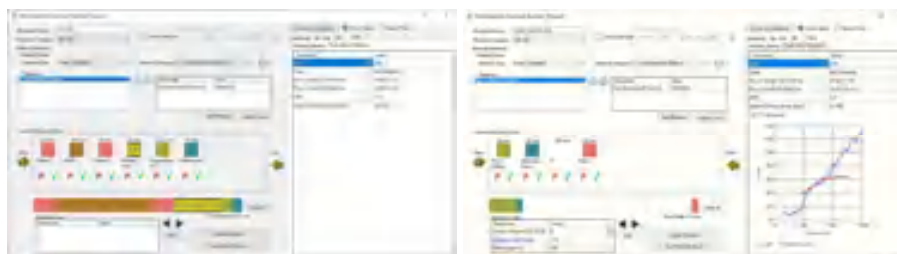
3. Προσδιορισμός της επιθυμητής εσωτερικής ησυχίας και βελτίωση της ηχομόνωσης

Λαμβάνοντας υπόψη την ελλιπή Ελληνική νομοθεσία και το άρθρο 12 του κτιριοδομικού κανονισμού [7] που αναφέρει και καθορίζει κριτήρια ηχομόνωσης για εσωτερικούς και εξωτερικούς θορύβους σε χώρους εκπαίδευσης καθώς και την πρόταση εργασίας του Ελληνικού Ινστιτούτο Ακουστικής (ΕΛ.ΙΝ.Α.) του 2010 [8] που αφορά στην επικαιροποίηση των ορίων θορύβου και στις απαιτήσεις ηχομόνωσης για διάφορες περιπτώσεις εφαρμογής, προσδιορίστηκαν οι απαιτήσεις ηχοπροστασίας στους εσωτερικούς χώρους του κτηρίου και καταγράφηκαν στην κάτωψη της εικόνας 3.1.



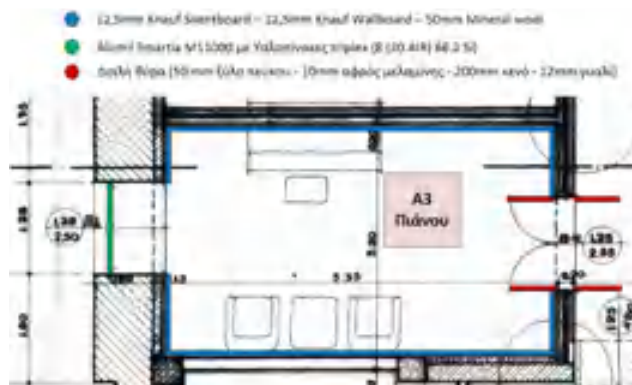
Εικόνα 3.1 Απεικόνιση σε κάτοψη κριτηρίων ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας για το κτήριο του ΔΩΒ.

Με την χρήση κατάλληλου λογισμικού προσομοιώθηκαν συνδυασμοί υλικών για την βελτίωση της ηχομόνωσης μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου (παράθυρα και εξωτερικές πόρτες) καθώς και των εσωτερικών χώρων μεταξύ τους (τοιχοποιία και πόρτες) (βλ. εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 Προσομοίωση σε λογισμικό βελτιωμένης τοιχοποιίας - $R_w = 67$ (25 mm σοβάς - 100mm τούβλο - 25 mm σοβάς - 50mm πετροβάμβακας - 12,5mm απλή γυψοσανίδα - 12,5mm knauf silentboard) και διπλής πόρτας με ξύλο πεύκου πάχους 50mm και γυαλί 12mm - $R_w = 60$ (50 mm ξύλο πεύκου – 10mm αφρός μελαμίνης – 300mm κενό – 12mm γυαλί).

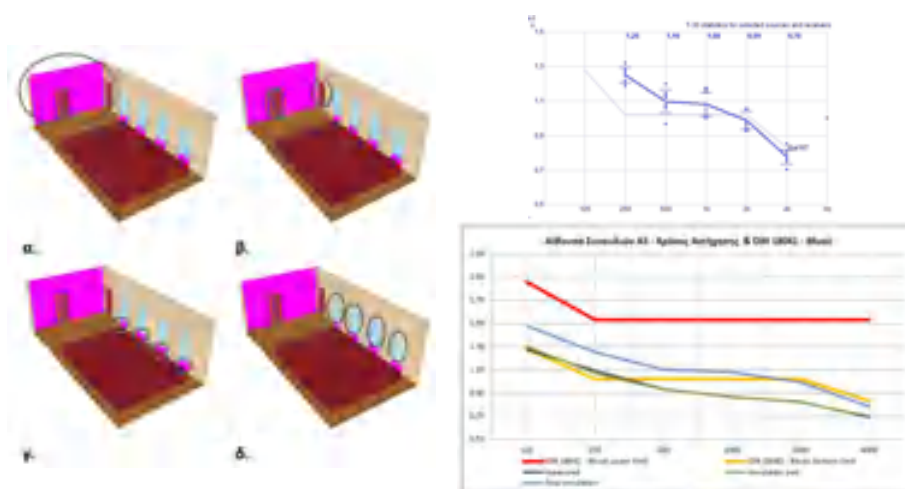
Χρησιμοποιώντας τους συνδυασμούς υλικών από τις προσομοιώσεις των διαφόρων επιφανειών, προτάθηκαν κατάλληλες παρεμβάσεις ηχομόνωσης για κάθε χώρο οι οποίες και αποτυπώθηκαν σε κατόψεις για όλες τις περιπτώσεις ελλειπών ηχομόνωσης, όπως στο παράδειγμα της αίθουσας πιάνου Α3 που εμφανίζεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Προτεινόμενες παρεμβάσεις ηχομόνωσης αίθουσας πιάνου Α3.

4. Αξιολόγηση και βελτίωση της υφιστάμενης εσωτερικής ακουστικής

Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των τρισεδιάστων αρχιτεκτονικών σχεδίων σε λογισμικό και επιλογή των κατάλληλων υλικών για την κάλυψη των επιφανειών, έτσι ώστε οι τιμές της αντήχησης των αιθουσών να συμβαδίζουν με τις απαιτούμενες από τη βιβλιογραφία για την επιλεγμένη χρήση και τον εκάστοτε όγκο.

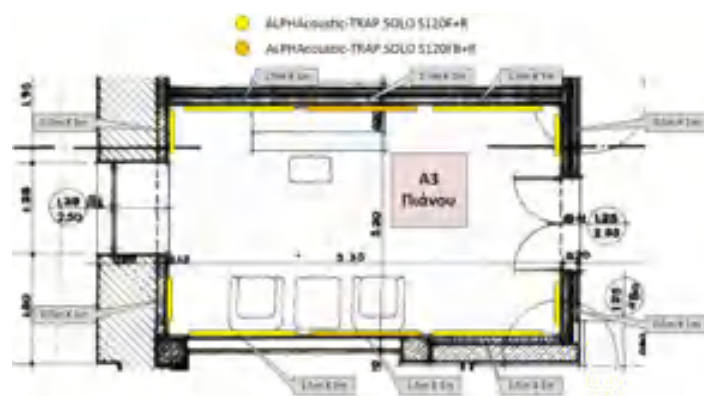


Εικόνα 4.1 Παρεμβάσεις που προτείνονται για βελτίωση της ακουστικής της αίθουσας συναυλιών A5.

Με τη βοήθεια του λογισμικού προσδιορίστηκαν οι ακουστικοί δείκτες και ελέγχθηκαν τα φαινόμενα συντονισμού. Επιλέγοντας κατάλληλα υλικά και εφαρμόζοντας τα σε επιλεγμένες θέσεις κάθε χώρου, δημιουργήθηκαν προσομοιώσεις μέσω λογισμικού και ελέγχθηκαν οι ηχητικοί δείκτες κάθε χώρου έτσι ώστε να προσεγγίζουν τις επιθυμητές τιμές (βλ. εικόνες 4.1 για την περίπτωση της αίθουσας συναυλιών A5 και 4.2, 4.3 για την αίθουσα πιάνου A3).



Εικόνα 4.2 Υπολογισμός των υλικών απόσβεσης για τη βελτίωση της ακουστικής της αίθουσας πιάνου Α3.



Εικόνα 4.3 Προτεινόμενες παρεμβάσεις βελτίωσης ακουστικών δεικτών αίθουσας πιάνου Α3.

5. Συμπεράσματα

Όσον αφορά στην ηχομόνωση του χώρου, διαπιστώθηκε η θετική συνδρομή των μεγάλων πάχους εξωτερικών τοίχων στην απομόνωση του εξωτερικού θορύβου αλλά και η ελλιπής ηχοπροστασία που προσφέρουν τα ελαττωματικά και παλιού σχεδιασμού κουφώματα από τα παράθυρα, τις μπαλκονόπορτες και τις εξώθυρες. Στον εσωτερικό χώρο η κατάσταση της ηχομείωσης μεταξύ των αιθουσών και των κοινόχρηστων χώρων είναι εξίσου προβληματική. Παρατηρείται ανεπιθύμητη μετάδοση ήχων από χώρο σε χώρο, δίνοντας την αίσθηση ότι όλες οι δραστηριότητες γίνονται στο ίδιο δωμάτιο. Οι κύριοι υπαίτιοι για τις διαρροές αυτές είναι η εσωτερική τοιχοποιία και οι απλές εσωτερικές πόρτες μεγάλων διαστάσεων.

Ερευνώντας τα ηχητικά ποιοτικά χαρακτηριστικά των χώρων μουσικής μελέτης και εξυπηρέτησης του κοινού, διαπιστώθηκε η προβληματική ακουστική τους, με κύριο χαρακτηριστικό τους υπερβολικούς χρόνους αντήχησης, λόγω της απουσίας υλικών απόσβεσης-απορρόφησης και το μεγάλο ύψος των πέντε μέτρων όλων των χώρων αλλά και της γεωμετρίας των χώρων με τις παράλληλες επιφάνειες που

ευνοούν τους συντονισμούς. Ταυτόχρονα, στην αίθουσα συναυλιών επικρατεί αντίθετη κατάσταση με συσσώρευση μεγάλου αριθμού υλικών, οργάνων, διακοσμητικών στοιχείων, βαριών κουρτινών και υπεράριθμων καθισμάτων κοινού για τον υπάρχον μέγεθος της αίθουσας, μειώνοντας υπερβολικά τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης και κατ' επέκταση τη μουσική εμπειρία στο χώρο.

Βασική μέριμνα όλου του παραπάνω διορθωτικού σχεδιασμού ήταν να μην αλλοιωθεί ο νεοκλασικός χαρακτήρας του κτηρίου, γεγονός που οδήγησε σε συγκεκριμένες προτάσεις και παρεμβάσεις αποτελεσματικές ακουστικά μεν αλλά μη βέλτιστες. Οι παρεμβάσεις αυτές αφορούσαν κυρίως την αντικατάσταση των εξωτερικών κουφωμάτων των παραθύρων και των θυρών, των εσωτερικών θυρών, την βελτίωση της ηχομόνωσης της εσωτερικής τοιχοποιίας και την προσθήκη υλικών απόσβεσης και διάχυσης στους χώρους διδασκαλίας και μελέτης, ώστε να βελτιωθούν οι ακουστικοί δείκτες. Παράλληλα στην αίθουσα συναυλιών Α5 προτάθηκε η μείωση των απορροφητικών στοιχείων και των υλικών απόσβεσης και η αντικατάστασή τους όσο ήταν δυνατό με υλικά διάχυσης, έτσι ώστε να αυξηθεί ο χρόνος αντήχησης και να βελτιωθούν και σε αυτόν τον χώρο οι ακουστικοί δείκτες.

Ιδανικά, σε περιπτώσεις ανακατασκευής κτηρίων με συγκεκριμένο αρχιτεκτονικό χαρακτήρα και για ειδική χρήση, όπως στην περίπτωση ενός ωδείου, θα έπρεπε κατά την φάση του αρχικού σχεδιασμού τους να συμπεριληφθεί η ακουστική μελέτη για την ιδανικότερη υλοποίηση από πλευράς ακουστικής αλλά και κόστους.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] BB93 (Building Bulletin 93) 2015 Ανάκτηση 11 24, 2021, από *gov.uk*: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a8170d3e5274a2e8ab54012/BB93_February_2015.pdf
- [2] DIN 18041 Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design, Ανάκτηση 11 20, 2021, από *en-standard.eu*
- [3] OeNorm 8115-3, Ανάκτηση 11 20, 2021, από *austrian-standards.at*: <https://www.austrian-standards.at/de/shop/onorm-b-8115-3-2023-07-01~p2665672>
- [4] Björn, K., Weisheit, L., & Troge, J. (2018). *Musicians and their practice rooms: What do they think about present room acoustics and what would they prefer?* Proceedings of Euronoise.
- [5] Pop, C., Osman, R., & Knight, J. (2019). *Music practice rooms: Ambitions, limitations and practical acoustic design*. Proceedings of International Symposium on Music Acoustics (ISMA). Detmold.
- [6] Δείκτης Lden, Βόλου. (n.d.). Ανάκτηση 11 24, 2021, από *mapsportal.yopen.gr*: http://mapsportal.yopen.gr/layers/geonode:total_lden_volos
- [7] Υπουργική Απόφαση 3046/304/1989 - ΦΕΚ 59/Δ/3-2-1989 - Κτιριοδομικός Κανονισμός. (n.d.). Ανάκτηση 2 10, 2022, από *www.e-nomothesia.gr*: <https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/antiseismikos-kanonismos/ya-3046-304-1989.html>
- [8] Ελληνικός Κανονισμός Κτιριακής Ηχοπροστασίας - Πρόταση ομάδας εργασίας του ΕΛΙΝΑ. (n.d.). Ανάκτηση 2 10, 2022, από *helina.gr*: https://helina.gr/download.php?fgr=publications/0005_1902.pdf



Μια υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης σε μεγάλους κλειστούς χώρους

Νικόλαος Στεφανάκης^{1,2}, Λουκάς Λαμπούδης¹

¹Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής,
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

²Ινστιτούτο Πληροφορικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
nstefana@hmu.gr, laboudes_lucas@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσέγγιση που ακολουθείται συχνά για την ηλεκτρακουστική εγκατάσταση σε χώρους συνάθροισης κοινού είναι αυτή των κατανεμημένων ηχείων (distributed loudspeakers), όπου τα ηχεία είναι κατανεμημένα μέσα ή γύρω από την περιοχή ακρόασης. Η μελέτη τέτοιων περιπτώσεων συχνά απαιτεί την επιλογή ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων και μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί κάποιος τρόπος για τον αυτόματο προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται κατά πόσο παράμετροι όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η ακουστική ισχύ λειτουργίας ενός συγκεκριμένου πλήθους ηχείων μπορούν να βελτιστοποιηθούν αυτόματα, με τη χρήση μη γραμμικών εργαλείων βελτιστοποίησης.

A computational platform for the study and optimization of the electroacoustic facility in large venues

ABSTRACT

In many cases, sound reinforcement in acoustic venues is based on the installation of multiple loudspeakers distributed around the listening region. The study of such cases involves defining a large number of parameters such as the loudspeaker placement, their orientation and their output acoustic power. Until today, decisions upon these parameters are based on trial and error and there is no established approach for the automatic optimization of these parameters. In this paper, we investigate whether such design parameters can be automatically defined by solving a non-linear least squares optimization problem.

Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης σε χώρους συνάθροισης κοινού είναι μεγάλη σημασίας για τη σωστή αναμετάδοση της ηχητικής πληροφορίας και βεβαίως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ακουστικές ιδιότητες του χώρου. Μία προσέγγιση που ακολουθείται συχνά είναι αυτή των κατανεμημένων ηχείων (distributed loudspeakers), όπου τα ηχεία είναι κατανεμημένα γύρω ή πάνω από την

περιοχή ακρόασης. Η μελέτη τέτοιων περιπτώσεων συχνά απαιτεί την επιλογή ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων όπως πχ που θα μπουν τα ηχεία, ποιος θα είναι ο προσανατολισμός τους καθώς και ποια θα είναι η ηλεκτρική ή ακουστική ισχύς στην οποία θα πρέπει να λειτουργούν ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες χρήσης.

Τυπικά κριτήρια που θέτει ένας μελετητής για να κρίνει την αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι η ομοιομορφία στον ήχο και η ευκρίνεια της πληροφορίας. Το πρώτο έχει να κάνει με το γεγονός ότι ιδανικά, η στάθμη του ήχου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφη, χωρίς να υπάρχουν θέσεις που οι ακροατές εκτίθενται σε υπερβολικά μεγάλες ηχητικές στάθμες αλλά ούτε και θέσεις που η στάθμη του ήχου να μην επαρκεί. Η ευκρίνεια από την άλλη αφορά περισσότερο την ισορροπία ανάμεσα στα συστατικά του ήχου και κυρίως την αναλογία ανάμεσα στον απευθείας ήχο και την αντηχητική συνιστώσα. Μια καλή αναλογία θα εξασφαλίζει ότι η λεκτική πληροφορία γίνεται κατανοητή από τους ακροατές αλλά και ότι τα συστατικά του ήχου έχουν την ισορροπία που απαιτείται για την απόλαυση της μουσικής.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης είναι ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο το οποίο έχει μελετηθεί από τη σκοπιά διαφορετικών περιπτώσεων χρήσης. Μια από τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις μελέτης είναι αυτή της γραμμικής συστοιχίας ηχείων (line array), όπου το πλήθος μονάδων και η καμπυλότητα της συστοιχίας μελετάται σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της περιοχής ακρόασης [1]. Η βελτιστοποίηση της θέσης των ηχείων έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό και από τη σκοπιά του personal audio [2,3] καθώς και από αυτή της αναπαραγωγής ηχητικού πεδίου [4]. Τέλος, έχουν προταθεί εργαλεία για την βελτιστοποίηση της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης τα οποία εστιάζουν στη συχνοτική απόκριση του συστήματος ηχείου-δέκτη. Κριτήριο για την βελτιστοποίηση σε αυτήν την περίπτωση είναι η επίτευξη μιας όσο το δυνατό πιο επίπεδης απόκρισης συχνότητας, κυρίως στη ζώνη των στάσιμων κυμάτων όπου οι φασματικοί χρωματισμοί είναι πιο έντονοι [5,6].

Στην εργασία αυτή, η μελέτη της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης γίνεται στη ζώνη ανακλάσεων, που ως γνωστό αντιπροσωπεύει τη συχνοτική περιοχή όπου επικρατούν οι αρχές της στατιστικής ακουστικής [7]. Πιστεύουμε ότι αν και το φυσικό μοντέλο που επιτρέπει τη μελέτη της ακουστικής ενός κλειστού χώρου στη συγκεκριμένη ζώνη είναι ευρέως γνωστό, μέχρι σήμερα δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η δυνατότητα κάποιες από τις παραμέτρους της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης να προσδιορίζονται με αυτόματο τρόπο. Στις ενότητες που ακολουθούν, θα επεξηγηθεί αρχικά το φυσικό μοντέλο που υιοθετείτε για το ηχητικό πεδίο στο χώρο. Στη συνέχεια, θα επεξηγηθούν οι μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους καθώς και οι παράμετροι σχεδιασμού που μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τέλος, μέσα από δύο διαφορετικά ρεαλιστικά σενάρια χρήσης, θα ακολουθήσει η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.

1. Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ακουστικά «μεγάλους» κλειστούς χώρους, υπό την έννοια ότι οι διαστάσεις του χώρου είναι μεγάλες σε σχέση με τα μήκη κύματος που μελετώνται. Ως γνωστόν, τέτοιοι χώροι μπορούν να μελετηθούν με βάση τις

αρχές της στατιστικής ακουστικής, οι οποίοι υποθέτουν την δημιουργία ενός ομοιογενούς αντηχητικού πεδίου που η στάθμη του δεν μεταβάλλεται με τη θέση στο χώρο.

1.1 Απευθείας ήχος

Στην μόνιμη κατάσταση, η μέση τετραγωνική τιμή της πίεσης του απευθείας ήχου, p_{ap} , συνδέεται με την ακουστική ισχύ μέσω της σχέσης

$$p_{ap}^2 = \frac{QW\rho c}{2\pi r^2} \quad (1.1)$$

όπου W είναι η ακουστική ισχύς του ηχείου σε Watt, ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3), c η ταχύτητα του ήχου (m/s) και r η απόσταση μεταξύ ηχείου και δέκτη σε m, ενώ Q είναι ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής. Η Εξ. (1) είναι έγκυρη μόνο πάνω στον άξονα του ηχείου και δεν επιτρέπει υπολογισμούς σε περιοχές του χώρου ακρόασης όπου η γωνία με τον άξονα του ηχείου είναι μη μηδενική. Ως εκ τούτου, προτείνουμε μια τροποποίηση της Σχέσης (1.1) που λαμβάνει υπόψιν και το συντελεστή γωνιακής απόκρισης της πηγής

$$p_{ap}^2(\theta) = \frac{QW\rho c}{2\pi r^2} \Gamma^2(\theta), \quad (1.2)$$

όπου $\Gamma(\theta) = \frac{p(\theta)}{p(\theta=0)}$ είναι ο συντελεστής γωνιακής απόκρισης του ηχείου και θ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας γραμμής που ενώνει το δέκτη με το ηχείο και τον άξονα του ηχείου. Σημειώνεται εδώ ότι η συνάρτηση $\Gamma(\theta)$ μπορεί να προκύπτει από μετρήσεις και να αντιπροσωπεύει την πραγματική κατευθυντική συμπεριφορά ενός ηχείου, μπορεί όμως και να είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση της γωνίας θ . Στην εργασία αυτή ακολουθήσαμε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό του $\Gamma(\theta)$ συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας Q , το οποίο βασίζεται στη χρήση της συνάρτησης Cauchy [8].

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας του απευθείας ήχου όταν υπάρχουν παραπάνω από ένα ηχεία, υιοθετούμε την αρχή ανεξαρτησίας των πηγών βάσει της οποίας, η συνολική RMS τιμή του απευθείας ήχου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της Σχέσης

$$p_{ap}^2 = p_{ap,1}^2 + p_{ap,2}^2 + \dots + p_{ap,M}^2, \quad (1.3)$$

όπου $p_{ap,m}$ είναι η RMS τιμή της ακουστικής πίεσης όπως διαμορφώνεται από το m -ιστό ηχείο. Η συγκεκριμένη υπόθεση αναμένεται να είναι έγκυρη υπό την προϋπόθεση ότι τα ηχεία είναι αρκετά μακριά το ένα από το άλλο σε σχέση με τα μήκη κύματος που εξετάζονται και ότι η ανάλυση γίνεται σε σχετικά μεγάλα συχνοτικά εύρη, όπως πχ εύρη οκτάβας. Επιπλέον, η συγκεκριμένη συνθήκη μας επιτρέπει να εργαστούμε λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το μέτρο της ακουστικής πίεσης σε κάθε σημείο, αγνοώντας τη φάση.

1.2 Ανακλώμενος και συνολικός ήχος

Στη μόνιμη κατάσταση, η στάθμη του αντηχητικού πεδίου υπολογίζεται συναρτήσει της σταθεράς δωματίου R και της συνολικής ακουστικής ισχύος W μέσω της Σχέσης

$$p_{av}^2 = \frac{4W\rho c}{R}. \quad (1.4)$$

Δεδομένης της RMS τιμής του απευθείας και ανακλώμενου ήχου, η RMS τιμή του συνολικού ήχου p_{ol} μπορεί να υπολογιστεί ως $p_{ol}^2 = p_{ap}^2 + p_{av}^2$.

1.3 Λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο

Ο λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο (Direct to Reverberant Ratio – DRR) ορίζεται για κάθε σημείο του χώρου ακρόασης ως η διαφορά ανάμεσα στη στάθμη του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου, δηλ $DRR = L_{ap} - L_{av}$. Για τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο, καθότι η τιμή του σχετίζεται με την ευκρίνεια της ηχητικής πληροφορίας που καταφτάνει στο δέκτη, ειδικά για περιπτώσεις που η βασική χρήση του χώρου είναι η ομιλία,

1.4 Σχεδιασμός του προβλήματος βελτιστοποίησης

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης αποσκοπούν στην εύρεση του βέλτιστου συνόλου παραμέτρων σχεδιασμού $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ το οποίο ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί), μία αντικειμενική συνάρτηση κόστους. Οι παράμετροι σχεδιασμού μπορούν να υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας ή ανισότητας. Λόγω του μεγάλου εύρους των εφαρμογών που βρίσκουν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, στις μέρες μας μπορεί να τους βρει κανείς ενσωματωμένους σε πολλές γλώσσες προγραμματισμού όπως είναι οι γλώσσες MATLAB, Octave και Python. Η μαθηματική διατύπωση της του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι της μορφής:

$$\min_{\mathbf{x}} \|f(\mathbf{x})\|_2^2 = \min_{\mathbf{x}} \sum_{k=1}^K F_k^2(\mathbf{x}) \quad (1.5)$$

υπό την προϋπόθεση

$$LB_n \leq x_n \leq UB_n, n = 1, 2, \dots, N \quad (1.6)$$

όπου LB_n και UB_n είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για τη n -ιοστή παράμετρο σχεδιασμού και $k=1,2,\dots,K$ είναι ο δείκτης του σημείου ακρόασης.

Από τη Σχέση (1.5) είναι φανερό ότι ο προσδιορισμός της συνάρτησης κόστους είναι θεμελιώδους σημασίας για την υλοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία, η συνάρτηση κόστους σχεδιάζεται ώστε να αντιπροσωπεύει δύο βασικά κριτήρια καλής ακουστικής. Η πρώτη απαίτηση είναι στην περιοχή ακρόασης η στάθμη του συνολικού ήχου $L_{ολ}$ να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή μιας επιθυμητής στάθμης $L_{επ}$. Η δεύτερη απαίτηση είναι στην περιοχή ακρόασης να επικρατούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές του DRR . Θεωρώντας ότι $L_{ολ,k}$ και DRR_k αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις τιμές της συνολικής στάθμης και του DRR στο σημείο ακρόασης με δείκτη k , η συνάρτηση κόστους για το κάθε σημείο ορίζεται ως εξής:

$$F_k(\mathbf{x}) = |L_{ολ,k} - L_{επ}| + \lambda(DRR_{min} - DRR_k)(DRR_{min} > DRR_k), \quad (1.7)$$

όπου DRR_{min} είναι η τιμή μιας ελάχιστης αποδεκτής τιμής DRR η οποία ορίζεται από το χρήστη. Η παραπάνω συνάρτηση κόστους είναι προφανώς μια μη γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων σχεδιασμού. Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος ποσοτικοποιεί τις αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής στάθμης. Η έννοια της ελάχιστης αποδεκτής τιμής DRR γίνεται κατανοητή αν σκεφτούμε ότι τα σημεία στο χώρο ακρόασης που είναι κάτω από αυτήν την τιμή σχετίζονται με μειωμένη ευκρίνεια πληροφορίας και επομένως θα πρέπει να επιβαρύνουν τη συνάρτηση κόστους, τόσο περισσότερο όσα πιο πολλά dB είναι κάτω από αυτήν την ελάχιστη αποδεκτή τιμή. Ο όρος $(DRR_{min} > DRR_k)$ είναι μια δυαδική συνάρτηση η οποία θα παίρνει την τιμή 1 όταν ικανοποιείται η συνθήκη $DRR_{min} > DRR_k$ και

τιμή 0 σε αντίθετη περίπτωση. Η ύπαρξή του είναι καθοριστικής σημασίας καθότι εξασφαλίζει ότι σημεία του χώρου ακρόασης που έχουν τιμή πάνω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο δεν θα επιβαρύνουν καθόλου τη συνάρτηση κόστους και επιπλέον εξασφαλίζει ότι η συνάρτηση κόστους (Εξ. (1.7)) θα μπορεί να παίρνει μόνο θετικές τιμές.

1.5 Παράμετροι σχεδιασμού

Ανάλογα με την περίπτωση μελέτης, η προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα εργασία επιτρέπει μια μεγάλη ευελιξία ως προς την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού, καθώς και ως προς την οριοθέτηση των τιμών τους. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού:

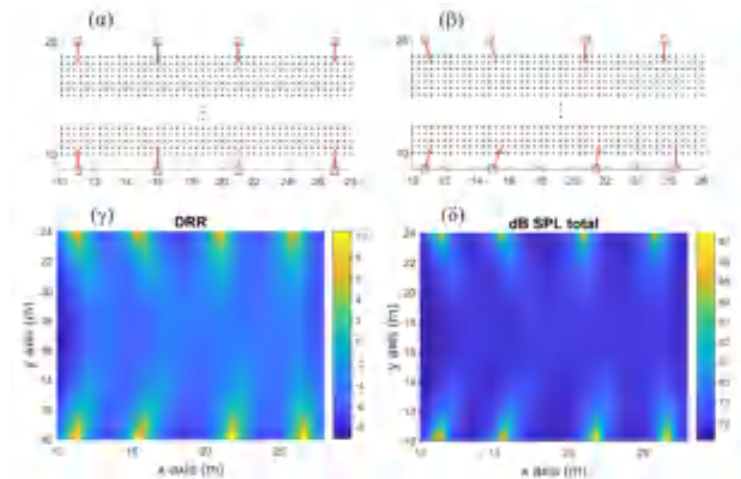
Ακουστική ισχύς: Η βέλτιστη τιμή ισχύος των ηχείων διαμορφώνεται ανάλογα με την απαίτηση για την επιθυμητή τιμή στάθμης του συνολικού ήχου στην περιοχή ακρόασης $L_{\text{επ}}$. Η ακουστική ισχύς μπορεί να διαφοροποιείται από ηχείο σε ηχείο, ωστόσο μπορεί κανείς να επιβάλει τη συνθήκη όλα τα ηχεία να έχουν την ίδια ισχύ εξόδου W , γεγονός που ελαττώνει σημαντικά και το πλήθος των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων. Υπόκειται στον περιορισμό $0 \leq W < \infty$.

Θέση των ηχείων: Η θέση των ηχείων στο πρόγραμμα προσδιορίζεται με βάση καρτεσιανές συντεταγμένες της μορφής $\mathbf{r} = (x, y, z)$, που σημαίνει ότι μπορεί να αξιοποιηθούν από ένας μέχρι και τρεις βαθμοί ελευθερίας για τον προσδιορισμό της θέσης κάθε ηχείου. Πρακτικοί λόγοι ωστόσο επιβάλλουν συχνά περιορισμούς όσον αφορά το εύρος των τιμών που μπορούν να πάρουν οι συντεταγμένες του κάθε ηχείου. Για παράδειγμα, τοποθέτηση των ηχείων στο ταβάνι ή σε συγκεκριμένο πλευρικό τοίχο κάποιου χώρου επιβάλλουν ότι η τιμή του z , του x ή και του y θα πρέπει να είναι συγκεκριμένη. Επίσης, η οριοθέτηση των τιμών x , y και z μέσω της Σχέσης (1.6) μπορεί να εξασφαλίζει ότι οι θέσεις των ηχείων θα είναι εντός των φυσικών διαστάσεων του χώρου, ή εντός του χώρου που θεωρείται ελεύθερος από λοιπό εξοπλισμό κλπ.

Προσανατολισμός των ηχείων: Δύο επιπλέον σημαντικοί παράμετροι σχεδιασμού που σχετίζονται με τον προσανατολισμό των ηχείων είναι η αξιμότητα και η πολική γωνία, θ και φ αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται με βάση το τυπικό σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων. Οι δύο αυτές γωνίες υπόκεινται στους γενικούς περιορισμούς $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ και $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, ωστόσο ο χρήστης μπορεί να θεσπίσει σταθερές τιμές ή να περιορίσει το επιθυμητό εύρος τιμών ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται.

Συντελεστής κατευθυντικότητας: Ο συντελεστής κατευθυντικότητας Q υπόκειται στον γενικό περιορισμό $1 \leq Q < \infty$. Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να τεθεί ως ελεύθερη παράμετρος που μπορεί να διαφοροποιείται για το κάθε ηχείο ή να έχει σταθερή τιμή για όλα τα ηχεία. Εναλλακτικά, η τιμή του μπορεί να είναι σταθερή και να καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα και με την κεντρική συχνότητα η οποία μελετάται.

2. Υλοποίηση και Αποτελέσματα

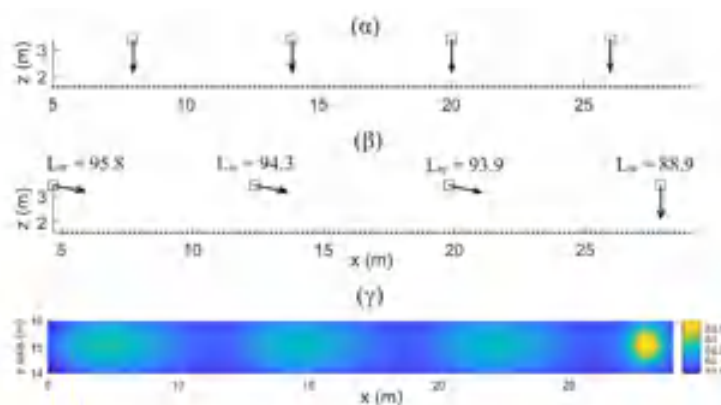


Σχήμα 2.1. Θέσεις και προσανατολισμός των ηχείων πριν (α) και μετά (β) την βελτιστοποίηση για το Σενάριο 1. Οι διακυμάνσεις του DRR και της συνολικής στάθμης πίεσης μετά την βελτιστοποίηση φαίνονται στο (γ) και (δ) αντίστοιχα.

2.1 Σενάριο #1

Θεωρούμε ένα κλειστό χώρο διαστάσεων $L_x=40$, $L_y=30$ και $L_z=4$ m με χρόνο αντήχησης $T=1.7$ s και μέσα σε αυτόν μια ορθογώνια περιοχή ακρόασης με κάτω αριστερή γωνία το σημείο $(x=10, y=10, z=2)$ m και πάνω δεξιά γωνία το σημείο $(x=28, y=24, z=2)$ m. Ο χώρος ακρόασης καλύπτεται από ένα ομοιόμορφο πλέγμα $46 \times 36=1656$ μικροφώνων. Θεωρούμαι οκτώ διαθέσιμα ηχεία, τέσσερα από τα οποία μπορούν να κινούνται πάνω στην ευθεία $y=9$ m και τέσσερα πάνω στην ευθεία $y=25$ m. Το ύψος των ηχείων είναι ίδιο με αυτό της περιοχής ακρόασης. Θεωρούμε επίσης ότι όλα τα ηχεία αποδίδουν την ίδια στάθμη ακουστικής ισχύος L_w , της οποίας η τιμή θα πρέπει να προσδιοριστεί με βάση τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ως παραμέτρους σχεδιασμού θεωρούνται η στάθμη ακουστικής ισχύος L_w , η θέση του κάθε ηχείου ως προς τον άξονα $-x$ και ο προσανατολισμός του κάθε ηχείου ως προς την αζιμούθια γωνία η οποία είναι δυνατόν να κυμαίνεται εντός του εύρους $-91^\circ \leq \theta \leq 91^\circ$. Η γωνία ανύψωσης των ηχείων τίθεται ίση με $\varphi=0^\circ$. Ως επιθυμητή στάθμη του συνολικού ήχου τίθεται $L_{e\pi} = 78$ dB SPL ενώ για την ελάχιστη αποδεκτή τιμή του DRR θέτουμε $DRR_{min} = -3.5$ dB, το οποίο είναι και ένα ρεαλιστικό όριο για την δεδομένη ακουστική του χώρου και πλήθος των ηχείων. Τέλος, ο συντελεστής λ στην Εξ. (1.7) τίθεται ίσος με $\lambda=5$. Ο συντελεστής κατευθυντικότητας των ηχείων τίθεται ίσος με $Q=9$ και θεωρείται σταθερός για όλα τα ηχεία. Η βελτιστοποίηση έγινε στο MATLAB με χρήση της συνάρτησης *fmincon*.

Ως αρχική συνθήκη, τα ηχεία τοποθετήθηκαν με βάση το Σχήμα 2.1(α). Για τα τέσσερα κάτω ηχεία η αζιμούθια γωνία τέθηκε ίση με 90° ενώ για τα τέσσερα πάνω ηχεία ίση με -90° . Ως μια μετρική για την κάλυψη του ακροατηρίου, υπολογίσαμε το DRR_{-5dB} , το οποίο είναι το ποσοστό των σημείων ακρόασης που το DRR είναι πάνω από -5 dB. Πριν την βελτιστοποίηση αυτή η τιμή ήταν $DRR_{-5dB} = 58.1\%$. Τρέχοντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, οι θέσεις, ο προσανατολισμός



Σχήμα 2. Θέσεις και προσανατολισμός των ηχείων πριν (α) και μετά (β) την βελτιστοποίηση για το Σενάριο 2. Οι διακυμάνσεις της συνολικής στάθμης πίεσης μετά την βελτιστοποίηση φαίνονται στο (γ).

και η (κοινή) ακουστικής ισχύς τροποποιήθηκαν και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.1(β). Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι τόσο οι θέσεις όσο και ο προσανατολισμός των ηχείων άλλαξε σε σχέση με τις αρχικές τιμές. Η τιμή της ακουστικής ισχύος που επέστρεψε ο αλγόριθμος ήταν 88.3 dB. Η τιμή του DRR_{-5dB} μετά την βελτιστοποίηση ήταν 75.4%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κάλυψη στην περιοχή ακρόασης βελτιώθηκε. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(β) η στροφή κάποιων εκ των ηχείων βοήθησε σημαντικά σε αυτήν την βελτίωση. Η κατανομή του DRR και της συνολικής στάθμης του ήχου φαίνονται στο Σχήμα 2.1(γ) και 2.1(δ) αντίστοιχα, όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι συνολική στάθμη του ήχου στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής ακρόασης είναι κοντά στα 78 dB SPL, με τη μέγιστη τιμή σε κάποια σημεία του ακροατηρίου να φτάνει ωστόσο τα 87 dB SPL.

2.2 Σενάριο #2

Για κλειστό χώρο ίδιων διαστάσεων με αυτόν της Ενότητας 2.1 και χρόνο αντήχησης $T=2.1$ s, θεωρούμε τώρα ένα σενάριο όπου τα ηχεία πρέπει να τοποθετηθούν στο ύψος $z=3.4$ m, πάνω από την περιοχή ακρόασης που βρίσκεται σε ύψος $z=1.6$ m. Η περιοχή ακρόασης είναι πάλι ορθογώνια με κάτω αριστερή γωνία το σημείο ($x=5, y=14, z=1.6$) m και πάνω δεξιά γωνία το σημείο ($x=29, y=16, z=1.6$) m. Το πλάτος της περιοχής ακρόασης είναι μόλις 2 m, οπότε ουσιαστικά η μελέτη περιορίζεται κατά μήκος της περιοχής ακρόασης. Για το τρέχων σενάριο, θεωρούμε τέσσερα ηχεία με κοινό συντελεστή κατευθυντικότητας $Q=6$ και αρχικές θέσεις και προσανατολισμό που φαίνεται στο Σχήμα 2.2(α). Η αρχική γωνία ανύψωσης κάθε ηχείου ήταν $\varphi=-90^\circ$. Ως παραμέτρους σχεδιασμού θεωρούμε την θέση κατά τον άξονα -x, την στροφή ως προς το φ και την ισχύ L_w του κάθε ηχείου. Εν αντιθέσει με το προηγούμενο σενάριο, θεωρείται τώρα ότι η ισχύς της κάθε μονάδας μπορεί να έχει διαφορετική τιμή. Συνολικά, ο αλγόριθμος καλείται να βρει βέλτιστες τιμές για 12 παραμέτρους σχεδιασμού.

Η τιμή του DRR_{-5dB} με βάση τον αρχικό σχεδιασμό ήταν 60.9%, ενώ μετά την βελτιστοποίηση ήταν 100.0%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κάλυψη στην περιοχή ακρόασης βελτιώθηκε αισθητά. Επιπλέον, από το Σχήμα 2.2(γ) φαίνεται ότι

οι διακυμάνσεις της στάθμης του ήχου περιορίζονται σε ένα εύρος από 81.5 έως 83.5 dB, πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 82 dB SPL. Αξίζει να παρατηρήσει κανείς την σημαντική αλλαγή στην στροφή των ηχείων ως προς την γωνία ανύψωσης (εκτός του τέρμα δεξιού ηχείου) και την διαφοροποίηση της ακουστικής τους ισχύος που κρίθηκε απαραίτητη από τον αλγόριθμο για την επίτευξη της επιθυμητής στάθμης.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, προτείνεται η χρήση μη γραμμικών τεχνικών βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης μέσα σε ένα κλειστό χώρο. Η προτεινόμενη προσέγγιση φαίνεται ικανή στο να δίνει αποδεκτές λύσεις, σε κάθε περίπτωση όμως οι τελικές αποφάσεις θα πρέπει να περνάνε από την κρίση του μελετητή. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί δε υπάρχει σε καμία περίπτωση εγγύηση ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα τερματίσει στην καθολικά βέλτιστη λύση. Επαναλαμβάνοντας το ίδιο πείραμα με λίγο διαφορετικές αρχικές συνθήκες ως προς τις θέσεις των ηχείων παρατηρήσαμε ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων διέφεραν κάθε φορά, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος εν τέλει είχε τερματίσει σε τοπικό ελάχιστο και όχι σε καθολικό ελάχιστο.

4. Αναφορές

- [1] Urban, M., Heil, C. and Bauman, P., Wavefront sculpture technology. *Journal of the Audio Engineering Society*, **51**(10), pp.912-932 (2003)
- [2] Zhu, M. and Zhao, S., Broadband loudspeaker placement optimization for personal sound zones systems. In *The 24th International Congress on Acoustics* (2022)
- [3] Kim, D., Kim, K., Wang, S., Lee, S.Q. and Crocker, M.J., Maximization of the directivity ratio with the desired audible gain level for broadband design of near field loudspeaker arrays, *Journal of Sound and Vibration*, **330**(23) (2011).
- [4] Khalilian, H., Bajić, I.V. and Vaughan, R.G., Joint optimization of loudspeaker placement and radiation patterns for sound field reproduction. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2015).
- [5] D'Antonio, P. and Cox, T.J., Room optimizer: A computer program to optimize the placement of listener, loudspeakers, acoustical surface treatment and room dimensions in critical listening rooms. In *Audio Engineering Society Convention 103*. (1997)
- [6] Stefanakis, N., Sarris, J. and Cambourakis, G., Source placement for equalization in small enclosures. *Journal of the Audio Engineering Society*, **56**(5), (2008).
- [7] Σκαρλάτος Δημήτριος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική, Ηχοπροστασία*, Εκδόσεις Gotsis (2018).
- [8] Λαμπούδης Λουκάς. Υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης κλειστού χώρου με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Octave, Πτυχιακή Εργασία, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, (2023): <https://apothesis.hmu.gr/handle/123456789/11090>



Ακουστική Μελέτη και Προσομοίωση Του Ωδείου Του Ηρώδη Του Αττικού

Tavelidou Eleni, Chrostopher Barlow

¹National and Kapodistrian University of Athens

²Solent University, Southampton

*etavelidou@music.uoa.gr *cb@kpacoustics.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη αφορά στην ανάλυση των ακουστικών ιδιοτήτων του Ωδείου του Ηρώδη Του Αττικού και επικεντρώνεται στην αρχική κατασκευή του Ωδείου προ καταστροφής της οροφής που θεωρείτο ότι έφερε. Τέσσερις ακουστικές παράμετροι έχουν εξεταστεί: ο χρόνος αντήχησης (T30), η εκκρίνεια (C80), ο δείκτης ισχύος (G) και ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI) με κατάληψη του Ωδείου από κοινό που φτάνει περίπου το 80%.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν εν μέρει εντός των βέλτιστων τιμών για τον τύπο των παραστάσεων που λάμβαναν χώρα κατά τη ρωμαϊκή εποχή στην οποία ανήκει το Ωδείο, ή/και εντός του εύρους τιμών προηγούμενων δημοσιευμένων δεδομένων σχετικά με προβλέψεις παρόμοιων δομών. Τέλος, οι υλοποιήσεις των παραπάνω εφαρμόστηκαν και σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που επιτρέπει πλοήγηση στον εικονικό χώρο συμπεριλαμβανομένων οπτικοακουστικών ερεθισμάτων, με σκοπό την επίτευξη μιας ολιστικής εμπειρίας.

An Investigation Into The Acoustics Of The Odeon Of Herodes Atticus

ABSTRACT

This study investigates the acoustics of the Odeon of Herodes Attikus, an ancient and currently partly reconstructed Odeon located in Athens, Greece. The model incorporated a roof extending across the whole length of the theatre, which had not been considered in previous studies. The performance of the space with the effect of seated audience occupying 80% of the theatre have been examined in relation to four acoustic indices; Reverberation Time, Clarity, Sound Strength and Speech Transmission Index.

The results indicated that the values of the acoustical parameters under investigation were at times within the proposed optimum values for the type of performances taking place in the Roman era and/or at least within the range of previous published data regarding predictions of similar structures. The implementations of the above were applied in a virtual reality environment which allowed navigation through the virtual space including audio-visual stimuli in the view to achieve an immersive experience.

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί αυξημένο ενδιαφέρον ως προς τη μελέτη της ακουστικής αρχαίων θεάτρων και ιστορικών μνημείων. Η αναβίωση και η αναπαραγωγή ήχου εντός αυτών των ιστορικών οικοδομημάτων σήμερα επιτυγχάνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών χρησιμοποιώντας τεχνικές μοντελοποίησης σε συνδυασμό με επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις, ώστε να αποσαφηνιστεί η ακουστική εξέλιξη αυτών των χώρων στο χρόνο [1].

Με την έλευση των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας και των τρισδιάστατων περιβαλλόντων υψηλής ευκρίνειας μπορεί επίσης να επιτευχθεί μια ρεαλιστική αναπαράσταση και πλοήγηση εντός αυτών των μνημείων [2] που μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς σκοπούς.

Η παρούσα μελέτη διερευνά την ακουστική του Ωδείου του Ηρώδου του Αττικού, του αρχαίου και επί του παρόντος εν μέρει ανακατασκευασμένου Ωδείου που βρίσκεται στην καρδιά της Αθήνας. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα επικεντρώνεται στην αρχική κατασκευή του Ωδείου, προ καταστροφής της οροφής, που θεωρείτο ότι έφερε μέχρι και το 267 Π.Χ [3].

Οι πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή και τα επιμέρους τμήματά της λήφθηκαν από τον Δρ. Μανώλη Κορρέ, αρχιτέκτονα, πολιτικό μηχανικό και καθηγητή της ιστορίας της αρχιτεκτονικής στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ο οποίος είχε ασχοληθεί με την εν λόγω μελέτη και έχει παραθέσει λεπτομερείς περιγραφές της κατασκευής στο αντίστοιχο βιβλίο του [3]. Σημαντικό να αναφερθεί ότι ακουστική μελέτη του Ωδείου, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους σκεπής, δεν είχε εξεταστεί σε προηγούμενες ακουστικές μελέτες.

Η παρούσα μελέτη στόχευε στη διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της αρχικής κατασκευής του Ωδείου του Ηρώδου του Αττικού κατελημμένο κατά ένα 80% από ακροατές στο κοίλο του. Τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν σε ένα περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να περιηγηθεί στο εσωτερικό και να «ακούσει» το χώρο σε συγκεκριμένες θέσεις.

Επιτόπιες μετρήσεις δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν κατά την περίοδο της έρευνας. Επομένως, ένα γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο της ανοιχτής εκδοχής του θεάτρου (τρέχουσα κατάσταση), χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την εκδοχή του Ωδείου με τη στέγη. Το παρόν δημιουργήθηκε και βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από επιτόπιες μετρήσεις και προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το 2004, 2009 και 2016 από άλλους ερευνητές [4]-[6].

1. Μέθοδος

1.1 Λογισμικά

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα γεωμετρικό μοντέλο του Ωδείου χρησιμοποιώντας το λογισμικό SketchUp Make 2017 το οποίο ύστερα εισάχθηκε στο λογισμικό CATT Acoustic v9.1 για την μετέπειτα ακουστική μοντελοποίηση.

Το μοντέλο εκτελέστηκε με αρχικό αριθμό που έφτανε τις 50000 ακτίνες κάνοντας χρήση του τρίτου αλγόριθμου ανάλυσης που διατίθεται στο λογισμικό, όπως συνιστάται στο [7]. Η θερμοκρασία στο Ωδείο ορίστηκε στους 25°C (τυπική θερμοκρασία δωματίου) και η υγρασία στο 50%.

Οι βέλτιστες τιμές για τους ακουστικούς δείκτες που μελετήθηκαν στην παρούσα έρευνα, οι οποίες προέρχονται από δεδομένα και ανάλυση που διενεργήθηκαν στα [8]–[12] και συνάδουν με τον τύπο των παραστάσεων για τις οποίες κατασκευάστηκε το Ωδείο, παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Βέλτιστες Τιμές σε Ωδεία για τις Επιλεγμένες Παραμέτρους

Βέλτιστες Τιμές Ακουστικών Παραμέτρων		
T30	C80	G
0.7 – 2.3	-2 – 3	>3

1.2 Σχεδιασμός Μοντέλου

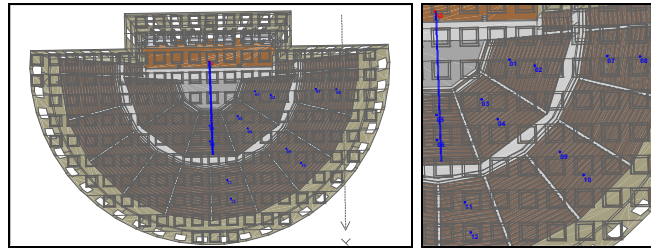
Οι διαστάσεις και οι περισσότερες αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες μοντελοποιήθηκαν βάση των σχεδίων που δίνονται στο [3]. Οι δομικές λεπτομέρειες στο εσωτερικό του θεάτρου φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Εσωτερικό Θεάτρου Μοντελοποιημένο στο λογισμικό SketchUp Make

1.3 Ηχητική Πηγή και Δέκτες

Αυτή η μελέτη αφορά στην ανάλυση της ανθρώπινης φωνής και της μετάδοσής της στο Ωδείο. Ως ηχητική πηγή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ανθρώπινης φωνής (φάσμα, κατευθυντικότητα, ένταση) επαγγελματιών τραγουδιστών που ηχογραφήθηκαν στις ειδικές εγκαταστάσεις του στούντιο του Τμήματος Μουσικών Σπουδών LabMAT στο ΕΚΠΑ, όπως περιγράφεται στο [13]. Η πηγή στην προσωμοίωση τοποθετήθηκε 1.7 μέτρα πάνω από το δάπεδο της σκηνής με προσανατολισμό προς το κέντρο του ακροατηρίου. Η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) ρυθμίστηκε στα 77dB(A), που βρίσκεται στα όρια μεταξύ δυνατής και πολύ δυνατής φωνής [14]. Ο αριθμός των δεκτών που επιλέχθηκαν σε βασικές θέσεις του άνω και κάτω κοίλου ήταν δώδεκα και οι θέσεις των δεκτών στο ακροατήριο καταλάμβαναν μόνο το αριστερό μισό του Ωδείου, καθώς αναμένονταν παρόμοια κατανομή ήχου στο υπόλοιπο μισό λόγω της δομικής συμμετρίας. Το ύψος των δεκτών που χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφηση του κοινού ρυθμίστηκε στα 0,8 μέτρα πάνω από την περιοχή καθισμάτων, αντιπροσωπεύοντας το ύψος των αυτιών ενός καθισμένου ατόμου.



Σχήμα 1.2 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγής και Δεκτών

Οι ακριβείς θέσεις της επιλεγμένης πηγής και των δεκτών φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Το στοιχείο A0 (κόκκινου χρώματος) στο εν λόγω σχήμα αντιπροσωπεύει την ηχητική πηγή, ενώ οι αριθμοί 01 - 12 (μπλε χρώματος) αποτελούν τους δέκτες.

1.4 Υλικά

Η επιλογή των υλικών που εφαρμόστηκαν στις μοντελοποιημένες επιφάνειες του Ωδείου βασίστηκαν σε πληροφορίες που αναγράφονταν στο [3] ενώ οι συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης λήφθηκαν από δεδομένα ερευνών στο [15] καθώς και στις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με επιτόπιες μετρήσεις και προσομοιώσεις στα [4]-[6], [16].

Έχει θεωρηθεί ότι τα Ωδεία είχαν ανοιχτά παράθυρα για φυσικό φως και αερισμό, επομένως, τα ανοιχτά παράθυρα μαζί με το καθισμένο κοινό ήταν τα κύρια απορροφητικά στοιχεία εντός του χώρου [8].

Οι μέσες τιμές για τους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης που επιλέχθηκαν για αυτό το μοντέλο παρατίθενται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Μέσες Τιμές Συντελεστών Απορρόφησης Και Σκέδασης

Επιφάνεια	Υλικό	Συντελεστής Απορρόφησης	Συντελεστής Σκέδασης
Σκηνή	Πορώδης Πέτρα	0.2	0.9
Προσκήνιο	Ξύλο	0.1	-
Ορχήστρα	Μάρμαρο	0.02	0.55
Ακροατήριο	Μάρμαρο	0.7*	0.55
Περιβάλλοντα Τοιχία	Πορώδης Πέτρα	0.2	0.9
Στέγη	Ξύλο	0.1	-
Σκηνικά	Μάρμαρο	0.02	0.55

2. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων T30, C80 και G για τις συχνοτικές μπάντες 500Hz και 1kHz των επιλεγμένων δεκτών εντός του Ωδείου, καθώς και της παραμέτρου STI παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.

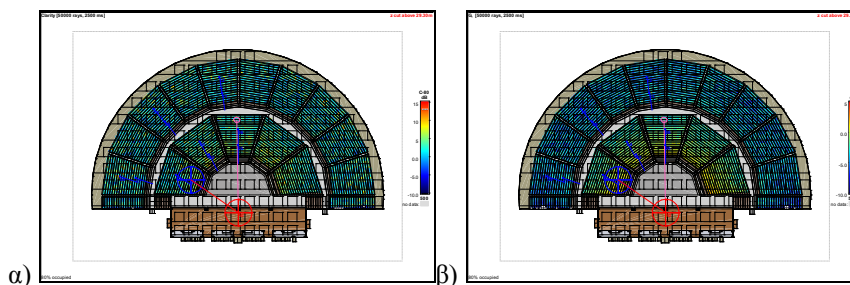
Πίνακας 2.1 Τιμές Ακουστικών Παραμέτρων για τους Επιλεγμένους Δέκτες

Δέκτης	T30	C80	G	STI
01	2.6	1.7	0.4	0.53 (Fair)
02	2.4	-1.3	-0.3	0.46 (Fair)
03	2.1	1.7	0.4	0.55 (Fair)
04	2.0	-0.9	-0.4	0.50 (Fair)
05	2.0	1.0	0.0	0.56 (Fair)
06	2.1	-1.2	-0.7	0.48 (Fair)
07	2.0	-1.8	-1.6	0.43 (Poor)
08	2.0	-1.6	-2.6	0.41 (Poor)
09	2.0	-2.6	-2.5	0.43 (Poor)
10	2.0	-1.8	-2.5	0.43 (Poor)
11	2.0	-2.4	-2.1	0.44 (Poor)
12	2.0	-2.3	-3.2	0.43 (Poor)

Οι προβλεπόμενοι χρόνοι αντήχησης για την παράμετρο T30 στις θέσεις των επιλεγμένων δεκτών κυμαίνονται μεταξύ 2s και 2.6s. Οι κύριοι παράγοντες συμβολής στη συσσώρευση ενέργειας και αύξησης τιμών της παραμέτρου είναι η σκηνή, το προσκήνιο, η στέγη και η ορχήστρα· επιφάνειες που αποτελούνται από υλικά με χαμηλούς δείκτες ηχοαπορρόφησης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναγράφονται στον Πίνακα 1.1 οι τιμές της παραμέτρου T30 που αφορούν στην παρούσα προσομοίωση είναι κατά βάση εντός των βέλτιστων ορίων καθώς και εντός του εύρους τιμών (2.2s – 5.97s) που έχουν δημοσιευτεί σε έρευνες προσομοιώσεων παρόμοιου τύπου δομών [2],[4],[11],[17].

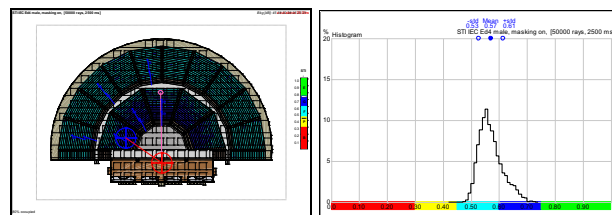
Η ακουστική χαρτογράφηση της Ευκρίνειας (C80) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2(α). Η Ευκρίνεια κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -2.6dB και 1.7dB στις θέσεις των επιλεγμένων δεκτών εντός του Ωδείου αναφορικά με τις συχνοτικές μπάντες 500Hz και 1kHz, ενώ παρουσιάζει ένα μέσο όρο της τάξεως των 2.2dB με τυπική απόκλιση 2.6dB εντός της συνολικής επιφάνειας του ακροατηρίου. Συγκεκριμένα, οι τιμές της Ευκρίνειας είναι εντός των επιτρεπτών ορίων κατά βάση στη περιοχή του κάτω κοίλου του Ωδείου.



Σχήμα 1.2 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγή και Δεκτών

Η ακουστική χαρτογράφηση του δείκτη ισχύος (G) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2(β). Με βάση τα παραπάνω, η μέγιστη ενίσχυση ήχου λόγω γεωμετρίας του Ωδείου που παρατηρείται στο κάτω κοίλο του Ωδείου και κυρίως στις πρώτες θέσεις είναι της τάξεως των 1 με 2dB για την συχνοτικές μπάντες 500Hz και 1kHz. Οι τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου, που είναι εντός του εύρους τιμών που έχουν παρατηρηθεί και σε αντίστοιχη βιβλιογραφία, αφορούν ως επί το πλείστον την περιοχή του κάτω κοίλου. Παρά ταύτα ο μέσος όρος της παραμέτρου στο σύνολο του Ωδείου φαίνεται να βρίσκεται στα -3.3dB με τυπική απόκλιση 1.9dB που είναι εκτός των βέλτιστων τιμών. Η σταδιακή μείωση αυτών των τιμών παρατηρείται καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή λόγω απόστασης από την αυτήν καθώς και άλλων βασικών επιφανειών ανάκλασης.

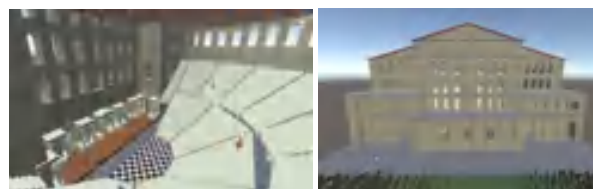
Τέλος, η απεικόνιση του Δείκτη Μετάδοσης Ομιλίας (STI) και της κατανομής του στην περιοχή των καθισμάτων, σύμφωνα με την προτεινόμενη κλίμακα αξιολόγησης ευκρίνειας ομιλίας [18], δίνεται στο Σχήμα 1.3. Ο μέσος όρος του STI στο Ωδείο φαίνεται να ήταν περίπου 0.57. Βάσει των παραπάνω, η ευκρίνεια της ομιλίας ταξινομείται ως «επαρκής» (fair). Σημειώνεται ότι οι υψηλότερες τιμές αυτής της παραμέτρου που αγγίζουν και το 0.7 παρατηρούνται στις κεντρικές και χαμηλότερες θέσεις του κάτω κοίλου. Παρόμοιες τιμές STI έχουν παρατηρηθεί σε αντίστοιχες προσομοιώσεις θεάτρων [19].



Σχήμα 1.3 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγής και Δεκτών

3. Εφαρμογή σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας (VR)

Ένας από τους βασικούς στόχους αυτής της μελέτης ήταν και η πρακτική υλοποίηση των παραπάνω ευρημάτων σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που προσφέρει δυνατότητα περιήγησης στο εσωτερικό του Ωδείου. Η παρούσα προσομοίωση περιλαμβάνει οπτικά και ηχητικά ερεθίσματα για να επιτευχθεί μια όσο το δυνατό πιο ολοκληρωμένη εμπειρία εικονικής πραγματικότητας με στοιχεία διάδρασης στο χώρο.



Σχήμα 3.1 Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας

Ο σχεδιασμός του μοντέλου για χρήση σε VR περιβάλλον περιλαμβάνει στοιχεία που δημιουργήθηκαν από την συγγραφέα καθώς και την βιβλιοθήκη 3D μοντέλων

3dWarehouse όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Η μηχανή παιχνιδιών που χρησιμοποιήθηκε για την διαμόρφωση του εικονικού περιβάλλοντος ήταν η Unity Engine (v2022.3 LTD). Η συγκεκριμένη μηχανή δίνει την δυνατότητα χρήσης αλγορίθμων που αξιοποιούν υπολογιστικά μοντέλα Head Related Transfer Function (HRTF) για αίσθηση χωρικού ήχου αλλά και εφέ απόσβεσης ήχου βάσει της απόστασης του χρήστη από συγκεκριμένα ακουστικά ερεθίσματα. Τα ηχητικά ερεθίσματα που προστέθηκαν τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές περιοχές του θεάτρου αφορούν περιβαλλοντικούς ήχους (πουλιά, ήχοι φύσης κτλ.), κουβέντα στο κοινό, τον ήχο των βημάτων του χαρακτήρα καθώς κινείται στο χώρο καθώς και τα auralised αρχεία ήχου που εισήχθησαν στην Unity από το CATT acoustic, στις μελετημένες θέσεις ακρόασης.

4. Συμπεράσματα

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το Ωδείο θα είχε μια καλή ακουστική απόκριση όντας κατειλημμένο στο 80% περίπου της χωρητικότητας του από ακροατές. Ο χρόνος αντήχησης και η ευκρίνεια βρέθηκαν να είναι εντός των βέλτιστων τιμών για μουσικές παραστάσεις στην πλειονότητα των θέσεων στο θέατρο. Υψηλή ευκρίνεια ομιλίας καθώς και επαρκής ισχύς του ήχου αναμένονταν σε κεντρικές θέσεις και στις χαμηλότερες περιοχές της κερκίδας.

Οι παλμικές αποκρίσεις που δημιουργήθηκαν υπολογιστικά σε επιλεγμένες θέσεις στο άνω και κάτω κοίλο του Ωδείου εξήχθησαν στη μηχανή παιχνιδιών Unity Engine 2022. Εκεί δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που παρέχει την δυνατότητα οπτικοακουστικής πλοήγησης στο χώρο του Ωδείου. Η επέκταση της παρούσας μελέτης θα αποτελεί μια ενίσχυση του τρισδιάστατου μοντέλου με την προσθήκη οπτικοακουστικών στοιχείων, τα οποία θα βελτιώσουν τη συνολική εμπειρία στο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας.

5. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη τους στον ελληνικό σύλλογο «ΔΙΑΖΩΜΑ» για την καθοδήγηση και την υποστήριξή τους σε σχέση με την παροχή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με το Ωδείο του Ηρώδη Αττικού. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Μανώλη Κορρέ, καθηγητή ιστορίας της αρχιτεκτονικής στο ΕΜΠ και συγγραφέα του βιβλίου «Η στέγη του Ηρωδείου», το οποίο χρησιμοποιήσαμε εκτενώς σε αυτήν την μελέτη. Το ερευνητικό έργο υποστηρίχθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα SONICOM (www.sonicom.eu), το οποίο χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα «Ορίζοντας Ευρώπη 2020» (European Union's Horizon 2020) με αριθμό έργου 101017743.

6. Βιβλιογραφία

- [1] L. Savioja and U. P. Svensson «Overview of geometrical room acoustic modeling techniques» J. Acoust. Soc. Am., vol. 138, no. 2, pp. 708-730 (2015).
- [2] J. H. Rindel «Roman theatres and revival of their acoustics in the ERATO project» Acta Acust. united with Acust., vol. 99, no. 1, pp. 21-29 (2013).

- [3] M. Korres, *Η στέγη του Ηρώδείου και άλλες γιγάντιες γεφυρώσεις*. Μέλισσα Αθήνα (2014).
- [4] S. L. Vassilantonopoulos and J. N. Mourjopoulos «The acoustics of roofed ancient odeia: The case of Herodes Atticus Odeion» *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 95, no. 2, pp. 291-299 (2009).
- [5] C. A. Goussios, C. V. Sevastiadis, G. M. Kalliris, and G. V. Papanikolaou «The Acoustics of Ancient Greek Odea» in *AES 116th Convention* (2004).
- [6] N. Hoekstra, B. Nicolai, B. Peeters, C. Hak, and R. Wenmaekers «Project Ancient Acoustics Part 2 of 4: Large-Scale Acoustical Measurements in the Odeon of Herodes Atticus and the Theatres of Epidaurus and Argos» in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics*, pp. 1-8 (2016).
- [7] Rees «Common Pitfalls in Computer Modelling of Room Acoustics» in *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 38 Pt.1 (2016).
- [8] J. H. Rindel and M. Lisa «The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres» in *The Acoustics of Ancient Theatres Conference Patras*, September 18-21, 2011 (2011).
- [9] G. Iannace, A. Trematerra, and M. Masullo «The large theatre of pompeii: Acoustic evolution» *Build. Acoust.*, vol. 20, no. 3, pp. 1-6 (2013).
- [10] G. Iannace and A. Trematerra «The rediscovery of Benevento Roman Theatre Acoustics» *J. Cult. Herit.*, vol. 15, no. 6, pp. 698-703 (2014).
- [11] U. Berardi, G. Iannace, and L. Maffei «Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii» *J. Cult. Herit.*, vol. 19, no. January, pp. 555-566 (2016).
- [12] M. Aretz and R. Orlowski «Sound strength and reverberation time in small concert halls» *Appl. Acoust.* (2009).
- [13] K. Bakogiannis, E. Tavelidou, and A. Andreopoulou «Estimation and assessment of vocal directivity variations as an effect of small body movements» in *Audio Engineering Society Convention 154*, Audio Engineering Society (May 2023).
- [14] ISO 9921:2003 Ergonomics — Assessment of Speech Communication (2003).
- [15] M. Vorländer *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Springer-Verlag, Berlin, 335 pp. (2008).
- [16] C. Van Loenen, M. Van Der Wilt, A. Diakoumis, R. Wenmaekers, C. Hak, and K. Hooymans «Project ancient acoustics part 3 of 4: Influence of geometrical and material assumptions on ray-based acoustic simulations of two ancient theatres» in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics* (2016).
- [17] R. Dragonetti, C. Ianniello, F. Mercogliano, and R. Romano «The acoustics of two ancient roman theatres in Pompeii» in *19th International Congress on Acoustics*, no. September (2007).
- [18] IEC 60268-16:2020, “Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index” International Electrotechnical Commission, 2020.
- [19] N. Haddad «Criteria for the assessment of the modern use of ancient theatres and odeia» *Int. J. Herit. Stud.*, vol. 13, no. 3, pp. 265-280 (2007).



Κυκλική Διεργαστηριακή Μέτρηση Δείκτη Ηχομείωσης R_w

Βασίλειος Βασιλειάδης Παναγιώτης Καραμπατζάκης
Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας, Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Α.Π.Θ.
vvasil@arch.auth.gr
pkar@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα μέσα του έτους 2023 το Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας συμμετείχε σε κυκλική Διεργαστηριακή μέτρηση του δείκτη Ηχομείωσης R_w με ονομασία *AQUS-INSULATION_1* και διοργανώτρια την ισπανική εταιρία *RPS-Qualitas SL*. Στην συγκεκριμένη Διεργαστηριακή μέτρηση συμμετείχαν συνολικά 18 διαπιστευμένα Εργαστήρια από 9 διαφορετικές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μεταξύ των Εργαστηρίων δεν υπήρχε καμία επαφή καθώς κανείς δεν γνώριζε ποια Εργαστήρια συμμετείχαν στην κυκλική Διεργαστηριακή μέτρηση εκτός της διοργανώτριας Εταιρίας.

Πανομοιότυπο δοκίμιο, δηλαδή ίδιων διαστάσεων, ίδιας σύστασης, απεστάλη και στα 18 Εργαστήρια την ίδια χρονική περίοδο. Υπήρχαν συγκεκριμένες οδηγίες τοποθέτησης του δοκιμίου στο άνοιγμα μετρήσεων του δείκτη Ηχομόνωσης. Τα Εργαστήρια είχαν την υποχρέωση διεξαγωγής πολλαπλών αναλυτικών μετρήσεων του δείκτη Ηχομόνωσης R_w του δοκιμίου που παρέλαβαν αλλά και της μέγιστης δυνατής τιμής του δείκτη R_{wmax} που ήταν δυνατό να επιτευχθεί στους θαλάμους των Εργαστηρίων.

Τηρήθηκαν αυστηρά τα πρότυπα διεξαγωγής εργαστηριακών μετρήσεων καθώς και αξιολόγησης των μετρήσεων του δείκτη ηχομείωσης

- ISO 10140-2:2021. "Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation"
- ISO 717-1:2020. "Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation"

Στη συνέχεια όλα τα αποτελέσματα απεστάλησαν στην διοργανώτρια εταιρία έτσι ώστε να αξιολογηθούν και να συγκριθούν με αυτά των υπολοίπων Εργαστηρίων. Στα τέλη του έτους η διοργανώτρια εταιρία εξέδωσε την τελική συγκριτική έκθεση αξιολόγησης της κυκλικής διεργαστηριακής μέτρησης του δείκτη ηχομείωσης R_w . Στην έκθεση αυτή γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά συχνότητα, καταγράφονται οι αποκλίσεις, υπολογίζονται αβεβαιότητες και τέλος αξιολογείται το κάθε εργαστήριο.

Proficiency Test of Sound Reduction Index Rw

ABSTRACT

The Laboratory of Architectural Technology participated last year in a Proficiency Test of Sound Reduction Index which was named AQUUS-INSULATION_1 and was organized by the Spanish independent consulting and technical advisory company RPS-Qualitas SL. Proficiency Test AQUUS-INSULATION_1 programme involved a total of 18 accredited laboratories from 9 different countries. Through the Proficiency Test there was no contact between the Laboratories.

The identical Specimen was sent at the same period to each one of the participated laboratories. The placement of the Specimen followed specific Instructions from the Organizer. Multiple Measurements of the Sound Reduction Index had to be carried out from the Laboratories. They also had to measure the R_{wmax} of the test rooms.

The Measurements compliance with following Standards

- ISO 10140-2:2021. "Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 2: Measurement of airborne sound insulation"
- ISO 717-1:2020. "Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation"

The results were sent to the Organizer Company which compared them. At the end of the year the Organizer presented the final report. In this Report every Laboratory was evaluated, based on the results of the Noise Reduction Measurement.

Εισαγωγή

Στα μέσα του έτους 2023 το Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας συμμετείχε σε κυκλική Διεργαστηριακή μέτρηση του δείκτη Ηχομείωσης R_w με ονομασία AQUUS-INSULATION_1 και διοργανώτρια την ισπανική εταιρία RPS-Qualitas SL. Στην συγκεκριμένη Διεργαστηριακή μέτρηση συμμετείχαν συνολικά 18 διαπιστευμένα Εργαστήρια από 9 διαφορετικές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μεταξύ των Εργαστηρίων δεν υπήρχε καμία επαφή καθώς κανείς δεν γνώριζε ποια Εργαστήρια συμμετείχαν στην κυκλική Διεργαστηριακή μέτρηση εκτός της διοργανώτριας Εταιρίας.

Πανομοιοτύπο δοκίμιο, δηλαδή ίδιων διαστάσεων, ίδιας σύστασης, απεστάλη και στα 18 Εργαστήρια την ίδια χρονική περίοδο. Υπήρχαν συγκεκριμένες οδηγίες τοποθέτησης του δοκιμίου στο άνοιγμα μετρήσεων του δείκτη Ηχομόνωσης. Τα Εργαστήρια είχαν την υποχρέωση διεξαγωγής πολλαπλών αναλυτικών μετρήσεων του δείκτη Ηχομόνωσης R_w του δοκιμίου που παρέλαβαν αλλά και της μέγιστης δυνατής τιμής του δείκτη R_{wmax} που ήταν δυνατό να επιτευχθεί στους θαλάμους των Εργαστηρίων.

1. Μέτρηση δείκτη Ηχομόνωσης δοκιμίου

Το δοκίμιο ήταν μια μοριοσανίδα MDF διαστάσεων 1230 X 1480mm, πάχους 10mm και πυκνότητας περίπου 740 kg/m³ η οποία έφτασε στο Εργαστήριο σε

ιδιαίτερα προσεγμένη συσκευασία. Το δοκίμιο ήταν του κατασκευαστή FINSA και η ονομασία του ήταν FIBRAPAN.

Σύμφωνα με την διοργανώτρια εταιρία όλα τα δοκίμια που εστάλησαν στα συμμετέχοντα εργαστήρια ήταν από την ίδια παρτίδα παραγωγής έτσι ώστε να αποφευχθούν πιθανές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των δοκιμίων.

Η τοποθέτηση του δοκιμίου έγινε σύμφωνα με οδηγίες της διοργανώτριας εταιρίας. Το δοκίμιο, έπρεπε, μετά την τοποθέτηση να παραμείνει στο άνοιγμα για τουλάχιστον 24 ώρες πριν την υλοποίηση της πρώτης μέτρησης.

Πριν την μέτρηση του δείκτη ηχομείωσης μετρήθηκαν ο χρόνος αντήχησης, η θερμοκρασία η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση, όπως προβλέπει το σχετικό πρότυπο.



Εικόνα 1.1



Εικόνα 1.2

2. Μέτρηση του R_f για τον προσδιορισμό της επιρροής πλευρικών μεταδόσεων

Μία άλλη απαίτηση της κυκλικής διεργαστηριακής μέτρησης ήταν ο προσδιορισμός της επιρροής των πλευρικών μεταδόσεων των θαλάμων μέτρησης. Η μέτρηση του δείκτη R_f έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 10140-2:2021. Στο δοκίμιο προστέθηκε κατασκευή από γυψοσανίδα με μεταλλικό έλασμα 2mm και στο ενδιάμεσο πετροβάμβακας. Η απόσταση ασφαλείας μεταξύ της μέτρησης του δοκιμίου R_w και της μέτρησης του R_f είναι τα 15dB. Σε περίπτωση μικρότερης διαφοράς απαιτούνται κάποιες διορθώσεις στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Στην περίπτωση μας η διαφορά ήταν στα 35dB.



Εικόνα 2.1

3. Μοντέλο

Ταυτόχρονα με τις εργαστηριακές μετρήσεις στον χώρο του εργαστηρίου, για λόγους αρχείου και σύγκρισης για εκπαιδευτική χρήση, σε δεύτερο χρόνο, έγιναν υπολογισμοί του δείκτη R_w σε λογισμικό υπολογισμού ηχομονωτικής ικανότητας δομικών στοιχείων.

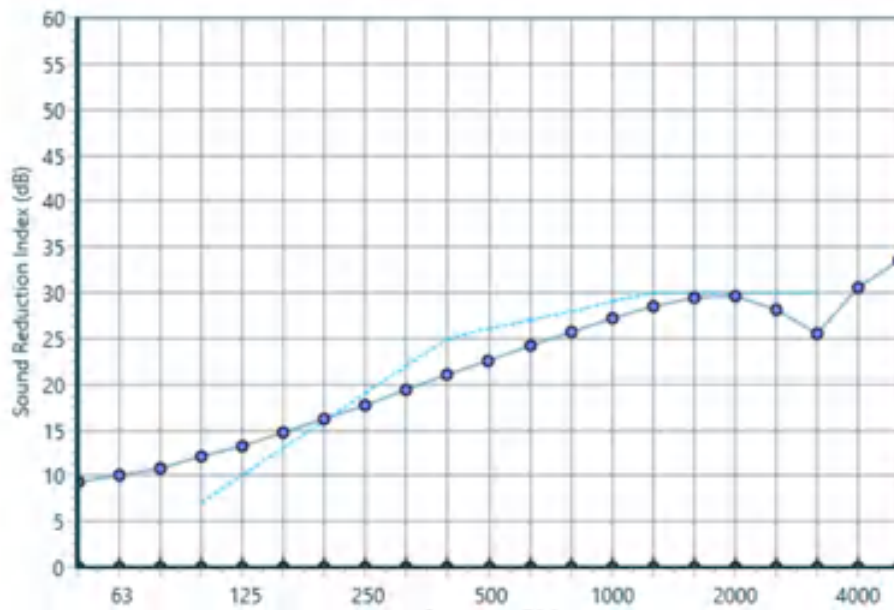
Οι υπολογισμοί έγιναν με την χρήση του λογισμικού INSUL - Sound Insulation Prediction software V9.0.24 B3 της εταιρίας λογισμικού Marshall Day Acoustics Ltd.

Οι υπολογισμοί με το λογισμικό Insul για τις μονοκέλυφες κατασκευές όπως αυτή του δοκιμίου, βασίζονται κυρίως στα παρακάτω

- Στο νόμος της μάζας (Mass Law)
- Στον υπολογισμό της σημαντικής συχνότητα (Critical frequency)

Το δε αποτέλεσμα κατά την κατασκευάστρια εταιρία του λογισμικού μπορεί να αποκλίνει από τις πραγματικές μετρήσεις $\pm 3\text{dB}$.

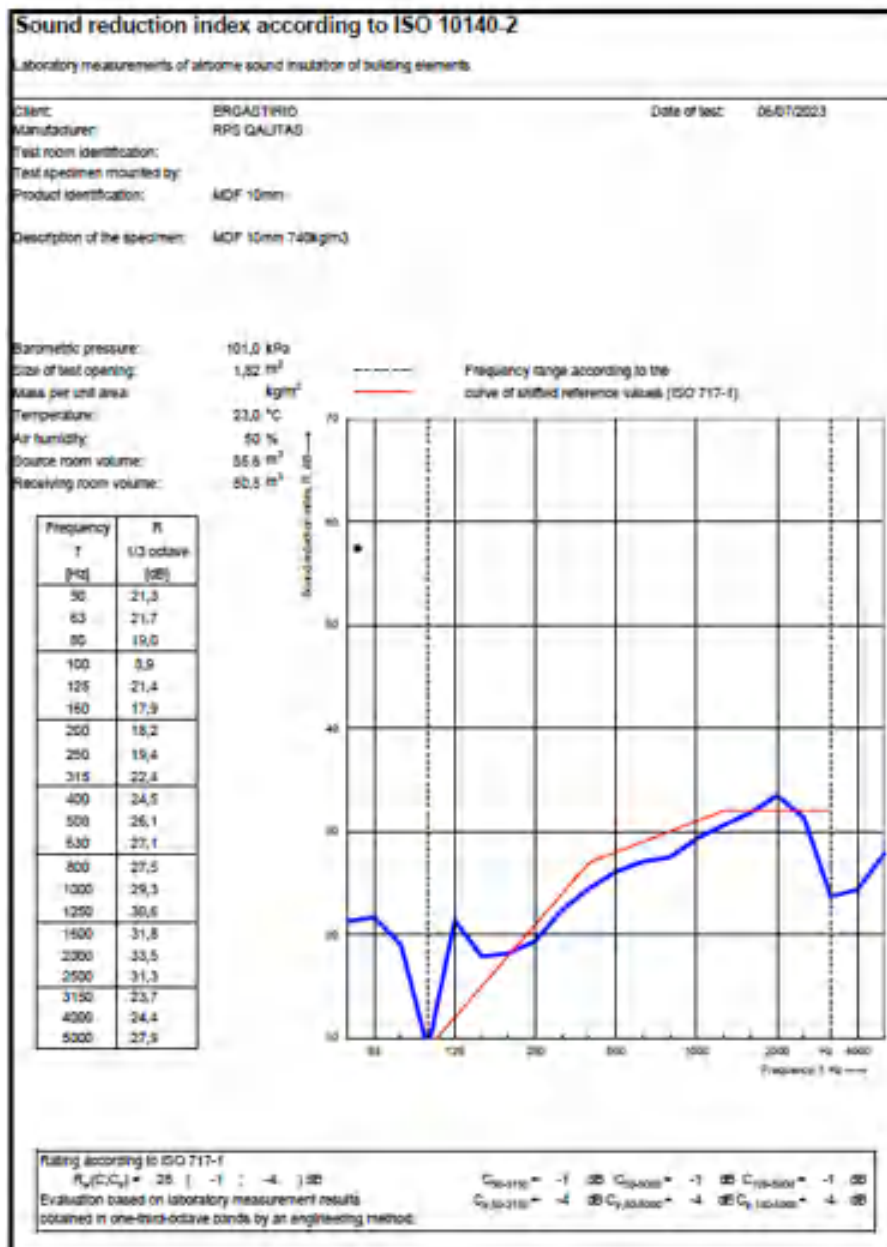
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 3.1 Το γράφημα του Sound Reduction Index ανά συχνότητα

Η τιμή που υπολογίστηκε από το λογισμικό για το εν λόγω δοκίμιο είναι $R_w=26\text{dB}$ (C:1, Ctr:3).

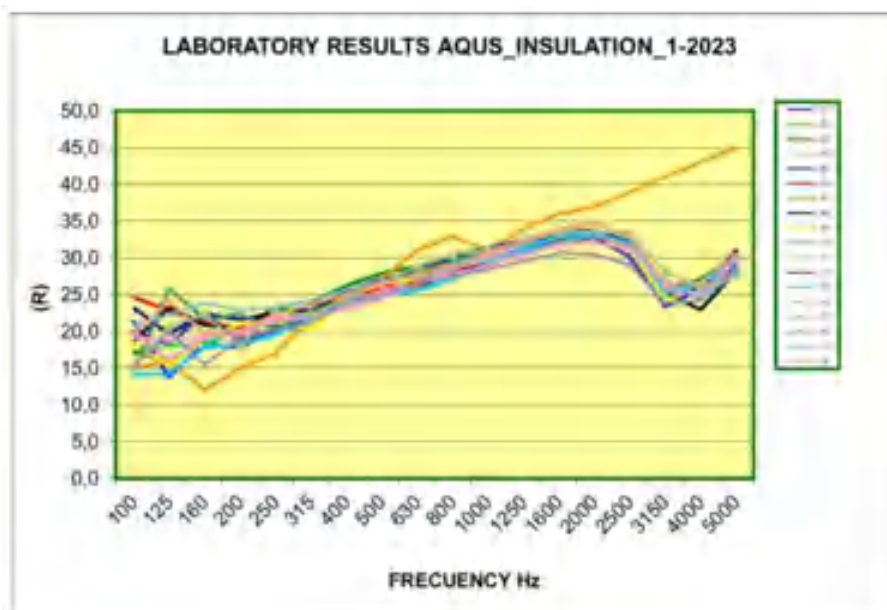
4. Αποτελέσματα μετρήσεων



Εικόνα 4.1 Φύλλο αποτελέσματος μέτρησης

5. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων από Διοργανώτρια Εταιρεία

Η διοργανώτρια εταιρία αφού συνέλεξε τα αποτελέσματα μετρήσεων όλων των Εργαστηρίων εξέδωσε συγκριτική έκθεση στην οποία αξιολογεί τα συμμετέχοντα Εργαστήρια. Παρακάτω παρατίθενται τα σημαντικότερα στοιχεία της έκθεσης.



Σχήμα 5.1 Αποτελέσματα όλων των Εργαστηρίων (Lab 04)



Σχήμα 5.2 Αξιολόγηση των Εργαστηρίων (Lab 04)

Το Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας (Lab 04) αξιολογήθηκε με άριστα 10 από την διοργανώτρια εταιρία της κυκλικής διεργαστηριακής μέτρησης του δείκτη ηχομείωσης, γεγονός που επιβεβαιώνει την διαχρονική αξιοπιστία των μετρήσεων του. Εγκαταστάσεις εξοπλισμός και προσωπικό λειτουργούνε στα πλαίσια των σχετικών Ευρωπαϊκών Προτύπων παρέχοντας έγκυρες υπηρεσίες στον κλάδο των δομικών υλικών και στοιχείων.

6. Αναφορές

[1] ISO 10140-1:2021. “Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements Part 1: Application rules for specific products”

[2] ISO 10140-2:2021. “Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements Part 2: Measurement of airborne sound insulation”

[3] ISO 10140-4:2021. “Acoustics. Laboratory measurement of sound insulation of building elements Part 4: Measurement procedures and requirements”

[4] ISO 717-1:2020. “Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation

[5] ISO 5725-2:2019. “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method”.

[6] PROFICIENCY TEST AQUUS-INSULATION_1 FINAL REPORT, Madrid, December, 2023



Εφαρμογές προσαρμοζόμενης ακουστικής σε Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων σχολικού συγκροτήματος στον Βόλο

Κωνσταντίνος Αμυγδαλίτης^{1,*}, Γεώργιος Καλλίρης²

¹ Εκπαιδευτικός, 1^ο Εργ. Κέντρο Βόλου, MEd, MSc Acoustics, ΑΣΠ-ΕΑΠ

² Καθηγητής ΑΠΘ, ΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ

*std131349@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έλλειψη ακουστικού σχεδιασμού σε κτίρια που στεγάζουν υπηρεσίες εκπαίδευσης προβάλλει την ανάγκη ανάληψης δράσης για την αλλαγή νοοτροπιών. Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται τον ακουστικό επανασχεδιασμό μίας Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων (ΑΠΧ), ενός σχολικού συγκροτήματος του Βόλου, με αξιοποίηση εφαρμογών προσαρμοζόμενης ακουστικής. Η υφιστάμενη ακουστική ταυτότητα του χώρου και η μελέτη ακουστικής αναβάθμισης έγιναν με επιτόπιες μετρήσεις και χρήση λογισμικού μοντελοποίησης και ακουστικής πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση των ακουστικών συνθηκών και συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα, ανεξάρτητα από το είδος χρήσης της ΑΠΧ.

Adaptive acoustics approaches in a multi-purpose school hall in Volos

ABSTRACT

The lack of acoustic design in buildings housing education services highlights the need for action to change attitudes. The present study deals with the acoustic redesign of a multi-purpose school hall, in a Volos' school complex, using adaptive acoustics applications. The existing acoustic identity of the hall and the acoustic upgrade study were implemented with on-site measurements and the use of modeling and acoustic prediction software. The results showed an improvement of the acoustic conditions and compliance with international standards, regardless of the type of use of the Multi-Purpose Hall.

Εισαγωγή

Ο όρος «Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων, ΑΠΧ» προσδιορίζει κυρίως τους χώρους απόδοσης μουσικών έργων από συμφωνικές ορχήστρες, χωρίς όμως να αποκλείεται η χρήση του χώρου για θεατρικές παραστάσεις και συναυλίες σύγχρονου μουσικού περιεχομένου. Ο Barron [1] παραφράζοντας τη άποψη του Tolstoy για τις μη ευτυχημένες οικογένειες αναφέρει ότι κάθε ΑΠΧ έχει προβλήματα για τους

δικούς της λόγους. Τι συμβαίνει όμως όταν μεταξύ των χρήσεων περιλαμβάνονται και αθλητικές δραστηριότητες, όπως συμβαίνει στις σχολικές ΑΠΧ; Οι χώροι αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για το μάθημα της Φυσικής Αγωγής, παραχωρούνται για τη διεξαγωγή πολιτιστικών εκδηλώσεων και συνεδριάσεων υπό την προϋπόθεση ότι αμέσως μετά πρέπει να αποκαθίσταται η αθλητική τους χρήση και δεν επιτρέπεται η μόνιμη εγκατάσταση αντικειμένων όπως σκηνή, εξέδρα, και καρέκλες. Όταν λοιπόν τίθεται το ζήτημα της ακουστικής αναβάθμισης μίας τέτοιας αίθουσας, είναι προφανές ότι η πρωτεύουσα χρήση (άθληση), επιβάλλει μία σειρά περιορισμών στην επιλογή των ηχο-διαμορφωτικών υλικών και κατ' επέκταση των διαθέσιμων λύσεων. Οι εφαρμογές προσαρμοζόμενης (ή ρυθμιζόμενης) ακουστικής απαντούν στο πρόβλημα αντιμετωπίζοντας τον ακουστικό σχεδιασμό όχι ως μία άκαμπτη διαδικασία, αλλά ως ένα σύνολο δυναμικών και παραμετροποιήσιμων παρεμβάσεων που εξίσου εκμεταλλεύονται τις ιδιότητες απλών υλικών, όπως οι κουρτίνες, έως και σύνθετων κατασκευών, όπως οι συσκευές μεταβλητού συντονισμού [2].

1. Ακουστική Αιθουσών Πολλαπλών Χρήσεων (ΑΠΧ)

1.1 Ηχομόνωση και ηχοπροστασία

Στο Άρθρο 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού [3] αξιολογείται η ωριαία ισοδύναμη Α-ηχοστάθμη, $L_{Aeq,h}$ dB(A) για τον αερόφερτο ήχο, ως παράμετρος ηχοπροστασίας με έλεγχο της μέγιστης τιμής της. Για τα κτίρια που στεγάζουν υπηρεσίες εκπαίδευσης η $L_{Aeq,h}$ δεν πρέπει να ξεπερνά τα 35 dB(A) για κανονική ακουστική άνεση.

Στις ΗΠΑ το εθνικό ινστιτούτο τυποποίησης ANSI στο πρότυπο S12.60 [4] ορίζεται μεταξύ άλλων ότι η μέγιστη ωριαία σταθμισμένη Α ηχοστάθμη σταθερού θορύβου βάθους σε χώρους εκπαίδευσης με όγκο μικρότερο των 566 m³ δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 35 dB(A).

Στο Ηνωμένο Βασίλειο το τεχνικό δελτίο BB93 [5] παρουσιάζει τα ελάχιστα πρότυπα απόδοσης για την ακουστική των σχολικών κτιρίων. Οι ανώτατες αποδεκτές τιμές θορύβου βάθους για ΑΠΧ με διαφοροποίηση μεταξύ νέων και ανακαινισμένων κτιρίων είναι 35 και 40 dB(A) αντίστοιχα (καταγραφή της ισοδύναμης Α ηχοστάθμης για χρονική περίοδο 30 min).

1.2 Χρόνος αντήχησης, παράμετροι καταληπτότητας

Για τους χώρους μάθησης με όγκο μικρότερο των 566 m³ το πρότυπο ANSI S12.60 θέτει ως μέγιστο επιτρεπτό χρόνο αντήχησης τα 0.7 sec, ενώ για μεγαλύτερους χώρους όπως οι ΑΠΧ προτρέπει σε στοχευμένη διαχείριση ανάλογα με χρήση. Το τεχνικό δελτίο BB93 για τις ΑΠΧ θέτει ως μέγιστο μέσο χρόνο αντήχησης T_{mf} (sec) ένα εύρος τιμών μεταξύ 0.8 κι 1.2 sec. Δεν υπάρχει προς το παρόν σχετικό εθνικό κείμενο που να αναφέρεται σε στον χρόνο αντήχησης ως παράμετρο ακουστικής αξιολόγησης εσωτερικών χώρων.

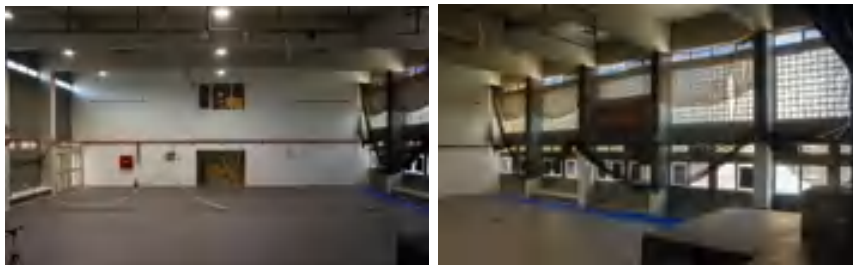
Καθώς οι σχολικές ΑΠΧ αποτελούν, ανεξάρτητα από τις επιμέρους χρήσεις, χώρους εκπαίδευσης, ταυτόχρονα με τον χρόνο αντήχησης ελέγχονται και βασικοί παράμετροι καταληπτότητας όπως η ευκρίνεια (Clarity), C_{50} , η διακριτότητα (Definition), D_{50} και ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index, STI).

1.3 Συστήματα ηχοτροφοδοσίας σε κλειστούς χώρους

Στους κλειστούς χώρους απαιτείται ομοιογένεια στην ηχητική κάλυψη. Σε κάθε θέση του ακροατηρίου η συνολική ηχοστάθμη θα πρέπει να εμφανίζει ελάχιστη διακύμανση που διατυπώνεται στις προδιαγραφές σχεδιασμού. Όταν σε μία ΑΠΧ διεξάγονται εκδηλώσεις λόγου η στάθμη ακουστικής πίεσης θεωρείται ιδανική όταν δεν υπερβαίνει τα 90 dB, ενώ για την υποστήριξη συναυλιών οι απαιτήσεις μπορεί να ξεπεράσουν τα 110 dB, ανάλογα με το είδος της μουσικής [6]. Με αυτά τα δεδομένα επιβάλλεται η υποστήριξη με συστήματα ηχοτροφοδοσίας που στην ιδανική περίπτωση θα λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε χρήσης. Ωστόσο μία πλημμελώς υπολογισμένη ηλεκτρακουστική εγκατάσταση μπορεί να μεγεθύνει τα ακουστικά προβλήματα ενός χώρου.

2. Η ΑΠΧ του πρώην Ενιαίου Πολυκλαδικού Λυκείου, ΕΠΑ

Η ΑΠΧ ανήκει στο σχολικό συγκρότημα του πρώην ΕΠΑ. Χωροταξικά τοποθετείται δεξιά της κεντρικής πύλης του σχολικού συγκροτήματος. Διαθέτει ανεξάρτητη είσοδο με πρόσβαση μέσω εξωτερικού στεγασμένου διαδρόμου που τη χωρίζει από το παρακείμενο κλειστό γυμναστήριο και δύο πλαϊνές εισόδους τοποθετημένες διαγώνια, εκατέρωθεν της μεγαλύτερης διάστασης του κτιρίου. Η απόσταση της αίθουσας από την περιμετρική χάραξη του συγκροτήματος είναι 3.3 m και 9.3 m συνολικά από την οδό Σταδίου που αποτελεί πρωτεύουσα οδική αρτηρία. Η αίθουσα έχει όγκο 2358 m³ και εμβαδόν δαπέδου 345.5 m². Το ποσοστό κάλυψης του κελύφους σε υαλοπίνακες είναι 7% και δεν διαθέτει καμίας μορφής ακουστική διαμόρφωση.



Σχήμα 2.1 Υφιστάμενη μορφολογία του εσωτερικού της ΑΠΧ

3. Μεθοδολογία

Ο προσδιορισμός των ακουστικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε με επιτόπιες μετρήσεις στον χώρο που περιλάμβαναν την καταγραφή του θορύβου βάθους, την εκτίμηση του δείκτη ηχομείωσης, την διεξαγωγή ηχοβολισμού για την μέτρηση της κρουστικής απόκρισης σε επιλεγμένες θέσεις πηγής – δέκτη και την ακουστική προσομοίωση σε αμιγώς υπολογιστικό περιβάλλον με συγκριτική ανάλυση των ευρημάτων των δύο προσεγγίσεων. Κατά την ακουστική προσομοίωση δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα, ένα για την υφιστάμενη αποτύπωση του χώρου και ένα για την αποτύπωσή του στην αρχική μορφή, απαλλαγμένο δηλαδή από αυθαίρετες, πρόσθετες κατασκευές.

Το στάδιο του επανασχεδιασμού τεκμηριώθηκε αποκλειστικά με μοντελοποίηση. Η ακουστική βελτίωση εξειδικεύτηκε στη μελέτη δύο ακουστικών μοντέλων: τον σχεδιασμό της αίθουσας για άθληση (κύρια χρήση) και για πολιτιστικές δραστηριότητες (δευτερεύουσα χρήση). Υιοθετώντας πρακτικές μόνιμης και προσαρμοζόμενης ακουστικής, προηγήθηκε η συνολική βελτίωση της ακουστικής φυσιογνωμίας του χώρου με λύσεις μόνιμου χαρακτήρα. Στη συνέχεια επιδιώχθηκε η βέλτιστη ακουστική επίδοση σύμφωνα με τα διεθνή για τους χώρους άθλησης πρότυπα, με την προσθήκη εξοπλισμού και ειδικών πολυμορφικών κατασκευών. Συμπληρωματικά, για την υποστήριξη των δευτερευουσών χρήσεων μελετήθηκε σύστημα ηχοτροφοδοσίας με έμφαση στη δυνατότητα επίτευξης της κατάλληλης ακουστικής στάθμης ανά χρήση, στην ομοιόμορφη κάλυψη του ακροατηρίου τόσο σε ακουστική στάθμη, όσο σε φασματικό περιεχόμενο, τη συμβατότητα με σύγχρονες και αναπτυσσόμενες τεχνολογίες δικτύωσης και την δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων (DSP).

4. Υλοποίηση και αποτελέσματα

4.1 Ηχομόνωση – Ηχοπροστασία

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα μεταξύ 10 και 26 Φεβρουαρίου 2021. Στην ΑΠΧ δεν υπάρχουν ενεργά συστήματα ψύξης, θέρμανσης και εξαερισμού, καθώς και άλλου είδους εξοπλισμός, όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές και οπτικοακουστικά συστήματα.

Πίνακας 4.1 Συνοπτική επισκόπηση ΑΠΧ και μετρήσεις

Όγκος (m ³)	Εμβαδόν δαπέδου (m ²)	Ποσοστό (%) επιφάνειας υαλοπινάκων	Ακουστική διαμόρφωση χώρου	Θόρυβος βάθους ⁽¹⁾ L _{Aeq,40min} (dB)	Κυκλοφοριακός θόρυβος ⁽¹⁾ L _{Aeq,30min} (dB)
2358	345.5	7	καμία	46.1	61

(1) Αναφορά στις μέγιστες καταγεγραμμένες τιμές μεταξύ πρωινής και απογευματινής ζώνης

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο σχολικό συγκρότημα δεν υπήρχε καμία άλλη δραστηριότητα. Όλα τα παράθυρα και οι πόρτες της αίθουσας παρέμειναν κλειστά και ο φωτισμός ανοικτός. Σε κάθε λήψη καταγράφηκε ο θόρυβος βάθους για χρονική διάρκεια μίας διδακτικής ώρας, δηλαδή 40 min. Παράλληλα με την καταγραφή του θορύβου βάθους μετρήθηκε ο κυκλοφοριακός θόρυβος για χρονικά διαστήματα 30 min.

4.2 Χρόνος αντήχησης και ακουστικές παράμετροι

Επιλέχθηκαν οκτώ σημεία μέτρησης αποφεύγοντας την τοποθέτηση σε αποστάσεις μικρότερες του 1 m από τις πλαϊνές επιφάνειες, ενώ η θέση της πηγής ορίστηκε πλησίον του κέντρου της υπάρχουσας σκηνής και σε απόσταση 4.1 m από τον οπίσθιο τοίχο. Από την

επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 4.2 Ανάλυση μετρήσεων

T ₃₀ (sec)	3.69
C ₅₀	-3.69
D ₅₀ (%)	26.95
STI	0.37

Η ακουστική αξιολόγηση της ΑΠΧ ολοκληρώθηκε με σχετική μελέτη σε λογισμικό μοντελοποίησης και πρόβλεψης με τα αποτελέσματα να μην εμφανίζουν αποκλίσεις από τα αντίστοιχα των μετρήσεων πεδίου. Ο χρόνος αντήχησης T_{30} υπολογίστηκε στα 3.66 s, ο δείκτης ευκρίνειας C_{50} εκτιμήθηκε -3.41, η διακριτικότητα D_{50} 31.68%, ενώ ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI βρέθηκε 0.37. Επιπρόσθετα, ο λόγος της απευθείας προς την ανακλώμενη ακουστική ενέργεια D/R βρέθηκε αρνητικός για όλες τις θέσεις μέτρησης με διακύμανση τιμών από -4.1 dB (εγγύτερη προς την πηγή θέση) έως -14.3 dB (απομακρυσμένη θέση). Η ακουστική πρόβλεψη ολοκληρώθηκε με ένα επιπλέον μοντέλο όπου εφαρμόστηκε εικονική αφαίρεση των πρόσθετων κατασκευών για να αναδειχθεί η εκ κατασκευής ακουστική ακαταλληλότητα της αίθουσας. Τα αποτελέσματα έδειξαν χρόνο αντήχησης 4.23 sec και ανάλογη επιδείνωση των επιμέρους ακουστικών παραμέτρων.

4.3 Ακουστική βελτίωση

Για την καλύτερη εκμετάλλευση του χώρου προτείνονται εργασίες μικρής κλίμακας που εστιάζουν στην τροποποίηση της κύριας εισόδου. Η αρχική κατασκευή περιλαμβάνει δύο βοηθητικούς χώρους εκατέρωθεν της κύριας εισόδου, οι οποίοι παραμένουν ανεκμετάλλευτοι. Η πρόταση αποδίδει στους χώρους διπλή χρήση: Αφενός τη λειτουργία τους ως προθαλάμους που θα αποτρέπουν ανεπιθύμητη όχληση στην κύρια αίθουσα κατά την είσοδο του κοινού, ειδικά στις περιπτώσεις εκδηλώσεων λόγου ή οπτικοακουστικών παραστάσεων, αφετέρου, οι επαρκείς τους διαστάσεις επιτρέπουν την αξιοποίησή τους ως βεστιάριο. Η είσοδος του κοινού θα γίνεται από τις δύο θύρες που θα κατασκευαστούν στο βάθος των προθαλάμων, λαμβάνοντας υπόψη τα στατικά στοιχεία του κτιρίου. Η πρόταση περιλαμβάνει επίσης την αναβάθμιση του υφιστάμενου δωματίου ελέγχου. Η πρόσβαση θα γίνεται πλέον μέσω της κεντρικής σκάλας των αναδιπλούμενων καθισμάτων, έπειτα από τροποποίηση του εσωτερικού κουφώματος με την προσθήκη θύρας εισόδου και προστατευτικού κιγκλιδώματος, αποκλειστικά για τις εκδηλώσεις όπου θα κρίνεται αναγκαία η χρήση του ηχητικού εξοπλισμού.



Σχήμα 4.1 Τροποίση της εισόδου (αριστερά) και πρόσβαση στο δωμάτιο ελέγχου από τη σκάλα των αναδιπλούμενων καθισμάτων (δεξιά)

Στον τομέα της ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας προτείνονται αντικαταστάσεις των υαλοπινάκων με στόχο την αύξηση του δείκτη ηχομείωσής τους από 26 (-1;-2) dB (υφιστάμενη τιμή), στα 38 (-1;-5) dB. Η ενέργεια αυτή δύναται να αυξήσει τον δείκτη R_w της σύνθετης επιφάνειας του τοίχου με την μεγαλύτερη κάλυψη σε υαλοπίνακες από 32 (-1;-2) dB σε 43 (-1;-5) dB. Επιπρόσθετα προτείνεται η αντικατάσταση των ανακλινόμενων παραθύρων που βρίσκονται κάτω από την οροφή και στις δύο

πλευρές της αίθουσας με σταθερά, κλειστού τύπου και η αντικατάσταση των θυρών εισόδου με ακουστικές πόρτες που λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες ηχητικής όχλησης που επικρατούν στην περιοχή, υπαγορεύοντας μία επιλογή που θα συνδυάζει τον βέλτιστο λόγο κόστους – απόδοσης και προτεινόμενο συντελεστή ηχομείωσης $R_w > 40$ dB.

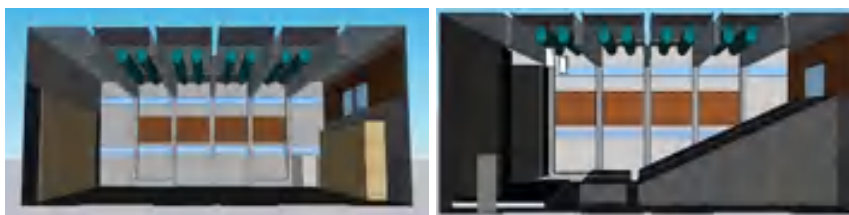
Για την ακουστική πρόβλεψη κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα: ένα με εφαρμογή των προτάσεων ακουστικής θεραπείας και με προορισμό χρήσης την άθληση και ένα με προορισμό χρήσης τις οπτικοακουστικές παραστάσεις περιλαμβάνοντας τις ακόλουθες παρεμβάσεις:

Δάπεδο. Τοποθέτηση συνθετικού δαπέδου πολλαπλών χρήσεων πάχους ≥ 6 mm. Το δάπεδο θα πρέπει να εξασφαλίζει την κατάλληλη απόδοση στα υποστηριζόμενα αθλήματα, ικανοποιητική αντοχή στην καταπόνηση από κύλιση αντικειμένων και στη χρήση από κοινό που δεν θα φορά αποκλειστικά αθλητικά υποδήματα. Οι τεχνικές προδιαγραφές θα πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα που αφορούν σε δάπεδα κλειστών αθλητικών χώρων (EN 14904).

Οροφή. Προτείνεται η τοποθέτηση διάτρητων μεταλλικών απορροφητών 600x600 mm με επένδυση κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης της οροφής και εκατέρωθεν αυτής με συνολική κάλυψη 86.4 m², καθώς και ειδικών πλαστικών μεμβρανών με σύστημα πλήρωσης με αέρα.

Πλευρικές επιφάνειες. Τοποθέτηση διάτρητων ξύλινων πάνελ 600x600 mm σε τμήμα της επιφάνειας με τους λιγότερους υαλοπίνακες και στον οπίσθιο τοίχο και σε ύψος ίσο ή μεγαλύτερο των 3 m από το δάπεδο, ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία τους από την ακούσια φθορά. Η συνολική κάλυψη αφορά 50.15 m² πλευρικών επιφανειών. Ανάρτηση ακουστικών κουρτινών (90 m²) κατά μήκος της πλευρικής επιφάνειας με τη μεγαλύτερη κάλυψη από υαλοπίνακες οι οποίες θα αναπτύσσονται κατά περίπτωση.

Ακροατήριο. Σύστημα καθισμάτων με μηχανισμό αναδίπλωσης και χειροκίνητη ή υποβοηθούμενη από ηλεκτρικούς κινητήρες ανάπτυξη σε ελάχιστο χρόνο. Η πρόταση περιλαμβάνει δύο μηχανισμούς αναδίπλωσης 12 επιπέδων, 168 θέσεων. Το σύστημα σε πλήρη ανάπτυξη έχει διαστάσεις 11.5 m μήκος, 10.1 m πλάτος και 4.4 m ύψος, ενώ η πρόσβαση εξασφαλίζεται μέσω της κεντρικής σκάλας πλάτους 1.2 m. Επέκταση του διαθέσιμου αριθμού θέσεων στις 210 με συστοιχίες καθισμάτων που φέρουν πολυκατευθυντικούς τροχούς. Μετά το τέλος των εκδηλώσεων οι τροχήλατες σειρές καθισμάτων αποθηκεύονται στους διαδρόμους εισόδου, μέχρι την επόμενη χρήση.



Σχήμα 4.2 Μοντέλο ΑΠΧ με υιοθέτηση όλων των προτεινόμενων παρεμβάσεων. Κύρια χρήση (αριστερά), δευτερεύουσα χρήση (δεξιά)

Σκηνή. Ανακλινόμενη κατασκευή 50 m². Κατά τη χρήση της αίθουσας για άθληση, τα τμήματα της εξέδρας αναδιπλώνονται στον τοίχο με την υποστήριξη

παλάγκων ανύψωσης και στη συνέχεια ασφαλίζονται σε κάθετη θέση. Κουρτίνες βαρέως τύπου σε σχήμα Γ εκατέρωθεν της σκηνής (κουΐνες).

Σύστημα ηχοτροφοδοσίας.

Ανάρτηση δύο παθητικών ηχείων τύπου ανάκλασης χαμηλών, 15 ιντσών, πλήρους φάσματος, με δυνατότητα επιλογής της κατευθυντικότητας, ανάλογα με τον προσανατολισμό της κόρντας υψηλών συχνοτήτων. Τα ηχεία τοποθετήθηκαν σε ύψος 5.5 m πάνω από τη σκηνή και η μεταξύ τους απόσταση ορίστηκε στα 6 m, ενώ η σχετική τους θέση ως προς το όριο της σκηνής τέθηκε 0.5 m πίσω από το μέτωπο προς το ακροατήριο. Στα ηχεία δόθηκε μικρή κλίση 1° ως προς τον κατακόρυφο άξονα στοχεύοντας στην τελευταία σειρά των ακροατών.

Η ακουστική πρόβλεψη από την μελέτη των δύο μοντέλων με εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων οδήγησε στα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 4.3 Συνοπτική σύγκριση των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης αναφορικά με τις προδιαγραφές BB93

Χρόνος Αντήχησης (sec)	Αποτελέσματα	Προδιαγραφές BB93
Υφιστάμενος	3.69	
Κενή αίθουσα	4.23	
Άθληση – Μεμβράνες οροφής off – Όλες οι κουρτίνες κλειστές	2.00	Αίθουσα αθλητικών δραστηριοτήτων ≤ 2.0
Άθληση – Μεμβράνες οροφής on – Όλες οι κουρτίνες κλειστές	1.83	
Ομιλία – Μεμβράνες οροφής off – Όλες οι κουρτίνες ανοιχτές	0.93	ΑΠΧ, οπτικοακουστικές παρουσιάσεις 0.8 – 1.2
Ομιλία – Μεμβράνες οροφής on – Όλες οι κουρτίνες ανοιχτές	0.80	
Μουσική χωρίς ηχοτροφοδοσία – Μεμβράνες οροφής off – Όλες οι κουρτίνες κλειστές	1.39	
Ομιλία & Θέατρο με σύστημα ηχοτροφοδοσίας ενεργό – Μεμβράνες οροφής on – Όλες οι κουρτίνες ανοιχτές	0.79	

Πίνακας 4.4 Επίδραση των πλαστικών μεμβρανών οροφής στη διαμόρφωση των ακουστικών παραμέτρων C50, D50 και STI

	C50 (dB)	D50 (%)	STI (male)
κενός χώρος ¹	-5.97	21,24	0.38
πριν	Υφιστάμενη διαμόρφωση (μετρήσεις πεδίου) ²	-3.69	26.95
	Υφιστάμενη διαμόρφωση (CATT-A) ²	-3.41	31.68
μετά	Κύρια χρήση ¹ – Μεμβράνες οροφής off	-1,68	40.64
	Κύρια χρήση ¹ – Μεμβράνες οροφής on	-1.22	43.03
	Δευτερεύουσα χρήση ² – Μεμβράνες οροφής off	1.43	58.09
	Δευτερεύουσα χρήση ² – Μεμβράνες οροφής on	3.36	67.82
	Δευτερεύουσα χρήση ³ – Μεμβράνες οροφής off	3.27	67.14
	Δευτερεύουσα χρήση ³ – Μεμβράνες οροφής on	5.56	76.05

1. Παντοκατευθυντική πηγή (Lp1m_a = Lp_voice_loud)

2. Κατευθυντική πηγή (Ηχεία πλήρους φάσματος, HK audio)

3. Ενεργοποίηση συστήματος ηχοτροφοδοσίας

Με την χρήση του συστήματος ηχοτροφοδοσίας επιτεύχθηκε κάλυψη σε επίπεδο ηχητικής στάθμης με ικανοποιητική ομοιογένεια (101.5 +/- 3.1 dB SPL (A)).

Ανάλογες επιδόσεις διαπιστώθηκαν στον τομέα της απόκρισης συχνότητας με διακυμάνσεις ± 2.5 dB στην περιοχή ενδιαφέροντος 500 -2000 Hz.

5. Συμπεράσματα - Περιορισμοί

Οι προτάσεις για την ακουστική θεραπεία της ΑΠΧ διαμορφώθηκαν συμμορφούμενες ως προς τον Οδηγό Μελετών για Διδασκτρία [7] που εκπονήθηκε από τον πρώην Οργανισμό Σχολικών Κτιρίων το 2008, με αδυναμία, σε κάποιες περιπτώσεις, εφαρμογής ριζικών αλλαγών. Ωστόσο, ο συνδυασμός τοποθέτησης μόνιμων υλικών ακουστικής διαμόρφωσης και έξυπνων λύσεων προσαρμοζόμενης ακουστικής, εξασφάλισε ικανοποιητικές συνθήκες για την αναπαραγωγή φυσικού ή ενισχυμένου ηχητικού περιεχομένου, για όλες τις χρήσεις. Οι χρόνοι αντίληψης διαμορφώνονται ανάλογα με την ανάπτυξη/τοποθέτηση των στοιχείων που επιδρούν στη συνολική απορρόφηση και σε όλες τις περιπτώσεις είναι εντός των προδιαγραφών που έχουν θεσπιστεί διεθνώς. Η πρόβλεψη βασικού συστήματος ηχοτροφοδοσίας διευρύνει τα είδη των εκδηλώσεων που μπορούν να υποστηριχτούν. Για τις εκδηλώσεις με αμιγώς μουσικό προσανατολισμό ενδέχεται να απαιτείται η ενοικίαση πρόσθετου, ειδικού εξοπλισμού ώστε να καλύπτονται πληρέστερα οι αναδυόμενες ειδικές απαιτήσεις.

Καθώς το σύνολο της μελέτης βασίστηκε στη χρήση λογισμικών ανοικτής πρόσβασης, ελεύθερων on line εφαρμογών και μη πιστοποιημένου εξοπλισμού στερείται σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ωστόσο η παρούσα μελέτη, εκτός από την ακουστική βελτίωση της συγκεκριμένης ΑΠΧ, είχε ως στόχο την ευαισθητοποίηση για τους κινδύνους από την έκθεση σε ακατάλληλα ακουστικά περιβάλλοντα, αλλά και τις αρνητικές επιπτώσεις στον μαθησιακό τομέα, καθώς ελάχιστη έως μηδενική πρόοδος έχει γίνει προς αυτή την κατεύθυνση. Κανείς δεν μπορεί να εργαστεί σε μία πλημμελώς φωτιζόμενη αίθουσα, μία σχολική τάξη για παράδειγμα, σπάνια όμως θα διαμαρτυρηθεί για την κακή ακουστική της και σχεδόν ποτέ θα θέσει ως προτεραιότητα τη βελτίωσή της.

6. Αναφορές

- [1] M. Barron. *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (2nd ed.) Spon Press, London & New York (2009).
- [2] F.A. Everest & K. Pohlmann. *Master Handbook of Acoustics* (5th ed.) McGraw-Hill, New York (2016).
- [3] Εθνικό Τυπογραφείο. [ΦΕΚ τ.Α' 59/3-2-1989](#)
- [4] American National Standards Institute. *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (ANSI S12.60-2002) ANSI, New York (2002).
- [5] Building Bulletin 93. *Acoustic Design of Schools: Performance Standards* Department of Education, Education Funding Agency, London (2015).
- [6] Σ. Λουτρίδης. *Ακουστική. Αρχές και εφαρμογές* Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (2015).
- [7] ΟΣΚ. *Οδηγός Μελετών για Διδασκτρία όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης* Γενική Διεύθυνση έργων, Αθήνα (2008).



Βελτιστοποίηση σχεδίασης στις χαμηλές συχνότητες πανκατευθυντικών πηγών ήχου για μετρήσεις

Δημήτριος Καπράλος, Χρήστος Σεβαστιάδης,
Γεώργιος Παπανικολάου
Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
kapralosd@ece.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έννοια της πανκατευθυντικής ηχητικής πηγής υποδηλώνει ένα σύστημα ικανό να εκπέμπει ηχητικά κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η χρήση των πηγών αυτών αφορά τη μέτρηση και την αξιολόγηση της ακουστικής κλειστών χώρων, καθώς και στην ηχομόνωσή τους. Ο κύριος στόχος της εργασίας, ήταν η αύξηση της ηχητικής ισχύος των πανκατευθυντικών πηγών στις χαμηλές συχνότητες. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκε μια εκτεταμένη ανάλυση, χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες σχετικές με το σχεδιασμό συστημάτων μεγάρωνων, εξειδικεύοντάς τις στις πανκατευθυντικές μετρητικές πηγές ήχου. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε τρεις διαφορετικούς τύπους πανκατευθυντικής πηγής: στη κλειστή δωδεκάεδρη ηχητική πηγή, στη κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή και στη εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους. Με την χρήση αλγοριθμικών μεθόδων βελτιστοποίησης αναζητήθηκε αρχικά ο βέλτιστος τύπος πανκατευθυντικής πηγής και στη συνέχεια, εξετάστηκαν πιθανά πλεονεκτήματα από την ενσωμάτωση διόδων.

Design optimization at low frequencies of omnidirectional sound sources for measurements

ABSTRACT

An omnidirectional sound source implies a system capable of emitting sound waves uniformly in all directions. The use of such sources is concerned with the measurement and assessment of the acoustics of enclosed spaces and their sound insulation. The main objective of the study was to increase the sound power of omnidirectional sources at low frequencies. To achieve this, an extensive analysis was carried out, using methodologies related to loudspeaker system design, specializing them in omnidirectional sound sources. The study focused on three different types of omnidirectional source: the closed-box dodecahedron sound source, the closed-box icosidodecahedron source and the icosidodecahedron source with ports. Using algorithmic optimization methods, the optimal omnidirectional source type was first searched for and then possible advantages of diode integration were considered.

Εισαγωγή

Οι πανκατευθυντικές ηχητικές πηγές, είναι βασικά εργαλεία στον τομέα της ακουστικής. Το κύριο χαρακτηριστικό των πανκατευθυντικών πηγών, είναι η ομοιόμορφη εκπομπή ήχου, προς όλες τις κατευθύνσεις. Από πρακτική άποψη, οι πηγές αυτές χρησιμοποιούνται σε ακουστικές μετρήσεις όπως, στην αξιολόγηση των ακουστικών ιδιοτήτων χώρων και στην ανάλυση των ακουστικών ιδιοτήτων αρχιτεκτονικών στοιχείων. Επειδή οι μετρήσεις κτιριακής ακουστικής έχουν επεκταθεί σε συχνότητες κάτω των 100 Hz, όπου ο θόρυβος υποβάθρου συνήθως είναι υψηλότερης στάθμης, προκύπτει πλέον η ανάγκη εκπομπής υψηλότερης ισχύος στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού, στη παρούσα εργασία, ήταν η ενσωμάτωση διόδων σε πηγές με πανκατευθυντικό χαρακτήρα. Ως δίοδος ορίζεται ένα συντονισμένο άνοιγμα στο κέλυφος της πηγής, που επιτρέπει στον αέρα να δονείται μέσα και έξω, λειτουργώντας σε συνδυασμό με τη δόνηση του περικλειστού από το κέλυφος αέρα, που δονείται από το διάφραγμα του μεγάφωνου. Το εμβαδόν της διόδου γίνεται συνήθως ίσο ή μικρότερο από την ενεργή επιφάνεια του διαφράγματος του μεγάφωνου. Ο κατάλληλος συνδυασμός της συχνότητας συντονισμού του κελύφους, με τη συχνότητα συντονισμού του κελύφους και της διόδου, επιτρέπει την εκπομπή ηχητικής ισχύος από τη δίοδο. Το αποτέλεσμα είναι το αεριζόμενο μεγαφωνικό σύστημα να έχει ευρύτερη απόκριση σε χαμηλές συχνότητες σε σύγκριση με αυτήν που παράγεται από το ίδιο μέγαφωνο σε κλειστό κουτί.

1. Γωνία ανοίγματος

Στο σχεδιασμό και την ανάλυση πανκατευθυντικών συστημάτων μεγαφώνων, η γωνία ανοίγματος του εμβόλου είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την κατευθυντικότητα, τα υποδείγματα ακτινοβολίας και τη συνολική ηχητική απόδοση του μεγάφωνου. Ως γωνία ανοίγματος α ορίζεται η γωνιακή έκταση κατά την οποία το έμβολο μέσα στο περίβλημα εκπέμπει ηχητική ενέργεια. Καθορίζει την περιοχή κάλυψης ή το υπόδειγμα πολικής ακτινοβολίας του ήχου, που παράγεται από το μέγαφωνο. Μια μεγαλύτερη γωνία ανοίγματος αντιστοιχεί σε μια ευρύτερη περιοχή κάλυψης, ενώ μια μικρότερη γωνία οδηγεί σε μια πιο εστιασμένη ή κατευθυνόμενη ηχητική εκπομπή. Από την ανάλυση των συντελεστών κατευθυντικότητας που πραγματοποιήθηκε για τα διάφορα πλατωνικά στερεά [1], το δωδεκάεδρο στερεό παρουσιάζει την καλύτερη πανκατευθυντική προσέγγιση, στην περιοχή συχνοτήτων έως 5 kHz, όταν εφαρμόζεται η μέγιστη γωνία ανοίγματος. Από την άλλη το εικοσιδωδεκάεδρο στερεό παρουσιάζει για τον ίδιο όγκο πηγής ένα πιο σφαιρικό σχήμα και κατ' επέκταση μία πιο σφαιρική κατευθυντικότητα ακουστικής εκπομπής.

2. Ανάλυση

Για την ανάλυση των διατάξεων κλειστής πηγής και πηγής με διόδους, χρησιμοποιήθηκε ένα ημι-αναλυτικό μοντέλο το οποίο περιγράφεται από μητρώα μετάδοσης [2]. Το ημι-αναλυτικό μοντέλο αυτό είναι ένα ηλεκτρο-μηχανο-

αναλογικό κύκλωμα, διαφορετικό από αυτά που έχουν προταθεί από τους Beranek [3] και Small [4], καθώς χρησιμοποιεί δίκτυα δύο θυρών. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει διάφορα στοιχεία όπως το πηνίο, ηλεκτρομηχανική μηχανοακουστική μετατροπή και το διάφραγμα. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύεται από μητρώα μετάδοσης. Τα μητρώα μετάδοσης περιγράφουν την σχέση μεταξύ ηχητικής πίεσης και ηχητικής ταχύτητας όγκου στα δύο άκρα του συστήματος. Στην περίπτωση της πηγής με διόδους, στο ημι-αναλυτικό μοντέλο, υπάρχουν επιπλέον μητρώα μετάδοσης για την διόδο και την ακτινοβολία που αυτή εκπέμπει αλλά και για τις διαρροές.

3. Βελτιστοποίηση σχεδίασης πηγής

Για την αναζήτηση του βέλτιστου τύπου πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, εξετάστηκαν τρεις διατάξεις: η κλειστή δωδεκάεδρη πηγή, η κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή και η εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους. Η επιλογή προσθήκης διόδων μόνο στο εικοσιδωδεκάεδρο στερεό, έγκειται στην δυσκολία κατασκευής δωδεκάεδρης πηγής με διόδους, καθώς η τοποθέτησή τους πρέπει να γίνει στις κορυφές. Αντίθετα, το εικοσιδωδεκάεδρο έχει σε κάθε κορυφή του πεντάγωνου ένα ισόπλευρο τρίγωνο, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο την δημιουργία ανοιγμάτων για την προσθήκη διόδων.

Προκειμένου να προκύψει ο βέλτιστος τύπος της πανκατευθυντικής πηγής, χρειάστηκε να οριστεί μία συνάρτηση κόστους. Αυτή η συνάρτηση αξιολογεί κάθε πιθανή λύση ως προς ένα δεδομένο μετρώ ποιότητας και επιστρέφει αυτήν με την καλύτερη τιμή. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με βάση τα διαγράμματα των αποκρίσεων των ηχητικών ισχύων και με ελάχιστη συχνότητα τα 50 Hz.

Για την εύρεση του βέλτιστου τύπου, η συνάρτηση κόστους που ορίστηκε αρχικά βασίστηκε στον υπολογισμό της μέσης ισχύος (L_w) που προσφέρει κάθε υποψήφια λύση, με στόχο να αναζητηθεί αυτή με την υψηλότερη τιμή. Διαπιστώθηκε όμως πως η συγκεκριμένη συνάρτηση δεν εξετάζει πλήρως τις πιθανές λύσεις με βάση την ισχύ που προσφέρουν στις χαμηλές συχνότητες. Για τον λόγο αυτόν υπήρξε η ανάγκη ορισμού μίας δεύτερης συνάρτησης κόστους. Η συνάρτηση αυτή, βασίστηκε στον λογάριθμο του λόγου της ισχύος, των ενός τρίτου οκτάβων μέχρι την συχνότητα συντονισμού (W_{bfc}), όπου σχεδόν τις περισσότερες φορές έχει και την μέγιστη τιμή, προς την ισχύ του ίδιου πλήθους ενός τρίτου οκτάβων μετά την συχνότητα συντονισμού (W_{afc}). Οι βέλτιστες λύσεις, που προέκυψαν με την συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους, ήταν έντονα συντονισμένες, δηλαδή, προς τις υψηλότερες συχνότητες παρουσίαζαν μείωση της ισχύος τους. Για τον λόγο αυτόν, η συνάρτηση κόστους που επιλέχθηκε αποτελεί υπέρθεση των δύο προηγούμενων συναρτήσεων, πολλαπλασιάζοντας την συνθήκη για τον υπολογισμό της μέγιστης μέσης ισχύος του συστήματος και την συνθήκη για τον υπολογισμό του λογάριθμου του λόγου της ισχύος με ένα συντελεστή 0,5.

$$\text{fitness}(L_w, W_{bfc}, W_{afc}) = 0,5 \cdot \text{mean}(L_w) + 0,5 \cdot 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W_{bfc}}{W_{afc}} \right) \quad (3.1)$$

Τέλος μια ακόμα συνθήκη στην συνάρτηση κόστους ήταν η εφαρμογή άνω και κάτω ορίων στην γωνία ανοίγματος. Για μεγαλύτερη πληρότητα και περισσότερη

ακρίβεια στα αποτελέσματα, δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης: ο Γενετικός Αλγόριθμος [5], ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος [6] και ο Αλγόριθμος Διαφορική Εξέλιξη [7]. Και για τις τρεις αυτές μεθόδους χρησιμοποιήθηκε ένας αρχικός πληθυσμός υποψήφιων λύσεων. Ο πληθυσμός αυτός περιλάμβανε διάφορα μεγάρφωνα, μήκη ακμών πεντάγωνων και κατ' επέκταση όγκων πηγών αλλά και διάφορα χαρακτηριστικά διόδων, όπως το μήκος, το πλήθος και η διάμετρος [8]. Για να διευκολυνθεί η συστηματική εκτέλεση αυτών των αναλύσεων και βελτιστοποιήσεων, αναπτύχθηκε ειδικό λογισμικό, το οποίο είναι διαθέσιμο ελεύθερα μέσω της πλατφόρμας προγραμματιστών GitHub [9].

4. Αποτελέσματα

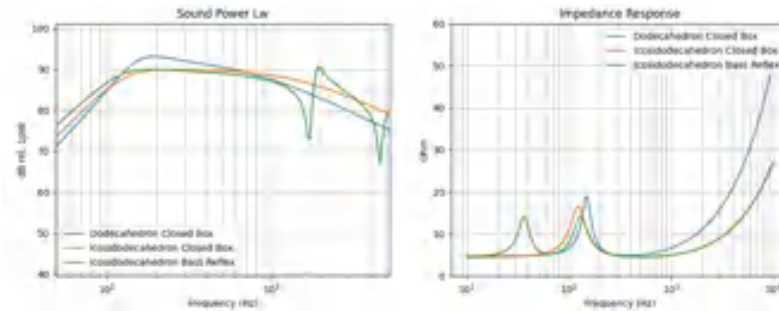
4.1 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων συνάρτησης κόστους

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται οι βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν από τις αλγοριθμικές μεθόδους βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιήθηκαν, με χρήση της τελευταίας συνάρτησης κόστους όπως αυτή περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για κάθε μία από τις διαφορετικές διατάξεις που εξετάστηκαν, και οι τρεις αλγόριθμοι συνέκλιναν στα ίδια αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Βέλτιστη λύση αλγορίθμων για τις τρεις διατάξεις.

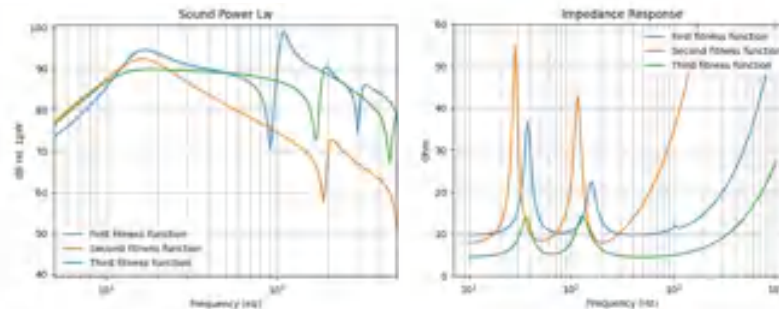
Διάταξη	Όγκος Πηγής	Πλήθος Διόδων	Μήκος Διόδων	Διάμετ. Διόδων	Γωνία Ανοίγμ.	Τιμή
Κλειστή δωδεκάεδρη	25,8 dm ³	-	-	-	21,3°	45
Κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη	30 dm ³	-	-	-	20,1°	45.3
Εικοσιδωδεκάεδρη με διόδους	30 dm ³	8	2.8 cm	2.7 cm	20,1°	50.6

Από τα διαγράμματα στο Σχήμα 4.1 διαπιστώνεται πως η κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη πηγή προσφέρει υψηλότερη ηχητική ισχύ από την κλειστή δωδεκάεδρη πηγή. Η διαφορά αυτή, έχει μέγιστη τιμή περίπου 2 dB στα 50 Hz, ενώ η διαφορά αυτή μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 100 Hz. Από την σύγκριση ανάμεσα στις κλειστές πηγές και την εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους, παρατηρείται πως η προσθήκη διόδων προσφέρει αύξηση της ηχητικής ισχύος στο σύστημα. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως των 3 dB στα 50 Hz, από την κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη και 5 dB απλό την κλειστή δωδεκάεδρη. Προχωρώντας προς υψηλότερες συχνότητες, συνεχίζεται να παρατηρείται μικρή αύξηση της ηχητικής ισχύς, στην περίπτωση της πηγής με διόδους, μέχρι την συχνότητα συντονισμού, σε σχέση με την κλειστή εικοσιδωδεκάεδρη. Τέλος η κλειστή δωδεκάεδρη πηγή, εμφανίζει 3 dB υψηλότερη ισχύ από τις εικοσιδωδεκάεδρες πηγές στην συχνότητα συντονισμού.



Σχήμα 4.1 Ηχητική ισχύς και εμπέδηση των τριών διατάξεων με εφαρμογή της βέλτιστης λύσης, για την τρίτη συνάρτηση κόστους.

4.2 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων εικοσιδωδεκάεδρης πηγής με διόδους



Σχήμα 4.2 Σύγκριση βέλτιστων λύσεων εικοσιδωδεκάεδρων πηγών με διόδους για τις τρεις συναρτήσεις κόστους.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την χρήση και των τριών συναρτήσεων κόστους, οι αλγόριθμοι ανέδειξαν ως βέλτιστη λύση, αυτή δηλαδή με την υψηλότερη ισχύ στις χαμηλές συχνότητες, την εικοσιδωδεκάεδρη πηγή με διόδους. Στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των βέλτιστων αυτών λύσεων, για τις τρεις διαφορετικές συναρτήσεις κόστους που χρησιμοποιήθηκαν. Παρατηρούμε από τις καμπύλες ηχητικής ισχύος, πως οι βέλτιστες λύσεις της δεύτερης και τρίτης συναρτήσεων κόστους εκπέμπουν υψηλότερη ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες σε σύγκριση με την βέλτιστη λύση της πρώτης συνάρτησης κόστους. Επιπλέον η βέλτιστη λύση της τρίτης συνάρτησης κόστους παρουσιάζει μια πιο ομαλή απόκριση προς τις υψηλές συχνότητες σε σχέση με τις άλλες βέλτιστες λύσεις. Τέλος από τις καμπύλες της εμπέδησης των εικοσιδωδεκάεδρων πηγών με διόδους, αυτή της τρίτης συνάρτησης κόστους, εμφανίζει μεγαλύτερη συμμετρία υποδηλώνοντας με τον τρόπο αυτόν, μια ευθυγράμμιση Bessel [10].

5. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην αναζήτηση του βέλτιστου τύπου πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, με έμφαση στη μεγαλύτερη ηχητική ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες. Οι προσομοιώσεις με το ημι-αναλυτικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ανέδειξαν ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο για την ανάλυση της ακουστικής συμπεριφοράς αυτών των πηγών. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων διαδραματίζει η συνάρτηση κόστους, με την συγκεκριμένη που επιλέχθηκε να αποτελεί την πρότασή μας για την εύρεση της βέλτιστης επιλογής.

Η ανάλυσή μας συνήγαγε αρχικά, πως το εικοσιδωδεκάεδρο στερεό μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ηχητική ισχύ στις χαμηλότερες συχνότητες, όταν επιλεγεί σαν περίβλημα μίας πανκατευθυντικής μετρητικής πηγής ήχου, σε σύγκριση με το δωδεκάεδρο στερεό. Συγκρίνοντας την ηχητική ισχύ των κλειστών πηγών και της εικοσιδωδεκάεδρης πηγής με διόδους, διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση διόδων μπορεί να επιφέρει αύξηση της ηχητικής ισχύος στο σύστημα. Η αύξηση αυτή παρατηρήθηκε στις χαμηλές συχνότητες με την μέγιστη διαφορά να φτάνει ως και τα 5 dB με την κλειστή δωδεκάεδρη πηγή.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία, αποτελούν μια εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων διατάξεων. Στο μέλλον θα πρέπει να κατασκευαστεί η βέλτιστη λύση που προτείνεται, ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

6. Βιβλιογραφία

- [1] C. Quested, A. Moorhouse, B. Piper, and B. Hu, «An analytical model for a do decahedron loudspeaker applied to the design of omni-directional loudspeaker arrays,» *Applied acoustics*, vol. 85, pp. 161–171, 2014.
- [2] L. Beranek and T. Mellow, *Acoustics: sound fields, transducers and vibration*. Academic Press, 2019.
- [3] L. Beranek, *Acoustics*. Electrical Engineering Series, McGraw-Hill, 1996.
- [4] R. H. Small, “Closed-box loudspeaker systems-part 1: Analysis,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 20, no. 10, pp. 798–808, 1972.
- [5] A. F. Gad, “Pygad: An intuitive genetic algorithm python library,” *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1–14, 2023.
- [6] M. Juneja and S. Nagar, “Particle swarm optimization algorithm and its parameters: A review,” in *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, pp. 1–5, IEEE, 2016.
- [7] A. K. Qin, V. L. Huang, and P. N. Suganthan, “Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization,” *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, 2008.
- [8] D. Kapralos, “Design optimization at low frequencies of omnidirectional sound sources for measurements,” *Aristotle University of Thessaloniki*, 2024.
- [9] D. Kapralos, “dimitris-kapralos/loudspeaker_enclosure.” *GitHub*, [Online]. https://github.com/dimitris-kapralos/Loudspeaker_Enclosure
- [10] V. Dickason, *The Loudspeaker Design Cookbook*. Audio Amateur Press, 2007.



Χαρακτηρισμός και έλεγχος υπερ-υψίσυχνων τρεχόντων ακουστικών κυμάτων σε κρυσταλλικά στερεά με την χρήση ταχείας φασικής απεικόνισης με την χρήση ns λέιζερ

Εμμανουήλ Κανιολάκης Καλούδης^{1,2}, Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2}, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2}, Γιάννης Ορφανός^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Βασίλειος Δημητρίου^{1,2}, Μιχαήλ Ταταράκης^{1,3}, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{1,2}

¹Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

²Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100 Ρέθυμνο

³Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133 Χανιά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση υπερ-υψίσυχνων ακουστικών κυμάτων για την δυναμική και ελεγχόμενη διαμόρφωση κρυσταλλικών στερεών βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στην επιστήμη και τη βιομηχανία των υλικών καθώς και στην οπτοακουστική τεχνολογία. Η γένεση των ακουστικών κυμάτων στους κρυστάλλους γίνεται με διάφορες μεθόδους, όπως με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς και με διέγερση από υπερβραχείς παλμούς λέιζερ. Τα ακουστικά κύματα ταξιδεύουν μέσα στους κρυστάλλους και διαμορφώνουν τα κρυσταλλικά επίπεδα ανάλογα με την συχνότητα και την ένταση τους. Για την ανάπτυξη σχετικών τεχνολογικών εφαρμογών απαιτούνται ταχείες και υψηλής ακρίβειας διαγνωστικές μέθοδοι χαρακτηρισμού και απεικόνισης των ακουστικών κυμάτων κατά τη διάδοσή τους μέσα στα κρυσταλλικά στερεά. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τεχνικές ταχείας οπτικής απεικόνισης μέσω συμβολομετρίας και διαθλαστικής απεικόνισης με χρήση παλμών λέιζερ νανοδευτερολέπτων. Ο ιδιαίτερα μικρός χρόνος αλληλεπίδρασης των οπτικών παλμών με το οδεύον ακουστικό κύμα επιτρέπει τη σχεδόν στατική, και κατά συνέπεια ιδιαίτερα ευκρινή, απεικόνιση του.

Characterization and control of ultra-high-frequency acoustic waves in crystalline solids using fast optical imaging with ns lasers

ABSTRACT

In recent years, the use of ultra-high-frequency acoustic waves for the dynamic and controlled modulation of crystalline solids has found significant applications in material science, industry and in optoacoustic technology. The generation of these acoustic waves in crystals is achieved by various methods, such as piezoelectric transducers and excitation from ultrashort laser pulses. The acoustic waves travel through the crystals and modify the crystal planes, depending on their frequency and

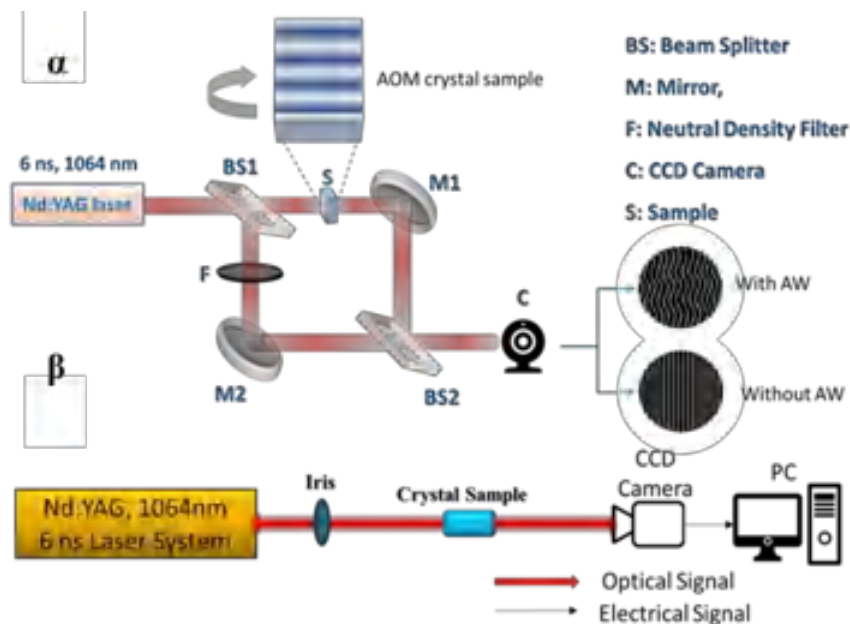
intensity. The development of related technological applications requires rapid and highly accurate diagnostic methods for characterizing and imaging the acoustic waves as they propagate through crystalline solids. This work presents techniques for rapid optical imaging through interferometry and refractive imaging using nanosecond laser pulses. The very short interaction time of the optical pulses with the propagating acoustic wave allows for near-static and, consequently, highly precise imaging.

1. Εισαγωγή

Τα υπερυψίσυχνα τρέχοντα ακουστικά κύματα έχουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη επιστήμη και βιομηχανία. Συγκεκριμένα βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς της ακουστικής και της επιστήμης υλικών, όπως στην κρυσταλλογραφία [1], στις μη καταστροφικές δοκιμές υλικών [2] και στην επεξεργασία σήματος [3]. Ιδιαίτερα, παρουσιάζουν επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον ως ένα μέσο για την δυναμική διαμόρφωση κρυστάλλων, καθώς, η διάδοση ακουστικών κυμάτων δύναται να μετατοπίσει ή κάμψει τα κρυσταλλικά επίπεδα με τρόπο που καθορίζεται από την συχνότητα και την ένταση τους. Οι ακουστικά διαμορφωμένοι κρύσταλλοι έχουν διάφορες εφαρμογές στην τεχνολογία και την επιστήμη, όπως στην παραγωγή ακτίνων γ [4][5] και στην ανάπτυξη ακουστικών διαμορφωτών και κατευθυντών οπτικής δέσμης. Η δημιουργία των ακουστικών κυμάτων γίνεται με διάφορους μηχανισμούς και κυρίως με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς [6]. Σε αυτή την περίπτωση η υπερυψίσυχη ημιτονοειδής κίνηση του μετατροπέα δημιουργεί ένα τρέχον ακουστικό κύμα το οποίο, λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται, διαμορφώνει δυναμικά τα κρυσταλλικά επίπεδα. Ο έλεγχος της συχνότητας και του πλάτους των ακουστικών κυμάτων γίνεται μέσω των ηλεκτρικών σημάτων οδήγησης και ιδιαίτερα μέσω της συχνότητας και της τάσης [7]. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο και χαρακτηρισμό των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της χωρικής κατανομής της ακουστικής πίεσης μέσα στο κρυσταλλικό ή κάποιο άλλο υλικό. Το παραπάνω επιτυγχάνεται με τεχνικές ταχείας οπτικής απεικόνισης, όπως η ns συμβολομετρία και η ns διαθλαστική απεικόνιση. Συγκεκριμένα, στη συμβολομετρία, με χρήση συμβολόμετρου Mach-Zehnder, η χωρική κατανομή των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων απεικονίζεται μέσω της παραμόρφωσης των κροσσών συμβολής από την φασική ανομοιογένεια της φωτεινής δέσμης που διέρχεται από περιοχές του κρυστάλλου με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Η παραπάνω ανομοιογένεια στον δείκτη διάθλασης οφείλεται στην αναδιάταξη των κρυσταλλικών επιπέδων από τα τρέχοντα ακουστικά κύματα. Μια εναλλακτική τεχνική απεικόνισης ανομοιογενειών στον δείκτη διάθλασης υλικών κατάλληλη για την απεικόνιση ακουστικών κυμάτων είναι η οπτική φασική διαθλαστική απεικόνιση. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εκτροπή του φωτός λόγω της περιοδικής διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης κάθετα στην διάδοση της δοκιμαστικής οπτικής δέσμης, όπως προκύπτει και από τις εργασίες [8][9]. Η εκτροπή αυτή απεικονίζεται ως ανομοιομορφία στην κατανομή της έντασης του φωτός πάνω στον αισθητήρα μιας κάμερας υψηλής ευκρίνειας [10][11].

2. Μεθοδολογία

Παρουσιάζεται η μεθοδολογία από πειράματα ανίχνευσης και απεικόνισης τρέχοντων ακουστικών κυμάτων σε κρυστάλλους χαλαζία (Quartz) και γυαλιού (BK7). Η ακουστική διέγερση των κυμάτων έγινε με δύο τρόπους, με χρήση πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα καθώς και με εστίαση ns παλμών λέιζερ. Στην πρώτη περίπτωση, για την διέγερση ενός κρυστάλλου Quartz με μήκος 5 εκ χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας TeO₂ με συχνότητα συντονισμού 40 MHz και χωρητικότητα 300 pF. Ο κρύσταλλος επιλέχθηκε εξαιτίας της υψηλής διαπερατότητάς του από δέσμες λέιζερ με μήκος κύματος 532 nm και 1064 nm, και εξαιτίας του υψηλού ακουστό-οπτικό συντελεστή, που επιτρέπει την έντονη διαμόρφωση της διαγνωστικής δέσμης λέιζερ λόγω της ακουστικής διαμόρφωσης του κρυστάλλου. Η ηλεκτρική οδήγηση του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα έγινε από δύο διαφορετικές μονάδες οδήγησης. Μια ειδικά σχεδιασμένη μονάδα με σταθερή συχνότητα οδήγησης στα 40,65 MHz και τάση οδήγησης 100 Vpp και μια ρυθμιζόμενη γεννήτρια σήματος γενικής χρήσης (Tektronix AFG1062) με μέγιστη συχνότητα 60 MHz και τάση 10 Vpp. Για την ταχεία και στατική απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε, ένα παλμικό σύστημα λέιζερ Nd:YAG, με παλμούς διάρκειας 6 ns και κεντρικό μήκος κύματος στα 1064 nm. Η χρήση παλμικού λέιζερ επιτρέπει την στατική απεικόνιση των τρεχόντων ακουστικών κυμάτων, καθώς στην διάρκεια των 6ns που διαρκεί ο κάθε παλμός το κύμα έχει ταξιδέψει μέσα στο Quartz 33 μm , που είναι μήκος αρκετά μικρότερο από το μήκος κύματος των τρεχόντων ακουστικών κυμάτων.



Εικόνα 1: Σχεδιάγραμμα της οπτικής διάταξης απεικόνισης με α) ns συμβολομετρία β) ns διαθλαστική απεικόνιση

Επιπλέον, και οι δύο τεχνικές επιτρέπουν τον ποσοτικό υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης και ως εκ τούτου τον χαρακτηρισμό των ακουστικών κυμάτων που διατρέχουν το υλικό. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της συμβολομετρίας οι γνωστές εξισώσεις διαφοράς φάσης προς πίεση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης κάθετα στην διάδοση y των ακουστικών κυμάτων.

$$\Delta\varphi(y, z) = \frac{qn_0^3\omega z}{2c} \sigma(y, z) \quad (1)$$

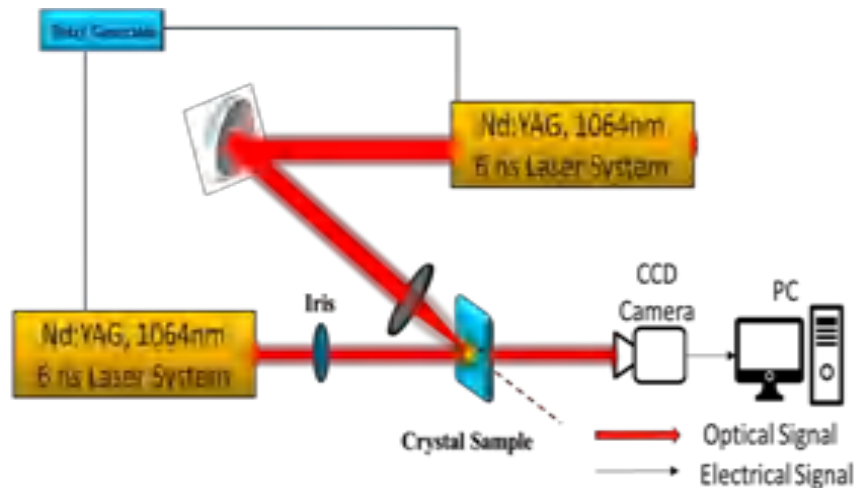
όπου, σ , q , c , n_0 , ω και z είναι, η τάση (σε μονάδες πίεσης Pascal), ο πιεζοπτικός τανυστής του υλικού, η ταχύτητα του φωτός στο υλικό, ο μη διαταραγμένος δείκτης διάθλασης και ο οπτικός δρόμος του φωτός στο υλικό, αντίστοιχα.

Ενώ, για την περίπτωση της διαθλαστικής απεικόνισης αναπτύχθηκε μοντέλο για τον υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης των τρέχοντων ακουστικών κυμάτων συναρτήσει της γωνίας διάθλασης του πεδίου του λέιζερ. Συγκεκριμένα, η διαφορά πίεσης dP μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$\tan \theta_r = -\frac{C_{n_0}}{n_0} \cdot \frac{dP}{dx} w \quad (2)$$

όπου, θ_r , C_{n_0} , n_0 και w είναι η γωνία εκτροπής του φωτός, η πιεζο-οπτική σταθερά του υλικού, ο μη διαταραγμένος δείκτης διάθλασης και ο οπτικός δρόμος του φωτός στο υλικό, αντίστοιχα.

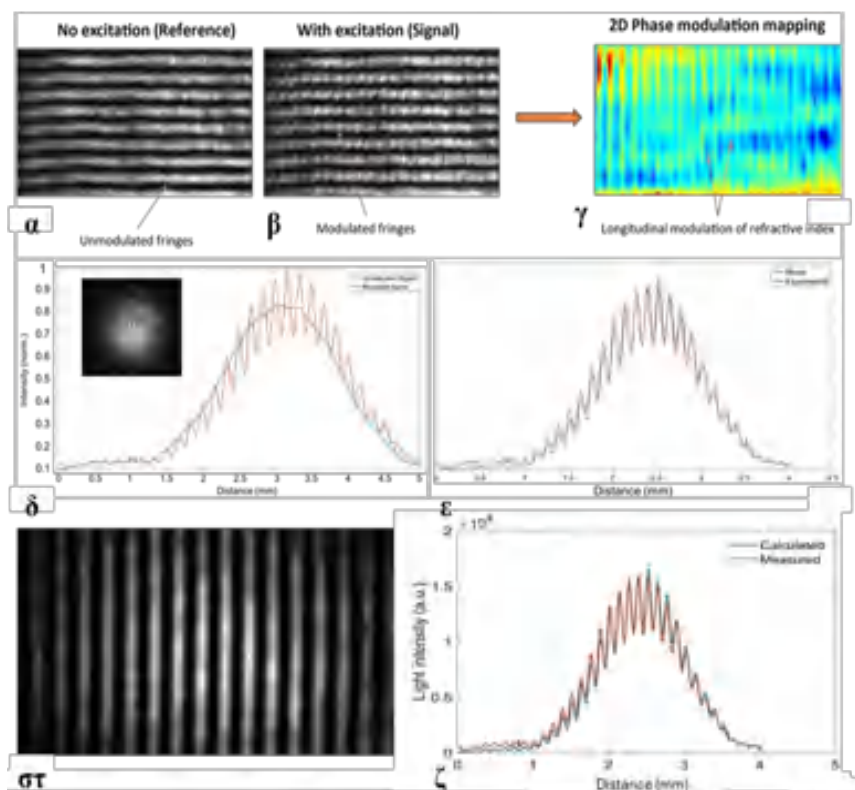
Στην περίπτωση της διέγερσης με ns παλμούς λέιζερ (εικόνα 2), μια δέσμη λέιζερ με κεντρικό μήκος κύματος 1064 nm, διάρκεια παλμού 6 ns και συχνότητα επανάληψης παλμών 5 Hz, εστιάζεται με ένα φακό με εστιακό μήκος 20 cm λίγο μετά τον κρύσταλλο BK7. Η εναποτιθέμενη οπτική ενέργεια της δέσμης θερμαίνει τον κρύσταλλο με αποτέλεσμα την αποκόλληση υλικού από την επιφάνεια του. Η θερμική διέγερση του υλικού από την δέσμη του λέιζερ δημιουργεί το ακουστικό κύμα μέσα στον κρύσταλλο, ενώ το υλικό που αποκολλάται σπρώχνει τα άτομα του αέρα προκαλώντας την δημιουργία ενός δεύτερου ακουστικού κύματος το οποίο διαδίδεται στον αέρα. Η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ακουστική, καθώς και τα ακουστικά κύματα απεικονίζονται με την τεχνική της διαθλαστικής απεικόνισης, έχοντας ως δέσμη ελέγχου την δέσμη από ένα δεύτερο παλμικό σύστημα λέιζερ Nd:YAG, με παλμούς διάρκειας 6 ns και κεντρικό μήκος κύματος στα 1064 nm. Η δέσμη ελέγχου συγχρονίζεται με μια ps γεννήτρια καθυστέρησης (thinkSRS DG535), ώστε να έπεται χρονικά της δέσμης διέγερσης με καθυστέρηση ρυθμιζόμενη με ακρίβεια λίγων ns.



Εικόνα 2: Σχεδιάγραμμα της διέγερσης τρέχοντων ακουστικών κυμάτων με συγχρονισμό δύο ns laser συστημάτων

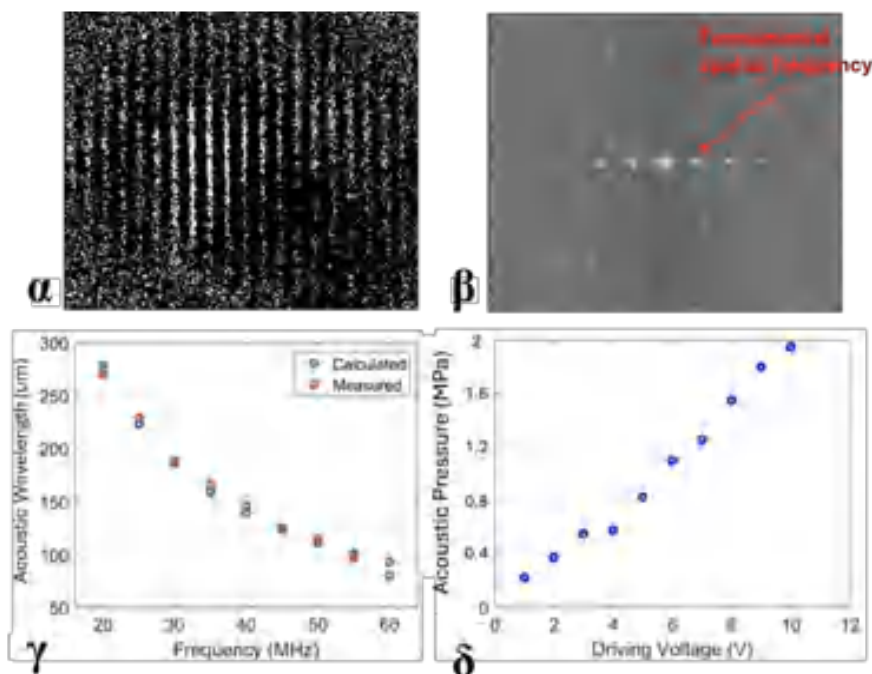
3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των ακουστικών κυμάτων σε κρύσταλλο Quartz με την μέθοδο ταχείας οπτικής απεικόνισης μέσω ps συμβολομετρίας και μέσω ps διαθλαστικής απεικόνισης. Στις εικόνες 3α και 3β παρουσιάζεται το μοτίβο των κροσσών συμβολής, χωρίς και με την παρουσία ακουστικών κυμάτων αντίστοιχα, όπου η χαρακτηριστική παραμόρφωση του μοτίβου από την αλλαγή στον δείκτη διάθλασης είναι φανερή. Με εφαρμογή του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) στις παραπάνω εικόνες μεταβαίνουμε στο πεδίο της χωρικής συχνότητας, όπου με κατάλληλο συχνотικό φίλτρο αφαιρούμε την DC συνιστώσα και επιλέγουμε τη συχνότητα ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, με εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier επιστρέφουμε στο πεδίο του χώρου, όπου αφού εφαρμόσουμε κατάλληλη συνάρτηση ξετυλίγματος φάσης, έχουμε πλέον την απεικόνιση της διαφοράς φάσης στον κρύσταλλο (Εικόνα 3γ). Τέλος, από την εξίσωση 1 μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή της πίεσης στον κρύσταλλο. Με την μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης είναι δυνατή η χαρτογράφηση της ανομοιομορφίας του πεδίου του λέιζερ παρουσία των ακουστικών κυμάτων (Εικόνα 3στ, 3δ). Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραμάτων (Εικόνα 3ε, 3ζ). Το μήκος κύματος των ακουστικών κυμάτων που μετρήθηκε και για τις δύο μεθόδους ήταν $\lambda \approx 140 \text{ m}$. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με το αναμενόμενο μήκος κύματος ($139 \mu\text{m}$), που υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του ήχου στο Quartz (5570 m/s).



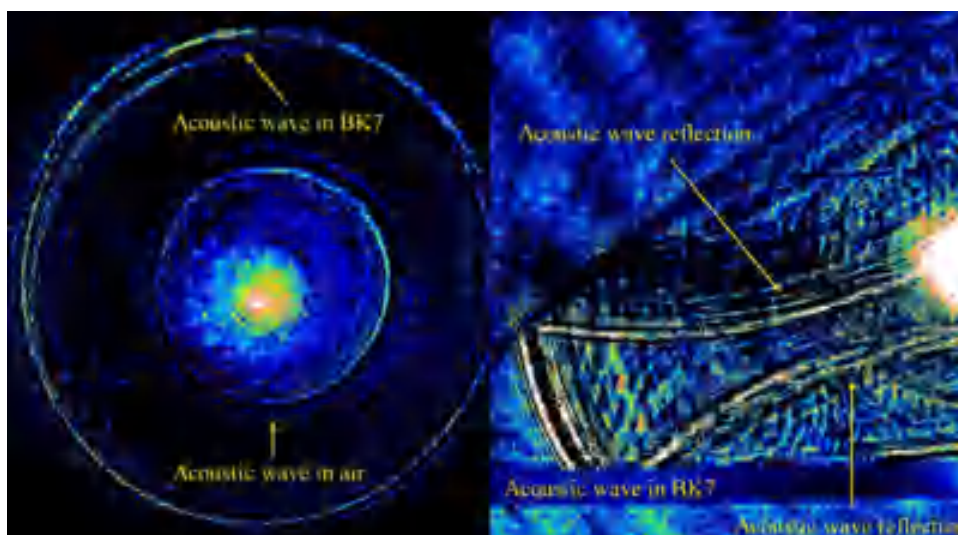
Εικόνα 3: Αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό τρέχοντων ακουστικών κυμάτων με συμβολομετρία (εικόνα α, β, γ) και με διαθλαστική απεικόνιση (εικόνα δ, ε, στ, ζ)

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για την δυνατότητα ρύθμισης / ελέγχου των πιεζοηλεκτρικά δημιουργούμενων ακουστικών κυμάτων μέσω της εφαρμοζόμενης συχνότητας και τάσης οδήγησης. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε το μήκος κύματος των ακουστικών κυμάτων για ένα εύρος συχνοτήτων οδήγησης, από 20 έως 60 MHz. Οι υπολογισμοί έγιναν εφαρμόζοντας μετασχηματισμό FFT στις εικόνες που ελήφθησαν με την μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης (Εικόνα 4α), ώστε να εξαχθεί η χωρική συχνότητα των κυμάτων (Εικόνα 4β). Έτσι κατασκευάστηκε η καμπύλη (Εικόνα 4γ), που δείχνει την εξάρτηση του μήκους κύματος των κυμάτων από την συχνότητα οδήγησης. Τέλος, μετρήθηκε η γραμμική σχέση ανάμεσα στην τάση οδήγησης και το πλάτος της ακουστικής πίεσης (Εικόνα 7δ).



Εικόνα 4: Αποτελέσματα από την παραμετρική μελέτη στο Quartz

Όσον αφορά στην δημιουργία ακουστικών κυμάτων σε BK7 από ns παλμούς λέιζερ, τα παραγόμενα ακουστικά κύματα απεικονίστηκαν με τη μέθοδο της διαθλαστικής απεικόνισης (Εικόνα 5). Ο κύκλος με την μικρότερη διάμετρο αντιστοιχεί στο κύμα πίεσης που δημιουργείται στον αέρα από τα θραύσματα που απομακρύνονται από την επιφάνεια του κρυστάλλου και ωθούν με μεγάλη ταχύτητα τα σωματίδια του, σε μια διαδικασία γνωστή ως laser ablation. Αντίθετα, ο κύκλος με τη μεγαλύτερη διάμετρο αντιστοιχεί στο κύμα πίεσης που διαδίδεται μέσα στο δείγμα BK7 λόγω της θερμοελαστικής απόκρισης του υλικού στην διέγερση του λέιζερ (Εικόνα 5α). Αυτό αποδεικνύεται κι από το γεγονός ότι για το κύμα της μεγάλης διαμέτρου εμφανίζονται και ανακλάσεις στα όρια του BK7, όπως φαίνεται στην εικόνα 5β παρουσιάζονται. Αντίστοιχες μετρήσεις δείχνανε ότι για το κύμα της μικρότερης διαμέτρου δεν εμφανίζονται ανακλάσεις στα όρια του κρυστάλλου, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι το κύμα διαδίδεται στον αέρα.



Εικόνα 5: Αποτελέσματα από τον εντοπισμό ακουστικών κυμάτων στον αέρα και τον BK7, με την μέθοδο της ns διαθλαστικής απεικόνισης

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε πειραματική διαδικασία χαρακτηρισμού υπερυψίσυχων τρέχοντων ακουστικών κυμάτων σε κρυστάλλους μέσω συμβολομετρίας και διαθλαστικής απεικόνισης με παλμούς λέιζερ νανοδευτερολέπτων. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των ακουστικών κυμάτων στους κρυστάλλους Quartz και BK7, τα οποία έδειξαν την ικανότητα των παραπάνω ταχέων οπτικών μεθόδων να εντοπίσουν τα τρέχοντα ακουστικά κύματα και να απεικονίσουν την χωρική τους κατανομή. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης, τα οποία έδειξαν την δυνατότητα ελέγχου του πλάτους και της συχνότητας των κυμάτων από τα αντίστοιχα μεγέθη οδήγησης. Τέλος, παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την αξιοποίηση της ns διαθλαστικής απεικόνισης για τον εντοπισμό ακουστικών κυμάτων στον αέρα και στον κρύσταλλο BK7, τα οποία παρήχθησαν από ns παλμούς λέιζερ.

5. Αναφορές

- [1] Kepa, M.W., Tomizaki, T., Sato, Y. *et al.* Acoustic levitation and rotation of thin films and their application for room temperature protein crystallography. *Sci Rep* **12**, 5349 (2022)
- [2] E. Zolotoyabko, J. P. Quintana; Control of synchrotron x-ray diffraction by means of standing acoustic waves. *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 3, 699–708 (2004)
- [3] Campbell, Colin. Surface acoustic wave devices and their signal processing applications. Elsevier, (2012)
- [4] Korol, A.V., Solov'yov, A.V. Crystal-based intensive gamma-ray light sources. *Eur. Phys. J. D* **74**, 201 (2020)
- [5] A. V. Korol, A. V. Solov'yov, W. Greiner, Channeling and radiation in periodically bent crystals. Springer Berlin Heidelberg, (2014)
- [6] Sun, Zhigang, et al. A methodological review of piezoelectric based acoustic wave generation and detection techniques for structural health monitoring. *Int. J. Eng.* **1**, 92862 (2013)
- [7] Korol, Andrei V., Andrey V. Solov'yov, and Walter Greiner. Coherent radiation of an ultrarelativistic charged particle channelled in a periodically bent crystal. *J. Phys. B*, **24**, 5 (1998)
- [8] Kudo, N., A simple technique for visualizing ultrasound fields without Schlieren optics. *Ultrasound Med. Biol.*, **41**, 2071-2081 (2015)
- [9] Kudo, N., Optical methods for visualization of ultrasound fields. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 07HA01 (2015)
- [10] Kudo, N. Experimental observation of an acoustic field. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*, 207-238 (2016)
- [11] Grégoire de Izarra and Charles de Izarra, Quantitative shadowgraphy made easy *Eur. J. Phys.* **33**, 1821 (2012).



Προσομοίωση ακουστικής απόκρισης χώρου για αυθαίρετη επιλογή θέσης δέκτη-πηγής

Σωτήρης Λοής¹, Ρήγας Κωτσάκης², Χρήστος Σεβαστιάδης³, Νικόλαος Βρύζας³,
Λάζαρος Βρύσης³, Χαράλαμπος Δημούλας³, Γεώργιος Καλλιρής³

¹Imperial College London

²Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

³Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

*rkotsakis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα ηχητικής εικονικής πλοήγησης σε χώρο μέσω μιας ηχητικής προσομοίωσης της απόκρισης του χώρου για διαφορετικές θέσεις πηγής και δέκτη. Η χρησιμότητα αυτής της λειτουργικότητας είναι να παρέχει μια ενδεικτική πληροφορία σχετικά αφενός με την καταλληλότητα του χώρου για πραγματοποίηση ηχογραφήσεων, αφετέρου για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του για την υποβοήθηση του ηχητικού σχεδιασμού. Η ηχητική προσομοίωση βασίζεται στην πραγματοποίηση ηχογραφήσεων σε έναν χώρο με στόχο τη δημιουργία μεγάλων και δυναμικών αποθετηρίων με τη συνδρομή πολλών διαφορετικών χρηστών. Οι παραπάνω απαιτήσεις δικαιολογούν έναν συμβιβασμό στην πιστότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων, οι οποίες πρέπει να μπορούν να εκτελεστούν από μη εξειδικευμένους χρήστες και με προσβάσιμο εξοπλισμό. Παρόλο, που πραγματοποιήθηκε πλήθος μετρήσεων από την ερευνητική ομάδα, στην παρούσα εργασία εξετάζεται σε αρχικό πειραματικό στάδιο η μεθοδολογία προσομοίωσης της απόκρισης σε συγκεκριμένη θέση πηγής-δέκτη με βάση τα δεδομένα αποκρίσεων από προϋπάρχουσες μετρήσεις χώρων, για να ελεγχεί πιλοτικά η εγκυρότητα του συνολικού εγχειρήματος.

Simulation of room acoustic response for arbitrary selection of receiver-source position

ABSTRACT

This study investigates the potentials of acoustic virtual navigation in a room/place through an acoustic simulation of the space's response for different source and receiver positions. The usefulness of this functionality is to provide indicative information regarding, on the one hand, the suitability of the place for conducting recordings, and on the other hand, its qualitative characteristics for aiding acoustic design. The acoustic simulation is based on conducting recordings in a place with the aim of creating large and dynamic repositories with the participation of many different users. These requirements justify a compromise in the fidelity and accuracy of the measurements, which must be executable by non-expert users with accessible equipment. Although numerous measurements were conducted by the research team, this study examines, at an initial experimental stage, the methodology for simulating the response at a specific source-receiver position based on response data from pre-existing space measurements, to pilot-test the validity of the overall project

Εισαγωγή

Η ηχητική κρουστική απόκριση (sound impulse response) είναι μια θεμελιώδης έννοια στην ακουστική, αναφερόμενη στον τρόπο με τον οποίο ένα σύστημα ή ένας χώρος αντιδρά σε μια σύντομη έκρηξη ηχητικής ενέργειας, που συχνά αναφέρεται ως κρουστικό σήμα (impulse). Όταν ένας ηχητικός κρουστικός ήχος εκπέμπεται σε ένα περιβάλλον, αλληλεπιδρά με τα διάφορα αντικείμενα, επιφάνειες και διαστάσεις του χώρου, προκαλώντας ανακλάσεις, απορροφήσεις και διαθλάσεις. Η απόκριση κρουστικού σήματος περιγράφει αυτήν την αντίδραση ως συνάρτηση του χρόνου, καταγράφοντας την απόκριση του συστήματος όταν διεγείρεται από μια σύντομη είσοδο. Ουσιαστικά, αποκαλύπτει τον τρόπο με τον οποίο ένας χώρος τροποποιεί τον ήχο που ταξιδεύει μέσα από αυτόν, προσφέροντας πληροφορίες για τις ακουστικές ιδιότητες του περιβάλλοντος [1]. Η μέτρηση της απόκρισης κρουστικού ήχου πραγματοποιείται με εξειδικευμένο εξοπλισμό, τεχνικές και σημάτων διέγερσης/ δοκιμής. [2]. Η απόκριση κρουστικού σήματος συχνά αναλύεται με την έννοια της απόκρισης χώρου (room impulse response - RIR), που αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ο ήχος ταξιδεύει από μια πηγή σε έναν ακροατή μέσα σε ένα δωμάτιο. Η RIR μπορεί να αναλυθεί στον άμεσο ήχο (ο οποίος είναι ο αρχικός ήχος που ταξιδεύει απευθείας από την πηγή στον δέκτη), τις πρώτες ανακλάσεις (οι οποίες είναι οι ήχοι που ανακλώνται από επιφάνειες κοντά στην πηγή και φτάνουν αμέσως μετά τον άμεσο ήχο) και την καθαυτή αντήχηση (reverberation), που είναι το παρατεταμένο, διάχυτο πεδίο ανακλάσεων που συνεχίζουν να φτάνουν καθώς ο ήχος φθίνει. Αυτά τα στοιχεία βοηθούν στον καθορισμό της ευκρίνειας, της κατανοησιμότητας και της «ζεστασιάς» του ήχου στο περιβάλλον [3]. Τα δεδομένα απόκρισης κρουστικού ήχου χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στην επεξεργασία ψηφιακών σημάτων (DSP), όπου αποτελούν τη βάση για πολλούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ήχου. Για παράδειγμα, η συνελκτική αντήχηση (convolution reverb), ένα είδος ψηφιακής ηχητικής αντήχησης που χρησιμοποιείται στην παραγωγή μουσικής και στον ηχητικό σχεδιασμό, βασίζεται στην αρχή της αναδίπλωσης (convolution), που περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας απόκρισης κρουστικού σήματος καταγεγραμμένης σε έναν πραγματικό ακουστικό χώρο σε ένα ψηφιακό ηχητικό σήμα. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς να προσομοιώσουν τον ήχο διαφορετικών περιβαλλόντων, όπως αίθουσες συναυλιών, εκκλησίες ή μικρά δωμάτια, εφαρμόζοντας τις καταγεγραμμένες αποκρίσεις κρουστικού ήχου αυτών των χώρων στις ηχογραφήσεις τους. Το convolution reverb χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή μουσικής, την μεταπαραγωγή ταινιών και τις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας για τη δημιουργία ρεαλιστικών ηχητικών τοπίων [4], [5].

1. Μεθοδολογίες ανακατασκευής ηχητικού πεδίου

Η ανακατασκευή του ηχητικού πεδίου είναι κρίσιμη σε πολλές εφαρμογές, όπως ο χωρικός ήχος σε επαυξημένες, εικονικές και μικτές πραγματικότητες (AR/VR/XR), καθώς και ο έλεγχος του ηχητικού πεδίου για την ακουστική βελτιστοποίηση. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις στην ανακατασκευή ηχητικού πεδίου συχνά βασίζονται στη διεργασία παρεμβολής από περιορισμένες χωρικές και χρονικές μετρήσεις, αλλά νέες μέθοδοι αναπτύσσονται για να αυξήσουν την ακρίβεια και τον ρεαλισμό [6], [7]. Αυτές οι προσεγγίσεις έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης ηχητικού πεδίου, της βελτιστοποίησης των ακουστικών περιβαλλόντων και της ενίσχυσης εμπειριών εμβύθισης σε περιβάλλοντα AR/VR/XR [8], [9]. Άλλες χρήσεις περιλαμβάνουν τον έλεγχο του ηχητικού πεδίου, ο οποίος επιτρέπει τον χειρισμό του ήχου σε πραγματικό χρόνο για την επίτευξη συγκεκριμένων ακουστικών στόχων [10].

Ένας σημαντικός στόχος της ανακατασκευής ηχητικού πεδίου που είναι και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ακριβής πρόβλεψη των ηχητικών πεδίων σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές παρεμβολής, οι οποίες εκτιμούν το ηχητικό πεδίο βάσει περιορισμένου συνόλου μετρήσεων [11]. Τεχνικές κανονικοποίησης καθώς και προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης που προβλέπουν το ηχητικό πεδίο σε αχαρτογράφητες τοποθεσίες, είναι μερικοί από τους τρόπους με τους οποίους έχει αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα [12]. Πιο πρόσφατα, ευρετικά μοντέλα που βασίζονται στην αποσύνθεση της απόκρισης κρουστικών κυμάτων (RIR) έχουν αποκτήσει εξέχουσα θέση λόγω της ικανότητάς τους να ερμηνεύουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των ηχητικών πεδίων [13].

Ανάμεσα στις πιο καινοτόμες εξελίξεις στον τομέα αυτό είναι η άνοδος των μεθοδολογιών βαθιάς μάθησης, οι οποίες υπόσχονται να βελτιώσουν σημαντικά την ανακατασκευή του ηχητικού πεδίου [14]. Τεχνικές όπως τα Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNNs) έχουν δείξει εξαιρετικές δυνατότητες στην καταγραφή των περίπλοκων σχέσεων μεταξύ των δεδομένων εισόδου (π.χ. μετρήσεις ηχητικού πεδίου) και των αποτελεσμάτων εξόδου (ανακατασκευασμένα ηχητικά πεδία) [15], [16]. Αυτά τα μοντέλα λειτουργούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εφαρμογές που απαιτούν την επεξεργασία σύνθετων εργασιών, όπως η ανακατασκευή ηχητικού πεδίου, όπου τα χαρακτηριστικά των χώρων και η δυναμική διάδοσης του ήχου πρέπει να ληφθούν υπόψη [17], [18].

Μια ιδιαίτερα πολλά υποσχόμενη προσέγγιση που έχει πρόσφατα προσελκύσει το ενδιαφέρον είναι τα Φυσικά Ενημερωμένα Νευρωνικά Δίκτυα (PINNs). Τα PINNs είναι ένας τύπος νευρωνικών δικτύων που ενσωματώνουν τους φυσικούς νόμους που διέπουν τη διάδοση του ήχου, όπως η κυματική εξίσωση, απευθείας στη διαδικασία εκπαίδευσης [19]. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κατανοεί και να προβλέπει τη δυναμική του ηχητικού πεδίου με μεγαλύτερη ακρίβεια, ακολουθώντας θεμελιώδεις φυσικές αρχές [20]. Τα PINNs είναι ιδανικά για την επίλυση σύνθετων μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDEs) που εμπλέκονται στη διάδοση ηχητικών κυμάτων, γεγονός που τα καθιστά ένα ισχυρό εργαλείο για εργασίες ανακατασκευής ηχητικού πεδίου. Επιπλέον, η συνεχής αναπαράσταση που προσφέρουν τα PINNs επιτρέπει χαρτογράφηση με τη χρήση πλέγματος, προσφέροντας ουσιαστικά υπολογιστικά οφέλη.

Η παρούσα εργασία εξετάζει το πλαίσιο στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν τα PINNs, χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις και προσομοιωμένα δεδομένα. Τα πειραματικά δεδομένα σε πραγματικούς χώρους δείχνουν πώς τα PINNs μπορούν να προσαρμοστούν σε πολύπλοκα, θορυβώδη περιβάλλοντα, διατηρώντας παράλληλα υψηλά επίπεδα ακρίβειας [11].

2. Περιγραφή του Πειράματος

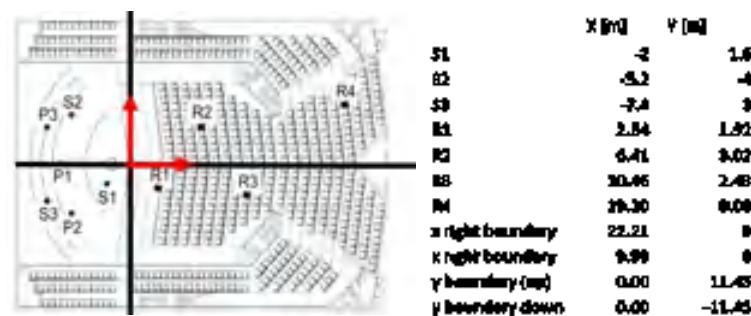
Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για την προσομοίωση της ακουστικής απόκρισης της συναυλιακής αίθουσας Promenadikeskus στο Pori, Φινλανδίας, όπως περιγράφεται στο [21]. Το πείραμα επικεντρώθηκε στη μέτρηση αποκρίσεων κρουστικών σημάτων σε διάφορες θέσεις πηγής και δέκτη, χρησιμοποιώντας τόσο μια ομοιοκατευθυντική πηγή ήχου όσο και έναν υπογούφερ. Οι μετρηθείσες αποκρίσεις αποθρομβοποιήθηκαν και διορθώθηκαν για ατέλειες του συστήματος, ενώ τα δεδομένα περιλάμβαναν διάφορες διαμορφώσεις μικροφώνων (π.χ. ομοιοκατευθυντικά, δικαναλικά, και καρδιοειδή). Στη συνέχεια, εφαρμόσαμε ένα φυσικά ενημερωμένο νευρωνικό δίκτυο (PINN) για την αναπαραγωγή αυτών των μετρημένων αποκρίσεων από τα ομοιοκατευθυντικά μικρόφωνα στη θέση των θεατών, χρησιμοποιώντας τα συγκεντρωμένα δεδομένα για την εκπαίδευση του μοντέλου. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήσαμε τα παρεχόμενα δεδομένα, όπως ο χρόνος αντήχησης (T30), για να

αναπαράγουμε την ακουστική συμπεριφορά του χώρου στο PINN. Ο στόχος ήταν να προσομοιώσει τη διάδοση του ήχου σε διαφορετικές συχνότητες και διαμορφώσεις πηγής-δέκτη, αξιοποιώντας τις προϋπάρχουσες μετρήσεις της αίθουσας για την επικύρωση της ακρίβειας του μοντέλου.

3. Μοντελοποίηση και Αποτελέσματα

Στην επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από την ομοιοκατευθυντική πηγή ήχου (omnidirectional), καθώς προσφέρει μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας στον χώρο, επιτρέποντας την καταγραφή των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της εκπομπής του ήχου. Αυτό μας εξασφάλισε μια πιο αντικειμενική και ακριβή καταγραφή της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου, χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα από την κατευθυντικότητα της πηγής ήχου.

Για την απλοποίηση των δεδομένων και τη δημιουργία ενός συνεκτικού μοντέλου, θεωρήθηκε ότι η πηγή και οι δέκτες βρίσκονται σε ίδιο ύψος. Αυτή η υπόθεση επέτρεψε τη μείωση της πολυπλοκότητας των δεδομένων και εστίασαμε αποκλειστικά στις οριζόντιες διαστάσεις του χώρου (x, y). Οι συντεταγμένες των πηγών και των δεκτών τοποθετήθηκαν στις συντεταγμένες της Εικόνας 1. Το διάγραμμα αυτό βασίζεται στις ακριβείς γεωμετρικές πληροφορίες που παρείχαν τα δεδομένα μέτρησης και απεικονίζει τις θέσεις των πηγών (S1, S2, S3) και των δεκτών (R1, R2, R3) στον χώρο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Θέσεις Πηγών - Δεκτών

Στη συνέχεια, για κάθε συνδυασμό πηγής-δέκτη (S1-R1, S1-R2, κ.λπ.), επεξεργαστήκαμε τα ηχητικά σήματα που συλλέχθηκαν από τα αρχεία ήχου. Η χρονοσειρά που αντιστοιχεί στην ηχητική πίεση του αριστερού και του δεξιού καναλιού του κάθε δέκτη υπολογίστηκε και συνδυάστηκε για να παράγει την μέση τιμή της ηχητικής πίεσης. Τα δεδομένα εισόδου περιλάμβαναν τις συντεταγμένες της πηγής και του δέκτη, καθώς και την χρονοσειρά, ενώ τα δεδομένα εξόδου αναπαριστούσαν την ηχητική πίεση στο εκάστοτε σημείο δέκτη για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Αυτός ο τρόπος επεξεργασίας επέτρεψε την παραγωγή των συνόλων δεδομένων εισόδου και εξόδου σε μορφή numpy αρχείων, τα οποία ήταν έτοιμα για την είσοδο στο PINN ώστε να αναπαραχθούν τα αποτελέσματα της ακουστικής προσομοίωσης του χώρου.

Η κυματική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του ηχητικού πεδίου είναι:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right)$$

όπου p είναι η ηχητική πίεση, t είναι ο χρόνος, x και y οι χωρικές συντεταγμένες, και c η ταχύτητα του ήχου (θεωρούμενη ίση με 343 m/s).

3.1 Αρχιτεκτονική του PINN

Κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων, αφαιρέθηκαν οι τιμές πολύ χαμηλού πλάτους (κάτω από 0.0002), οι οποίες θεωρήθηκαν ως μη ουσιώδεις ή πιθανώς θορυβώδεις. Η αφαίρεση αυτών των τιμών είχε ως στόχο τη μείωση του θορύβου στα δεδομένα εκπαίδευσης, που θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τη διαδικασία μάθησης του μοντέλου. Ειδικότερα, δεδομένα με σχεδόν μηδενικές τιμές ενδέχεται να περιέχουν θόρυβο ή πληροφορίες που δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στη μάθηση, καθώς δεν παρέχουν αξιόπιστη ένδειξη της ηχητικής πίεσης στο σύστημα. Η αφαίρεση τέτοιων τιμών είναι συχνά αποδεκτή πρακτική στη μηχανική μάθηση για τη βελτίωση της σταθερότητας του μοντέλου και την ταχύτερη σύγκλιση, καθώς επιτρέπει στο δίκτυο να επικεντρωθεί σε πιο σημαντικά μοτίβα [22]. Παρόλο που η απομάκρυνση αυτών των τιμών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ορισμένων λεπτομερειών, η πρακτική αυτή αποσκοπεί στη βελτίωση της γενικής απόδοσης του μοντέλου, όπως έχει παρατηρηθεί σε άλλα προβλήματα εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων όπου χαμηλές ή θορυβώδεις τιμές εμποδίζουν τη σύγκλιση.

Το PINN αποτελείται από τρία εισαγωγικά χαρακτηριστικά (χρόνος, συντεταγμένες x και y) και μια έξοδο που αναπαριστά την ηχητική πίεση σε κάθε σημείο του χώρου. Η αρχιτεκτονική του δικτύου περιλαμβάνει ένα επίπεδο εισόδου και ένα αριθμό κρυφών επιπέδων. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν 2 κρυφά επίπεδα με 50 νευρώνες, και η λειτουργία ενεργοποίησης που εφαρμόστηκε είναι η $\tanh$. Η συγκεκριμένη λειτουργία επιλέχθηκε καθώς είναι κατάλληλη για μοντέλα που πρέπει να μάθουν σύνθετα μοτίβα μη γραμμικής φύσης. Η τελική έξοδος του μοντέλου παράγεται από ένα επίπεδο εξόδου χωρίς λειτουργία ενεργοποίησης (linear output).

Για την αρχική εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Adam, καθώς είναι γρήγορος και σταθερός όταν ο αριθμός των δεδομένων είναι μεγάλος και η εκπαίδευση μπορεί να είναι ευαίσθητη στις αρχικές παραμέτρους. Στη συνέχεια, το μοντέλο βελτιστοποιήθηκε περαιτέρω με τον αλγόριθμο L-BFGS-B, ο οποίος επιτρέπει την πιο ακριβή ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας και χρησιμοποιείται συχνά σε παραμετρικά προβλήματα με συνεχή δεδομένα.

Η συνάρτηση απώλειας του μοντέλου περιλαμβάνει δύο κύρια σκέλη: την απώλεια φυσικής (physics loss), που σχετίζεται με την κυματική εξίσωση, και την απώλεια δεδομένων (data loss), που αφορά τη σύγκριση μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών δεδομένων. Ο συνδυασμός αυτός επιτυγχάνεται με τη χρήση προσαρμοζόμενων βαρών (adaptive weighting), με τις παραμέτρους $\varepsilon_{\text{data}}$ και ε_{PDE} να ελέγχουν την αναλογία απώλειας μεταξύ των δύο.

Τα προσαρμοζόμενα βάρη χρησιμοποιούνται για να επιτρέπουν στο μοντέλο να ισορροπεί μεταξύ της μάθησης από τα δεδομένα και της ικανοποίησης της κυματικής εξίσωσης, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στις φυσικές εξισώσεις (PDE) όταν απαιτείται ή στην απώλεια δεδομένων.

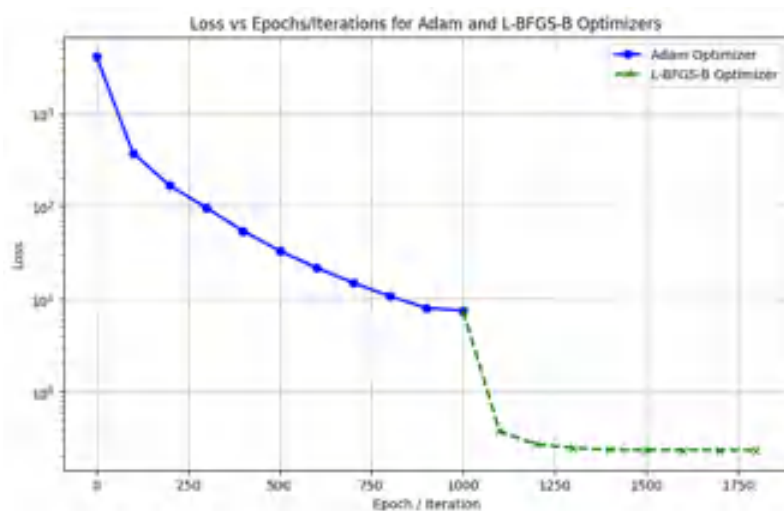
Σε αυτή την υλοποίηση, δεν χρησιμοποιήθηκαν ρητές συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), κυρίως λόγω έλλειψης δεδομένων από τα όρια του χώρου. Επομένως, η προσομοίωση στηρίχθηκε κυρίως στα δεδομένα μέτρησης μεταξύ πηγής και δεκτών. Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών θα μπορούσε να βελτιώσει τη μοντελοποίηση, αλλά απαιτεί επιπλέον δεδομένα από τα σημεία αυτά τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα από τις πηγές.

Η διαδικασία εκπαίδευσης ξεκίνησε με τον αλγόριθμο Adam για 1,000 εποχές. Η εκπαίδευση με τον Adam επιτρέπει γρήγορη σύγκλιση και αποφυγή τοπικών ελαχίστων σε πρώιμα στάδια της μάθησης. Αφού το μοντέλο συγκλίνει αρκετά, η βελτιστοποίηση

συνεχίζεται με τον αλγόριθμο L-BFGS-B, ο οποίος προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας και μπορεί να εκμεταλλευτεί τη μαθηματική δομή του προβλήματος. Ο δεύτερος αλγόριθμος δεν έχει προκαθορισμένο αριθμό εποχών, αλλά εκτελείται έως ότου η τιμή της απώλειας σταθεροποιηθεί.

3.2 Αποτελέσματα

Η απώλεια του μοντέλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 «Loss vs Epochs/Iterations for Adam and L-BFGS-B Optimizers», παρουσιάζει σημαντική μείωση κατά την εκπαίδευση του PINN. Η απώλεια είναι σχεδιασμένη σε λογαριθμική κλίμακα, επιτρέποντας να φανεί η δραστική μείωση της αρχικής τιμής πάνω από 1000 σε τιμές κάτω του 1. Μετά από περίπου 1000 εποχές εκπαίδευσης με τον αλγόριθμο Adam, η βελτίωση με την προσθήκη του δεύτερου αλγόριθμου L-BFGS-B είναι εμφανής, καθώς η απώλεια μειώνεται ακόμα πιο γρήγορα, καταλήγοντας σε τιμές περίπου 0.2. Ο συνδυασμός αυτών των δύο αλγορίθμων ενισχύει την ακρίβεια του μοντέλου, καθώς ο Adam εξασφαλίζει γρήγορη αρχική σύγκλιση, ενώ ο L-BFGS-B προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στη βελτιστοποίηση, εκμεταλλευόμενος τη μαθηματική δομή του προβλήματος.



Εικόνα 2. Απώλειες Μοντέλου

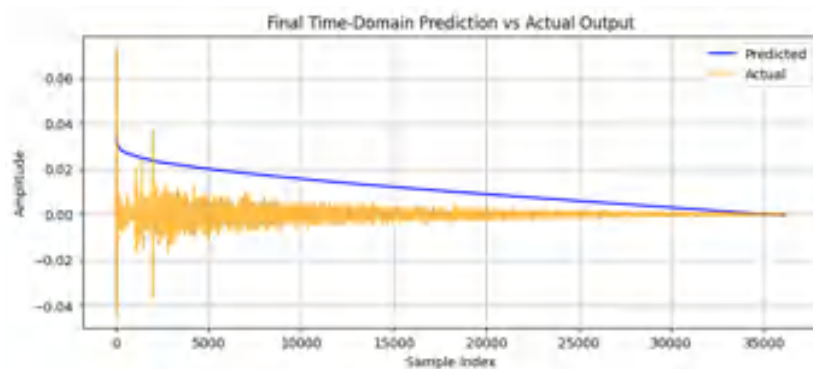
Στην Εικόνα 3 «Final Time-Domain Prediction vs Actual Output», απεικονίζεται η σύγκριση της προβλεπόμενης ηχητικής πίεσης με τα πραγματικά δεδομένα για το συνδυασμό R2 & S1. Στον άξονα των x βρίσκεται το δείγμα (sample index), το οποίο αντιστοιχεί στα χρονικά βήματα της ηχητικής απόκρισης, με κάθε τιμή να αναπαριστά μία χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της μέτρησης του σήματος. Ο άξονας των y αντιστοιχεί στο πλάτος της ηχητικής πίεσης. Παρά την οπτικά καλή σύγκλιση της γενικής μορφής της καμπύλης, η πρόβλεψη δεν καταφέρνει να αποδώσει πλήρως την πολυπλοκότητα των πραγματικών δεδομένων.

- **Έλλειψη συνοριακών δεδομένων:** Η έλλειψη λεπτομερών δεδομένων στα συνοριακά σημεία του χώρου περιορίζει τη δυνατότητα του μοντέλου να περιγράψει ακριβώς την ηχητική διάδοση στις άκρες του χώρου. Η προσθήκη συνοριακών συνθηκών θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια της προσομοίωσης.

- **Απλότητα της κυματικής εξίσωσης:** Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια βασική μορφή της κυματικής εξίσωσης, η οποία ίσως δεν επαρκεί για να περιγράψει τα πιο σύνθετα

φαινόμενα που παρατηρούνται στο πραγματικό ηχητικό πεδίο. Πιθανόν να απαιτείται η χρήση μιας πιο σύνθετης εκδοχής της κυματικής εξίσωσης, η οποία να περιλαμβάνει αποσβέσεις ή άλλους όρους για να περιγράψει την πραγματική διάδοση του ήχου στον χώρο με μεγαλύτερη ακρίβεια.

- **Απλή αρχιτεκτονική δικτύου:** Η αρχιτεκτονική του PINN που χρησιμοποιήθηκε είναι σχετικά απλή, με δύο κρυφά επίπεδα και 50 νευρώνες. Ενδεχομένως, ένα πιο περίπλοκο δίκτυο με περισσότερα επίπεδα ή περισσότερους νευρώνες θα μπορούσε να περιγράψει καλύτερα τα σύνθετα μοτίβα του ηχητικού σήματος. Ωστόσο, η εκπαίδευση πιο σύνθετων δικτύων απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και χρόνο.



Εικόνα 3. Σύγκριση πραγματικών vs προβλεπόμενων τιμών

4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συγκρίνει και να προβλέψει τις ακουστικές ιδιότητες ενός χώρου μέσω φυσικά ενημερωμένων νευρωνικών δικτύων (PINN). Παρά τα αρχικά ενθαρρυντικά αποτελέσματα, σε μελλοντικές προσπάθειες θα μπορούσαν να ενσωματωθούν πιο εμπλουτισμένες συλλογές δεδομένων στα όρια του χώρου, καθώς και αξιολόγηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών PINN για τη βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας σύγκλισης.

Επιπρόσθετα, χρήσιμη καθίσταται η διεξαγωγή υποκειμενικών/ ψυχοακουστικών πειραμάτων για την καταγραφή των αντιληπτικών συμπερασμάτων ενός ακροατηρίου αναφορικά με τις θέσεις πηγή-δέκτη και μετέπειτα σύγκριση με τα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

5. Ευχαριστίες



Η παρούσα έρευνα είναι μέρος του ερευνητικού έργου SCENE που έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα της EE Horizon Research and Innovation με αριθμό No 101095303.

6. Αναφορές

[1] Kuttruff, H., “Room Acoustics”, (6th ed.). CRC Press, 2016.
<https://doi.org/10.1201/9781315372150>

- [2] Farina, A., “Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique”, Audio Engineering Society Convention 108, 2020;
- [3] Everest, F.A. and Pohlmann, K.C., “Master Handbook of Acoustics”, McGraw-Hill, New York, 2015.
- [4] Smith, J. O., “Physical Audio Signal Processing”, W3K Publishing, 2010.
- [5] Barron, M., “Auditorium Acoustics and Architectural Design”, E & FN Spon, 1993.
- [6] Ahrens, J. (2012). Analytic methods of sound field synthesis. Springer.
DOI: 10.1007/978-3-642-25743-8
- [7] Bogaert, Tim & Doclo, Simon & Wouters, Jan & Moonen, Marc. (2009). Speech enhancement with multichannel Wiener filter techniques in multimicrophone binaural hearing aids. The Journal of the Acoustical Society of America. 125. 360-71. 10.1121/1.3023069.
- [8] Zhang X, Lou J, Zhu S, Lu J, Li R. Sound Field Reconstruction Using Prolate Spheroidal Wave Functions and Sparse Regularization. Sensors. 2023; 23(19):8312.
- [9] Bitzer, Joerg & Simmer, K.. (2001). Superdirective Microphone Arrays. Microphone Arrays. 10.1007/978-3-662-04619-7_2.
- [10] A. Politis, J. Vilkamo and V. Pulkki, "Sector-Based Parametric Sound Field Reproduction in the Spherical Harmonic Domain," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 9, no. 5, pp. 852-866, Aug. 2015,
- [11] Liang, Z., Zhang, W. & Abhayapala, T.D. Sound field reconstruction using neural processes with dynamic kernels. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2024, 13 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13636-024-00333-x>
- [12] Olivieri, M., Karakostas, X., Pezzoli, M. et al. Physics-informed neural network for volumetric sound field reconstruction of speech signals. J AUDIO SPEECH MUSIC PROC. 2024, 42 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13636-024-00366-2>
- [13] Yokota, Kazuya & Ogura, Masataka & Abe, Masajiro. (2024). Synthesis of voiced sounds using physics-informed neural networks. Acoustical Science and Technology. 10.1250/ast.e24.55.
- [14] Donoho, D. L. (2006). "Compressed sensing." IEEE Transactions on Information Theory, 52(4), 1289-1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582
- [15] Fei Ma, Sipei Zhao, Ian S. Burnett; Sound field reconstruction using a compact acoustics-informed neural network. J. Acoust. Soc. Am. 1 September 2024; 156 (3): 2009–2021.
- [16] Samuel A. Verburg, Efren Fernandez-Grande; Reconstruction of the sound field in a room using compressive sensing. J. Acoust. Soc. Am. 1 June 2018; 143 (6): 3770–3779.
- [17] Habets, Emanuel. (2006). Room Impulse Response Generator. Internal Report. 1-17.
- [18] Thrun, S., & Pratt, L. (2012). Learning to Learn. Springer. DOI: 10.1007/978-1-4615-5529-2.
- [19] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). "Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations." Journal of Computational Physics, 378, 686-707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045
- [20] Koyama, S., Ribeiro, J. G., Nakamura, T., Ueno, N., & Pezzoli, M. (2024). Physics-Informed Machine Learning For Sound Field Estimation. arXiv preprint arXiv:2408.14731.
- [21] Merimaa, J., Peltonen, T., & Lokki, T. (2005). Concert Hall Impulse Responses – Pori, Finland: Analysis Results. Helsinki University of Technology, Akukon Oy Consulting Engineers.
- [22] Zhang, Y., Song, Y., Fang, L., & Li, S. (2018). Noise removal in neural networks for better learning stability: A survey. Journal of Machine Learning Research, 20(3), 1-34.



Inverse characterization of sound absorbing media using one dimensional analytical Biot's poroelasticity theory solutions

Christos Panagiotopoulos^{1,2} Luis Sanchez-Ricart³
 Christos.Panagiotopoulos@pythmen.com Luis.SRicart@upct.es

¹ Pythmen R&D, Cartagena, Murcia, Spain.

²Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki.

³Departamento de Estructuras y Construcción, Universidad Politécnica de Cartagena.

ABSTRACT

The design of vibro-acoustic systems incorporating poroelastic materials, primarily aimed at noise reduction or cancellation, requires knowledge of several material parameters. These material parameters usually are possible to be defined using some regular test in a standard acoustic laboratory. Here, we study an inverse technique for the characterization of poroelastic materials based on Biot's theory of poroelasticity. Experimental setups for such a procedure typically consist of a configuration of several sequentially positioned layers, each of which could be a poroelastic medium, a fluid, or an elastic solid. As an indicative example we mention a configuration formed by a fluid, two porous layers saturated by a fluid, a solid layer and a second fluid. The configurations considered here result in a one-dimensional problem in the longitudinal direction, free of external forces per unit volume, stationary, and in the frequency domain ω . The problem represents the ideal conditions of the Kundt's or impedance tube. In our work we take advantage of analytical solutions for the one-dimensional case of the poroelasticity's boundary value problem. Based on previous works of one of the authors (LSR), the macroscopic model is valid from low to high frequencies; therefore, the analytical solutions are valid from low to high frequencies. Utilizing these solutions we develop a java-based toolkit that solves general case of an indefinite finite number of layers multidomain problem and calculates acoustical indicators, e.g. the surface impedance, the reflection coefficient or the absorption coefficient, important for poroelastic material characterization in vibro-acoustic applications. Following that we set a minimization problem in order to approximate the material parameters using the measured acoustical indicators. For the minimization procedure we use an evolutionary algorithm, namely the differential evolution, which is a gradient free algorithm appropriate for global optimization. Finally, examples that validate the current approach are presented.

Αντίστροφος χαρακτηρισμός ηχοαπορροφητικών μέσων με χρήση μονοδιάστατων αναλυτικών λύσεων της θεωρίας ποροελαστικότητας του Biot

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σχεδιασμός δονητικοακουστικών συστημάτων που αποτελούνται από ποροελαστικό υλικό, με κύριο στόχο τη μείωση του θορύβου, απαιτεί τη γνώση πολλών παραμέτρων του υλικού. Οι παράμετροι αυτές είναι συνήθως εφικτό να καθοριστούν με τη χρήση κάποιας συνήθους δοκιμής σε τυπικό εργαστήριο ακουστικής. Εδώ, μελετάμε μια αντίστροφη τεχνική για τον χαρακτηρισμό των ποροελαστικών υλικών που βασίζεται στη θεωρία του Biot. Οι πειραματικές διατάξεις για μια τέτοια διαδικασία αποτελούνται συνήθως από κάποια πολυστρωματική διαμόρφωση, όπου καθεμία στρώση στη γενική περίπτωση δύναται να είναι ένα ποροελαστικό μέσο, κάποιο ρευστό ή ένα ελαστικό στερεό. Ως ενδεικτικό παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση που σχηματίζεται από ένα ρευστό, δύο πορώδη στρώματα κορεσμένα από κάποιο ρευστό, ένα στερεό στρώμα και ένα δεύτερο ρευστό. Οι διατάξεις που εξετάζονται εδώ οδηγούν σε ένα μονοδιάστατο πρόβλημα στη διαμήκη διεύθυνση, απουσία εξωτερικών δυνάμεων ανά μονάδα όγκου, ενώ η μαθηματική περιγραφή τίθεται στο πεδίο των συχνοτήτων ω . Το πρόβλημα αντιπροσωπεύει τις ιδανικές συνθήκες του σωλήνα Kundt ή σωλήνα εμπέδησης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε αναλυτικές λύσεις για τη μονοδιάστατη περίπτωση του προβλήματος συνοριακών τιμών της ποροελαστικότητας. Με βάση προηγούμενες μελέτες ενός εκ των συγγραφέων (LSR), το μακροσκοπικό μοντέλο και οι αντίστοιχες αναλυτικές λύσεις, ισχύουν για μεγάλο συχνοτικό εύρος από χαμηλές έως υψηλές συχνότητες. Αξιοποιώντας αυτές τις λύσεις, αναπτύσσουμε μια εργαλειοθήκη σε ένα περιβάλλον εργασίας σε Java που αντιμετωπίζει τη γενική περίπτωση του προβλήματος πολλαπλών πεδίων για ένα προσδιόριστο πεπερασμένο αριθμό στρωμάτων και υπολογίζει κατάλληλους ακουστικούς δείκτες, π.χ. την επιφανειακή αντίσταση, τον συντελεστή ανάκλασης ή τον συντελεστή απορρόφησης, σημαντικούς για τον χαρακτηρισμό των ποροελαστικών υλικών σε δονητικοακουστικές εφαρμογές. Στη συνέχεια θέτουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης προκειμένου να προσεγγίσουμε τις παραμέτρους του υλικού χρησιμοποιώντας δεδομένους ακουστικούς δείκτες. Για τη διαδικασία ελαχιστοποίησης χρησιμοποιούμε έναν εξελικτικό αλγόριθμο, (differential evolution), ο οποίος δεν χρησιμοποιεί τις κλίσεις της συνάρτησης ελαχιστοποίησης και είναι κατάλληλος για προβλήματα εύρεσης καθολικού ελαχίστου. Τέλος, παρουσιάζονται παραδείγματα που τεκμηριώνουν την προτεινόμενη μεθοδολογία.

1 Introduction

It is a common procedure to treat acoustic problems in poroelastic media saturated by air by neglecting the two waves that propagate mainly through the solid skeleton. Therefore, models that account only for the wave propagating through the fluid interacting with the solid skeleton are typically adopted.. One of the most common such models is that of Biot, Johnson and Allard [1], which accounts for the air compressibility and the temperature effects. Nevertheless, such an approximation would not be acceptable if the saturated fluid is a liquid. That is even more pronounced when inverse characterization of materials is sought, because in such cases we need the full volume of information that is embedded into the response of such mediums. A typical example are porous metals immersed in noisy liquid environments.

In the present work we trace back to Biot's more general theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, since the waves that propagate through the solid skeleton can not be considered to be negligible when the saturated fluid is a liquid. We follow previous publications of the second author (LSR) on analytical solutions for the general Biot's theory in the range from low to high frequency content when the medium can be considered to be one dimensional. Having faced situations where the sequence of successive material parts lead to extremely intricate and lengthy analytical solutions we proceed by developing a numerical framework that deploys analytical solution for single one dimensional domains arriving at a toolkit capable to confront effectively a indefinite number of sequential successive materials that constitute a coherent wave propagation medium. We then use the developed numerical framework to perform the inverse characterization of the materials through a virtual experiment.

2 Implementation

Kinematics equations in Biot's theory express the relation between the macroscopic displacement of the solid u_i and that of the fluid v_i , with the macroscopic deformations of the solid ϵ_{ij} and that of the fluid e_{ij} , respectively,

$$\begin{aligned}\epsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \\ e_{ij} &= \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}).\end{aligned}\tag{1}$$

Furthermore, Biot's constitutive model of poroelasticity establishes the behaviour of a fluid-filled porous solid,

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \delta_{ij}(\lambda' \epsilon_{kk} + Be) + 2\mu \epsilon_{ij}, \\ s &= B\epsilon_{kk} + Ae,\end{aligned}\tag{2}$$

where, σ_{ij} the macroscopic stress of the solid skeleton, while s is the negative value of the hydrostatic pressure of the fluid and e is the cubic dilatation of the fluid, both at the macroscopic level. Then, λ' and μ are constants

connected to Lamé's parameters, that relate the stress and strain of the solid skeleton. The elastic constant, A , represents the modulus of elasticity that relates the spherical waves components of the macroscopic strain and stress of the fluid. Finally, B serves for the static coupling of fluid and the solid skeleton. Equations of motion for external forces per unit volume over the solid skeleton f_i and the fluid ϕ_i can be given as,

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} + f_i &= b_{ij}(\dot{u}_j - \dot{v}_j) + \rho_{11}\ddot{u}_i + \rho_{12}\ddot{v}_i, \\ s_j + \phi_i &= b_{ij}(\dot{v}_j - \dot{u}_j) + \rho_{12}\ddot{u}_i + \rho_{22}\ddot{v}_i.\end{aligned}\quad (3)$$

where, ρ_{11} , ρ_{12} and ρ_{22} are directly related with the open porosity β , the density of the base material of the solid skeleton ρ_s , the density of the fluid ρ_f and the apparent density of the dynamics coupling ρ_α . For isotropic permeability of the solid skeleton, the flow resistivity b_{ij} reduces to a single constant $\delta_{ij}b$. After replacement of the stresses by the strains in the equilibrium equations of eq. (3) and using the constitutive relations of eq. (2), we arrive at,

$$\begin{aligned}(\lambda' + \mu)u_{j,ji} + Bv_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + f_i &= b(\dot{u}_j - \dot{v}_j) + \rho_{11}\ddot{u}_i + \rho_{12}\ddot{v}_i, \\ Bu_{j,ji} + Av_{j,ji} + \phi_i &= b(\dot{v}_j - \dot{u}_j) + \rho_{12}\ddot{u}_i + \rho_{22}\ddot{v}_i\end{aligned}\quad (4)$$

s can be related with the interstitial fluid pressure p the single stress variable of interest in fluid,

$$s = \frac{s_{kk}}{3} = -\beta p, \quad s_{ij} = \delta_{ij}s. \quad (5)$$

Under the assumption of one-dimensional problem in the longitudinal direction $\vec{e}_x$ free of external forces per unit volume, stationary in harmonic condition of frequency ω , the solutions of the fluid and the skeleton displacements have the form,

$$u(x, t, \omega) = \tilde{u}e^{i\lambda x}e^{i\omega t}, \quad v(x, t, \omega) = \tilde{v}e^{i\lambda x}e^{i\omega t}, \quad (6)$$

with, $\tilde{u}$ and $\tilde{v}$ constant complex numbers, x the spatial variable in the longitudinal direction, t the time and λ the complex wave number. Expression for the above solutions, deployed in the current work, are given in the literature, e.g. in [2]. Here, we limit ourselves to state that solution is composed by the superimposition of two type of waves the one propagating mainly by the solid skeleton and another one that propagates mainly by the fluid, come to the solution of the form,

$$v(x, t, \omega) = (C_1\tilde{v}^I e^{i\lambda_1 x} + C_2\tilde{v}^I e^{-i\lambda_1 x} + C_3\tilde{v}^{II} e^{i\lambda_3 x} + C_4\tilde{v}^{II} e^{-i\lambda_3 x}), \quad (7)$$

where v stands for u or v the solid skeleton and fluid displacements. Finally, to write the explicit expressions of stresses in respect to displacements we introduce the kinematics relations of eq. (1) into the constitutive ones of eq. (2) and considering the case of one-dimensional problems, we get,

$$\sigma = (\lambda' + 2\mu)u_x + Bv_x, \quad s = Bu_x + Av_x. \quad (8)$$

2.1 Developed module

Using well-established analytical solutions from the literature (see [3] referenced in Section 2), we developed an appropriate module in a Java programming environment at Pythmen. SDE is an open-source Java framework mainly developed by one of the authors (CP). The module can effectively address a configuration of successive sequentially positioning material layers, as shown in Fig. 2.1, interconnected by appropriate interface conditions. The first and the last layer can be considered to extend in the infinite.

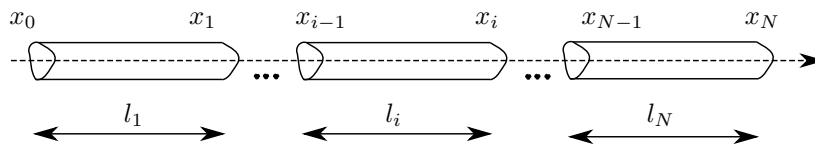


Figure 2.1 Configuration of successive material layers.

Each layer of length l_i is supposed to be an one dimensional domain of specific type of fluid, solid or poroelastic medium.

For the fluid domain in the absence of body forces, with compressibility modulus λ_f and density ρ_f , the governing equation is the standard wave equation:

$$\lambda_f w_{xx} = \rho_f \ddot{w}. \quad (9)$$

Furthermore under the assumption of harmonic condition we have the analytic solution of the displacements w , that is given as,

$$w(x, t, \omega) = W_1 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t} + W_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t} \quad (10)$$

Boundary conditions referred to a fluid layer are expressed in terms of the displacements w as well as the derivative of displacement in respect to x from which the pressure is derived as,

$$p = -\lambda_f w_x \rightarrow p = -\lambda_f \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (11)$$

Explicitly eq. (11) can be written after introducing the,

$$p(x, t, \omega) = -W_1 \left(i\omega \sqrt{\rho_f \lambda_f} \right) e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t} + W_2 \left(i\omega \sqrt{\rho_f \lambda_f} \right) e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t}. \quad (12)$$

For interconnection conditions between two successive fluid layers we consider the continuity of displacement and equilibrium of pressure, that is,

$$w^i = w^{i+1}, \quad \lambda_f^i \frac{\partial w^i}{\partial x} = -\lambda_f^{i+1} \frac{\partial w^{i+1}}{\partial x}. \quad (13)$$

An elastodynamic solid under the assumption of plane wave in the longitudinal direction $\vec{e}_x$ free of external forces per unit volume, indicating the longitudinal displacement as d , is dictated by,

$$(\lambda_s + 2\mu_s)d_{xx} = \rho_s \ddot{d}, \quad (14)$$

The solution of the above equation under the assumption of harmonic conditions in frequency ω , can be given as,

$$d(x, t, \omega) = D_1 e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s + 2\mu_s}} x} e^{i\omega t} + D_2 e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s + 2\mu_s}} x} e^{i\omega t} \quad (15)$$

which is quite similar to eq. (10), while here λ_s and μ_s the Lamé's coefficients for the material of the solid and ρ_s the mass density. Coming to the boundary conditions, when these are present on some solid layer, they expressed in terms of displacements d and the stress component τ which is derived using the displacement's derivatives,

$$\tau = (\lambda_s + 2\mu_s) \frac{\partial d}{\partial x}. \quad (16)$$

Explicitly eq. (16) can be written after introducing the,

$$\tau(x, t, \omega) = -D_1 \left(i\omega \sqrt{\rho_f \lambda_f} \right) e^{i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t} + D_2 \left(i\omega \sqrt{\rho_f \lambda_f} \right) e^{-i\omega \sqrt{\frac{\rho_f}{\lambda_f}} x} e^{i\omega t}. \quad (17)$$

For the case of two successive solid layers' interconnection we need to consider continuity of displacements and stress equilibrium,

$$d^i = d^{i+1}, \quad (\lambda_s^i + 2\mu_s^i) \frac{\partial d^i}{\partial x} = -(\lambda_s^{i+1} + 2\mu_s^{i+1}) \frac{\partial d^{i+1}}{\partial x}. \quad (18)$$

Finally, we mention that poroelastic medium is the most general one, which under certain assumptions can imitate the behaviour of a solid or a fluid therefore capable to degenerate into these types. The analytic solution for this case is the one already given in eq. (7). The boundary conditions in this case are four in number and more specific are expressed in terms of solid skeleton displacements, pore fluid displacements and their derivatives for both of them. Similarly, we should address a two-porous layers interconnection, in the case that we assume that are glued together. In that case the displacement of solid skeleton of the i^{th} poroelastic layer u^i and that of the $i+1$ layer must be equal on that interface. In order to guarantee the equality of interstitial fluid at the interface, the displacement of the fluid at macroscopic level of the two adjacent layers must be inversely proportional to their open porosities:

$$u^i = u^{i+1}, \quad \beta^i v^i = \beta^{i+1} v^{i+1}. \quad (19)$$

Furthermore, we assume that the interstitial pressures of adjacent porous layers are equal and also the same for their total stresses,

$$\beta^{i+1} s^i = \beta^i s^{i+1}, \quad \sigma^i + s^i = \sigma^{i+1} + s^{i+1}. \quad (20)$$

3 Validation

Validation of the current implementation was conducted using analytical solutions for a specific problem configuration that mimics a Kundt's tube experiment. The explicit form of the solution can be found in the literature (e.g., Appendix of [4]). We therefore consider a single poroelastic layer with

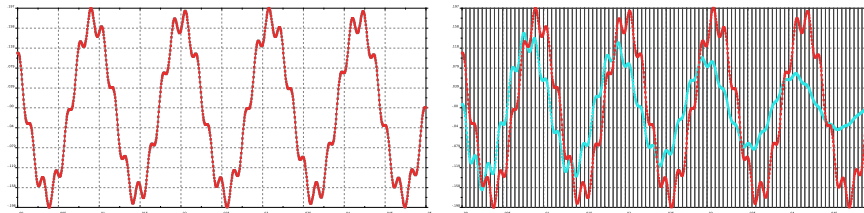


Figure 3.1 (Left) Solution for solid skeleton's displacement $u(x)$ on the length of the tube x for the test problem. Both literature's analytical solution together with results of the current implementation are plotted. (Right) Computed solution using $N=100$ individual layers for the the poroelastic medium.

a rigid, motionless, and impervious end wall, where $u=v=0$. At the left side, it has the boundary conditions as in eq. (22) for a specific $p=p_0e^{i\omega t}$. The analytical solution for the test poroelastic layer from the literature is shown in Fig. 3.1(Left), along with the results of the current implementation for a single-layer poroelastic medium under excitation at a specific frequency.

In order to validate further the current implementation we keep the same configuration as before yet we split the poroelastic layer to some finite number of individual layers connected to each other through interface conditions presented in here. The actual number of layers is $N=100$ and the resulting computed response is identical with that of a single layer, depicted in Fig. 3.1(Right). The same figure also shows the solution for the poroelastic medium with gradually increasing Lamé's coefficients, demonstrating the potential application of the current implementation.

4 Inverse characterization

Porous fibrous materials are commonly used as acoustic treatments to attenuate noise. To achieve this, it is essential to characterize the properties of such materials. Some of these properties can only be estimated using indirect approaches since it is not possible to measure them directly [5]. Here, we test the feasibility of using the presented one-dimensional analytical solution for the full Biot model, together with the population-based differential evolution global minimization algorithm, to characterize certain material parameters. Given the sound absorption coefficient, which has been numerically produced using the presented analytical solutions, we then try to first estimate the associated to the dynamic coupling of the solid skeleton and the fluid apparent density ρ_{12}

only and then the together all the three of them $\rho_{11}, \rho_{22}, \rho_{12}$. We observed that highly satisfactory estimations can be achieved, and the method demonstrates robustness even in the presence of low-level noise in synthetic measurements.

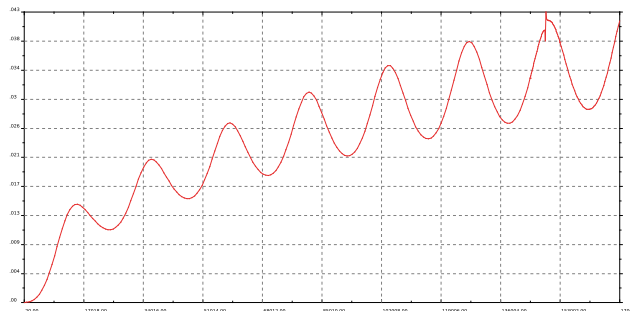


Figure 4.1 *Sound absorption coefficient over a broad range of frequencies, produced using the described analytical solutions for a certain configuration that imitates Kundt's tube.*

5 Conclusions

We have presented the implementation of a module capable of solving problems involving multilayer one-dimensional poroelastic media. For that module analytical solutions existed in the literature have been deployed. Additionally, an inverse acoustical characterization approach for these one-dimensional configurations, using the full Biot theory instead of simplified porous matrix models, has been demonstrated through specific example.

6 References

- [1] J. Allard and N. Atalla, *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials*. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] A. H.-D. Cheng, T. Badmus, and D. E. Beskos, "Integral equation for dynamic poroelasticity in frequency domain with bem solution," *Journal of engineering mechanics*, vol. 117, no. 5, pp. 1136–1157, 1991.
- [3] L. Sanchez-Ricart and J. García-Peláez, "Analytical solutions of a covering formed by two porous layers: Reflected and transmitted energy reductions," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, no. 6, pp. 1001–1012, 2014.
- [4] L. Sanchez-Ricart and J. Garcia-Pelaez, "Acoustics in anisotropic poroelasticity: space-time variational formulation," *Meccanica*, vol. 49, pp. 2757–2783, 2014.
- [5] Y. Atalla and R. Panneton, "Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements," *Canadian acoustics*, vol. 33, no. 1, pp. 11–24, 2005.



Ταυτοποίηση πλαστικής παραμόρφωσης, σχηματισμού ρωγμών και εξέλιξης αστοχίας σε χάλυβα με την μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής.

N. Αγγελόπουλος *, Θ. Τσένης, Β. Καππάτος
Ινστιτούτο Βιώσιμης Κινητικότητας & Δικτύων Μεταφορών (I.MET.) /
Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ)
*naggel@certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά την χρήση της μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής για την ανίχνευση της ελαστικής παραμόρφωσης, σχηματισμού ρωγμών καθώς και της εξέλιξης αστοχίας σε δείγματα χάλυβα που υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού. Κατά την ανάλυση των καταγεγραμμένων δεδομένων, τα σήματα ΑΕ διαχωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες που αντιστοιχούν σε ελαστική παραμόρφωση, όριο διαρροής, πλαστική παραμόρφωση και τελική αστοχία. Η ενέργεια των καταγεγραμμένων σημάτων ΑΕ παρουσίασε υψηλές τιμές στο όριο διαρροής και κατά την φάση διάδοσης ρωγμών, με χαρακτηριστικά μοτίβα σημάτων να εμφανίζονται σε κάθε στάδιο από την ελαστική παραμόρφωση έως την τελική θραύση. Η ανάλυση επιτρέπει την έγκαιρη διάγνωση και πρόβλεψη εκτεταμένης πλαστικής παραμόρφωσης και σχηματισμού ρωγμών πριν προκαλέσουν κρίσιμη αστάθεια και αστοχία.

Λέξεις κλειδιά: Ακουστική Εκπομπή, Δοκιμή εφελκυσμού, Παρακολούθηση αστοχίας

Identification of plastic deformation, crack initiation and damage evolution in steels using Acoustic Emission testing.

ABSTRACT

This study investigates the use of Acoustic Emission (AE) testing for the detection of elastic deformation, crack formation, and failure progression in steel samples subjected to tensile testing. During analysis of the recorded data, the AE signals were divided into four groups that correspond to elastic deformation, yield point, plastic deformation, and final failure. The energy of the recorded AE signals has exhibited high values at the yield point and during crack propagation, with characteristic signal patterns to appear at each stage from elastic deformation to final fracture. This analysis enables early diagnosis and prediction of extensive plastic deformation and crack formation before they cause critical instability and failure.

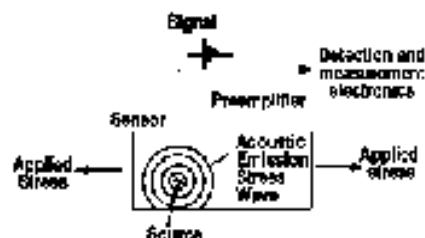
Key words: Acoustic Emission, Tensile testing Damage evolution monitoring

1. Εισαγωγή

Η Ακουστική Εκπομπή (AE) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την συνεχή παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας, σχηματισμού ρωγμών, εκκίνησης και εξέλιξης αστοχίας σε υλικά, και δομικά εξαρτήματα. Η AE βασίζεται στη ανίχνευση ελαστικών κυμάτων που παράγονται ενδογενώς στο εσωτερικό του υλικού όταν αυτό υποστεί ρηγμάτωση ή μη αναστρέψιμες αλλαγές στη δομή του όπως πλαστική παραμόρφωση ή μετασχηματισμό φάσης. Η δημιουργία και η ανίχνευση των σημάτων AE απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.

Για την εκδήλωση AE απαιτείται η επιβολή εξωτερικού φορτίου στο υλικό που θα ενεργοποιήσει τους μηχανισμούς αστοχίας, ρωγμών και παραμόρφωσης στα υλικά. Μια συνήθης μέθοδος επιβολής φορτίου σε εργαστηριακό περιβάλλον σε υλικά είναι η μηχανική δοκιμή εφελκυσμού, όπου φορτίο ασκείται στον διαμήκη άξονα ενός δοκιμίου. Κατά την διάρκεια μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού ένα μεταλλικό δοκίμιο μεταβαίνει διαδοχικά από την ελαστική στην πλαστική παραμόρφωση και τέλος, στην τελική του θραύση. Η δοκιμή εφελκυσμού μπορεί να συνοδευτεί από μετρήσεις AE με τους αισθητήρες να τοποθετούνται επάνω στο δείγμα για την ανίχνευση συμβάντων παραμόρφωσης και θραύσης. Η χρήση της AE σε συνδυασμό με μηχανικές δοκιμές και η αντίστοιχη παρακολούθηση της εξέλιξης αστοχίας έχει παρουσιαστεί και σε προηγούμενες μελέτες, [2-6]. Κατά την διάρκεια των μηχανικών δοκιμών παρατηρείται ότι η εξέλιξη της AE παρουσιάζει έντονη αύξηση στον ρυθμό δημιουργίας σημάτων στο αρχικό στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, η ένταση και το πλήθος των παραγόμενων σημάτων των σημάτων της AE μειώνεται κατά το στάδιο της ομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ έντονη δραστηριότητα στην AE παρατηρείται κοντά στην τελική αστοχία εξαιτίας του σχηματισμού και διάδοσης ρωγμών στο υλικό. Η τελική θραύση συνοδεύεται από έντονη και απότομη αύξηση στα παραγόμενα σήματα AE, λόγω των υψηλών ποσών ενέργειας που απελευθερώνονται κατά την θραύση του υλικού.

Η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και εξέλιξης αστοχίας μέσω της AE, επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των κυρίως χαρακτηριστικών των σημάτων που σχετίζονται με πλαστική παραμόρφωση και αστοχία. Τα κύρια χαρακτηριστικά των σημάτων AE που αναλύονται είναι το μέγιστο πλάτος (Amplitude), διάρκεια (Duration), χρόνος αύξησης (Risetime), ο αριθμός (Counts) των υπερβάσεων του κατωφλίου (Threshold), και ο πλήθος υπερβάσεων του κατωφλίου μέχρι το μέγιστο πλάτος (Counts to Peak), η ενέργεια του σήματος (Energy) και η κύρια συχνότητα (Peak Frequency).



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση Ακουστικής Εκπομπής [1]

2. Πειραματική Μεθοδολογία

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια από χάλυβα S355, πάχους 10mm χρησιμοποιώντας την μηχανή εφελκυσμού Jinan WDW-200. Τα δείγματα για τις δοκιμές εφελκυσμού προετοιμαστήκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6892-1. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης στα 2mm/min μέχρι την τελική θραύση των δοκιμίων. Οι δοκιμές εφελκυσμού συνοδεύτηκαν από μετρήσεις AE για την καταγραφή των σημάτων που σχετίζονται με παραμόρφωση, σχηματισμού ρωγμών, εξέλιξης αστοχίας, καθώς και για τον χαρακτηρισμό των σημάτων AE που προέρχονται από τα παραπάνω συμβάντα.

Για τις δοκιμές AE χρησιμοποιήθηκαν 2 πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες PKWD-I της Mistras Group οι οποίοι λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων 100kHz - 1MHz. Οι αισθητήρες περιέχουν ενσωματωμένους προενισχυτές για την ενίσχυση του σήματος (integral AE sensors). Για την καταγραφή, απεικόνιση και αποθήκευση των καταγεγραμμένων σημάτων χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό σύστημα Micro-SHM της Mistras Group με το αντίστοιχο λογισμικό AE-Win. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στη επιφάνεια των δειγμάτων πριν την έναρξη των δοκιμών εφελκυσμού με την χρήση μαγνητικών βάσεων. Κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε κοινό γράσο ως μέσο ακουστικής σύζευξης μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του υλικού. Η χρήση του μέσου ακουστικής σύζευξης εξασφαλίζει την ομαλή διάδοση των κυμάτων AE από το υλικό προς τους αισθητήρες εξαλείφοντας τις απώλειες σήματος.

3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Για την απεικόνιση της παραμόρφωσης και της θραύσης του υλικού κατά την διάρκεια της δομικής εφελκυσμού, χρησιμοποιείται το διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης. Επιπλέον, η εξέλιξη της παραμόρφωσης και αστοχίας μπορεί να παρακολουθηθεί με την ταυτόχρονη απεικόνιση του διαγράμματος Τάσης-Παραμόρφωσης των διαγραμμάτων της εξέλιξης της Ακουστικής Εκπομπής κατά την διάρκεια των μηχανικών δοκιμών. Η εξέλιξη της βλάβης ή της αστοχίας μπορεί να παρακολουθηθεί αξιοποιώντας την ενέργεια των σημάτων της AE, καθώς υψηλές τιμές ενέργειας AE σχετίζονται με παραμόρφωση, θραύση και σχηματισμό ρωγμών [2, 7, 8].

Μια αντιπροσωπευτική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης απεικονίζεται με την αντίστοιχη ενέργεια AE στο Σχήμα 3.1. Το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης διαχωρίζεται σε 4 στάδια. Στο 1^ο στάδιο παρατηρείται η ελαστική παραμόρφωση του υλικού, η οποία είναι πλήρως αντιστρέψιμη μετά την αποφόρτιση. Σε αυτό το στάδιο δεν παρατηρείται ρηγμάτωση ή μόνιμη παραμόρφωση. Το 2^ο στάδιο αντιστοιχεί στο όριο διαρροής¹ και στην έναρξη της μόνιμης πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης υπό σταθερό φορτίο (πλατώ διαρροής). Το πλατώ διαρροής στην

¹ Το σημείο στο οποίο το αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση του υλικού.

καμπύλη υποδηλώνει τον σχηματισμό και ανάπτυξη των ζωνών Lüders² στα μέταλλα. Στο 3^ο στάδιο πραγματοποιείται ομοιόμορφη και εκτενής πλαστική παραμόρφωση καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή του. Στο 4^ο στάδιο εντοπίζεται ο σχηματισμός ρωγμών, οι οποίες διαδίδονται στο εσωτερικό του υλικού μέχρι την τελική του θραύση.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, η ενέργεια της AE των σημάτων κατά την διάρκεια του εφελκυσμού δεν είναι ομοιόμορφη. Σήματα AE με υψηλά ποσά ενέργειας δημιουργήθηκαν στα αρχικά στάδια της φόρτισης, ενώ σήματα με χαμηλότερη ενέργεια καταγράφηκαν κατά το στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης. Στη συνέχεια σήματα με υψηλά ποσά ενέργειας εμφανίζονται κατά στο 4^ο στάδιο κοντά στην τελική θραύση του υλικού.

Στο 1^ο στάδιο η παραγόμενη AE σχετίζεται με μετατοπίσεις στα σύνορα των κόκκων³ του μετάλλου, ή με την αποκόλληση εγκλεισμάτων⁴, είτε με την θραύση της επιφανειακής στρώσης οξειδίων [5]. Στο Στάδιο 2 παρατηρείται έντονη δημιουργία AE με υψηλή ενέργεια στο σημείο διαρροής. Αυτή η δραστηριότητα AE προκύπτει από τον σχηματισμό και ανάπτυξη των ζωνών Lüders που υποδεικνύουν έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης. Σε αυτό το στάδιο, πραγματοποιείται η απαγκίστρωση και η κίνηση των διαταραχών⁵ στη δομή των μετάλλων, που οδηγεί στην παραμόρφωση και περαιτέρω ανάπτυξη των ζωνών Lüders. Αυτή είναι η κύρια πηγή δημιουργίας σημάτων AE υψηλής ενέργειας μέχρι το τέλος του Σταδίου 2 όπου ολοκληρώνεται η πλαστική ροή του υλικού. Στο 3^ο στάδιο όπου παρατηρείται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση και ενδοτράχυνση⁶, η ακουστική δραστηριότητα είναι λιγότερο έντονη. Η υψηλή συγκέντρωση και η διασύνδεση των διαταραχών παρεμποδίζει την ελεύθερη κίνηση τους που πραγματοποιείται στο 2^ο στάδιο, και συνεπώς παράγονται λιγότερα σήματα AE με χαμηλή ενέργεια. Σύμφωνα με τους Z. Han et al. [2], η κύρια αιτία δημιουργίας AE στο στάδιο 3 είναι η εκτόνωση των εσωτερικών τάσεων στο υλικό που προκαλείται από την απαγκίστρωση μεμονωμένων διαταραχών από ευρύτερες περιοχές με υψηλή συγκέντρωση διαταραχών. Στο 4^ο στάδιο ο σχηματισμός και η διάδοση ρωγμών δημιουργούν σήματα AE με υψηλή ενέργεια, μέχρι την τελική θραύση του υλικού η οποία συνοδεύεται από μια απότομη αύξηση στην παραγόμενη AE. Η εξέλιξη της παραγόμενης AE σε όλα τα στάδια 1-4 είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Z.Han et al. [2].

² Οι ζώνες Lüders αποτελούν σημεία τοπικής πλαστικής παραμόρφωσης και επεκτείνονται στο εσωτερικό του υλικού κατά την φόρτιση του [9]. Οι παρουσία των ζωνών Lüders είναι συνήθης στους χαλύβες χαμηλού άνθρακα (C% < 0.3%) όπως ο S355

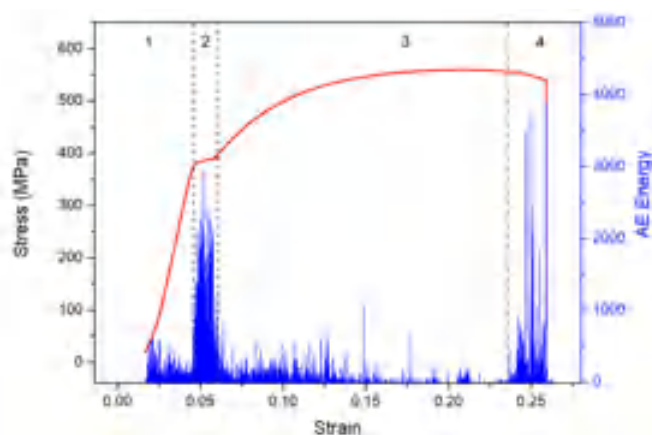
³ Κόκκοι είναι μικρο-κρύσταλλοι στην δομή των μετάλλων με διαφορετικό προσανατολισμό και τυχαία κατανομή στην δομή των μετάλλων. Σύνορα κόκκων είναι η διεπιφάνεια μεταξύ γειτονικών κόκκων [9].

⁴ Εγκλείσματα είναι τα ξένα σώματα στο εσωτερικό των μετάλλων, που δεν απομακρύνθηκαν κατά την παραγωγή και επεξεργασία του υλικού [9].

⁵ Οι διαταραχές ή γραμμοαταξίες (dislocations) είναι γραμμικές ατέλειες στο κρυσταλλικό πλέγμα γύρω από την οποία η διάταξη των ατόμων είναι μη ευθυγραμμισμένη. Συγκεκριμένα, ένα ημιεπίπεδο ατόμων παρεμβάλλεται στο πλέγμα προκαλώντας παραμόρφωση στην κρυσταλλική δομή του υλικού. Η πλαστική παραμόρφωση αντιστοιχεί στην μαζική κίνηση μεγάλου πλήθους διαταραχών με την επιβολή τάσης [10].

⁶ Ενδοτράχυνση ή εργοσκληρυνση είναι η αύξηση της σκληρότητας ενός όλκιμου μετάλλου με τη αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης. Οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών κατά την πλαστική παραμόρφωση [10].

Η αυξανόμενη παραγωγή σημάτων AE που σχετίζονται με τον σχηματισμό ρωγμών και την διαρροή του υλικού μπορεί να αξιοποιηθεί ως έγκαιρη προειδοποίηση για την έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης και θραύσης, πριν εξελιχθούν σε κρίσιμο σημείο και προκαλέσουν δομική υποβάθμιση και αστοχία ενός δομικού εξαρτήματος σε μια κατασκευή.



Σχήμα 3.1 Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και παραγόμενη ενέργεια AE

Τα χαρακτηριστικά των σημάτων AE (Amplitude, Risettime, Duration Risettime, Counts, Counts to Peak και Peak Frequency) για τα στάδια 1-4, παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.1 – 3.4 αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά των σημάτων AE στο 1^ο στάδιο μπορούν να αξιοποιηθούν για τον σχεδιασμό φίλτρων για τον αποκλεισμό συμβάντων AE και εσφαλμένων ενδείξεων που σχετίζονται με μικρο-παραμορφώσεις σε τοπικό επίπεδο, αποκόλληση εγκλεισμάτων, και θραύση επιφανειακής οξειδωσης.

Σήματα AE που σχετίζονται με μαζική κίνηση διαταραχών και πλαστική ροή κατά το 2^ο στάδιο χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές διάρκειας (Duration), χρόνου αύξησης (Risettime) και ενέργειας (Energy) σε σχέση με την πλαστική παραμόρφωση και ρηγμάτωση των σταδίων 3 και 4. Κατά την διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης στο 3^ο στάδιο, όπου παράγονται σήματα με χαμηλότερη ενέργεια και μικρότερες τιμές στην διάρκεια σε σχέση με το 2^ο στάδιο. Οι διαφορές στα χαρακτηριστικά των σημάτων AE στα στάδια 2 και 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέτρο για την διάκριση μεταξύ της πλαστικής ροής (yield) του υλικού και εκτεταμένης πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες φόρτισης. Στο 4^ο στάδιο, τα σήματα AE που σχετίζονται με σχηματισμό και διάδοση ρωγμών παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές διάρκειας (Duration), ενέργειας (Energy), και χρόνου αύξησης (Risettime). Το πλάτος (Amplitude) δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις στα στάδια 1-4. Τα σήματα AE στα διαφορετικά στάδια φόρτισης και αστοχίας (1-4) παρουσιάζουν διαφορές στην κύρια συχνότητα (Peak Frequency). Στο στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης η μέση κύρια συχνότητα εντοπίζεται στα 195-225 kHz. Στο 2^ο και 3^ο στάδιο η μέση κύρια συχνότητα εντοπίζεται στα 260 – 300 kHz, ενώ κατά τη διάρκεια σχηματισμού ρωγμών και αστοχίας (4^ο στάδιο) η μέση συχνότητα εντοπίζεται στο εύρος των 413 – 488kHz. Η

ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών των σημάτων ΑΕ που σχετίζονται με πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό ρωγμών και θραύση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τέτοια συμβάντα μπορούν να παρακολουθούνται αποτελεσματικά πριν φτάσουν στο κρίσιμο σημείο όπου μπορεί να προκύψει ξαφνική και καταστροφική αστοχία.

Επιπλέον των κυρίως σημάτων, κατά την διάρκεια των μηχανικών δοκιμών παρατηρήθηκε περιορισμένη δημιουργία σημάτων με σημαντικά υψηλότερες τιμές διάρκειας (Duratio), μεταξύ 12000μs – 25000μs. Αυτό οφείλεται στη παρουσία πηγών υψηλής έντασης (π.χ. η στιγμή της τελικής θραύσης) που προκαλούνται στο 2^ο και 4^ο στάδιο ή σε περιβαλλοντικό θόρυβο που προκαλείται από την μηχανή εφελκυσμού. Τέτοια συμβάντα διατηρούν το παραγόμενο σήμα σε επίπεδα έντασης που υπερβαίνει το κατώφλιο καταγραφής σήματος (Threshold) και το αφήνει ανοιχτό μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη επιτρεπτή διάρκεια από το καταγραφικό σύστημα [11]. Τα σήματα αυτά μπορούν να προκύψουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας ενός δομικού εξαρτήματος ή λόγω υψηλών επιπέδων περιβαλλοντικού θορύβου.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά σημάτων ΑΕ 1^ο Σταδίου

Στάδιο 1							
	Risetime μs	Counts to Peak	Counts	Energy	Duration μs	Amplitude dB	Peak Frequency kHz
Min	8	6	11	4	195	48	107
Max	9290	1049	1651	403	13621	86	908
Average	245	23	128	29	1441	62	224
Median	62	11	80	15	957	61	195

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά σημάτων ΑΕ 2^ο Σταδίου

Στάδιο 2							
	Risetime μs	Counts to Peak	Counts	Energy	Duration μs	Amplitude dB	Peak Frequency kHz
Min	7	6	11	4	196	47	107
Max	12493	2999	4642	2051	20839	94	771
Average	1217	179	607	133	4149	69	305
Median	583	57	321	56	2919	69	273

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά σημάτων ΑΕ 3^ο Σταδίου

Στάδιο 3							
	Risetime μs	Counts to Peak	Counts	Energy	Duration μs	Amplitude dB	Peak Frequency kHz
Min	8	6	11	4	117	47	107
Max	12950	1906	4404	1188	24408	97	966
Average	253	33	205	43	1780	66	300
Median	46	13	104	18	1075	65	263

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά σημάτων ΑΕ 4^ο Σταδίου

Στάδιο 4							
	Risetime μs	Counts to Peak	Counts	Energy	Duration μs	Amplitude dB	Peak Frequency kHz
Min	8	6	24	4	170	48	107
Max	15284	2753	3585	23598	25000	99	605
Average	139	29	355	139	2201	71	413
Median	23	10	118	22	1125	69	488

4. Συμπεράσματα

Η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανίχνευση και παρακολούθηση πλαστικής παραμόρφωσης, του σχηματισμού ρωγμών, καθώς και της εξέλιξης αστοχίας κατά την φόρτιση ενός υλικού. Η ανάλυση των σημάτων ΑΕ έδειξε ότι είναι δυνατός ο διαχωρισμός των σταδίων της πλαστικής παραμόρφωσης, ρηγμάτωσης και αστοχίας του υλικού, με βάση τις διαφορές στα χαρακτηριστικά των σημάτων (Risetime, Duration, Counts to Peak, Counts, Amplitude, Energy και peak Frequency) στο κάθε στάδιο. Η ενέργεια των σημάτων παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές στο 2^ο στάδιο και 4^ο στάδιο όπου παρατηρείται η έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης και η διάδοση ρωγμών αντίστοιχα. Τα αρχικά στάδια της πλαστικής παραμόρφωσης στο σημείο διαρροής του υλικού, μπορούν να διακριθούν από τα συμβάντα ρηγμάτωσης αξιοποιώντας τις τιμές της κύριας συχνότητας (Peak Frequency) των σημάτων. Τα σήματα που σχετίζονται με θραύση, και διάδοση ρωγμών παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές στην κύρια συχνότητα.

Η χρήση της ΑΕ παρέχει έγκαιρη πρόβλεψη για την έναρξη πλαστικής παραμόρφωσης και διάδοσης ρωγμών σε αρχικό στάδιο, πριν αναπτυχθούν σε κρίσιμο και προκληθεί αστοχία του υλικού και δομική αστάθεια σε μια κατασκευή. Συνεπώς, η ΑΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση δομικής ακεραιότητας και εξέλιξης αστοχίας με σκοπό την αποτροπή καταστροφικών αστοχιών, διασφαλίζοντας έτσι την αξιοπιστία, και ασφαλή λειτουργία κρίσιμων δομικών στοιχείων και υποδομών.

5. Ευχαριστίες

Το παρόν άρθρο έχει λάβει χρηματοδότηση από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα dThor, χρηματοδοτούμενο από το European Defence Fund – EDF σύμφωνα με το Grant agreement no. 101103257 dTHOR – EDF-2021-NAVAL- R-2.

6. Αναφορές

- [1] Dr. Adrian A. Pollock, ‘Acoustic Emission Inspection’, Physical Acoustics Corporation, 2003.
- [2] Z. Han, H. Luo, and H. Wang, ‘Effects of strain rate and notch on acoustic emission during the tensile deformation of a discontinuous yielding material’, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 13, pp. 4372–4380, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.042>.
- [3] M. R. Tyutin, L. R. Botvina, and T. B. Petersen, ‘Tensile damage evolution of structural steels with different structure’, *Procedia Structural Integrity*, vol. 28, pp. 2148–2156, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.042>.
- [4] M. Marsudi, ‘Study of acoustic emission during tensile test of mild steel plate’, *HEFAT 2011*, 2011.
- [5] P. Zhao, Y. Sun, J. Jiao, and G. Fang, ‘Correlation between acoustic emission detection and microstructural characterization for damage evolution’, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 230, p. 106967, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106967>.
- [6] C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar, B. Raj, and K. K. Ray, ‘The influence of notch on the acoustic emission generated during tensile testing of nuclear grade AISI type 304 stainless steel’, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 276, no. 1, pp. 83–90, Jan. 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00512-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00512-2).
- [7] N. Angelopoulos and M. Papaelias, ‘Automated analysis of acoustic emission signals based on the ISODATA algorithm’, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 60, no. 3, pp. 130–138, 2018, doi: [10.1784/insi.2018.60.3.130](https://doi.org/10.1784/insi.2018.60.3.130).
- [8] Angelopoulos Nikolaos, ‘Damage detection and damage evolution monitoring of composite materials for naval applications using acoustic emission testing.’, University of Birmingham, UK, 2017.
- [9] ‘ASM Handbook, Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation’. 2000.
- [10] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & sons, 2020.
- [11] ‘Micro-SHM System USER’S MANUAL’. Mistras Group Inc., 2017.



Ανίχνευση Συμβάντων Ακουστικής Εκπομπής σε Μεταλλικές Πύλες Δεξαμενών Ανύψωσης σε Ποτάμια

Θ. Τσένης^{1,*}, Ν. Αγγελόπουλος¹, Β. Καπάτος¹,
¹Ινστιτούτο Βιώσιμης Κινητικότητας & Δικτύων Μεταφορών I.MET.) /
 Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης-EKETA
 *tsenis@certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανίχνευση συμβάντων ακουστικής εκπομπής από μικρορωγμές αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την παρακολούθηση και την έγκαιρη ανίχνευση δομικών αστοχιών σε υποδομές. Αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στην ανίχνευση τέτοιων συμβάντων σε μεταλλικές πύλες δεξαμενών ανύψωσης σε ποταμούς, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου CRISTAL, το οποίο στοχεύει στην αύξηση του όγκου φορτίων μέσω εσωτερικών υδάτινων οδών κατά 20% και στη βελτίωση της αξιοπιστίας κατά 80%. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα τροποποιημένο νευρωνικό μοντέλο κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή (autoencoder) για την αποθρομβοποίηση των εγγραφών ακουστικής εκπομπής και ανίχνευση μικρορωγμών, χρησιμοποιώντας δεδομένα από πύλες στη Γαλλία και Ιταλία. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε με δεδομένα από κανονική λειτουργία και τεχνητά παραγόμενες ακουστικές εκπομπές μικρορωγμών, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ανίχνευσης μικρορωγμών. Δοκιμάστηκαν διάφορες μορφολογίες νευρωνικών δικτύων, συναρτήσεις λάθους και βελτιστοποιητές.

Keywords: ακουστική εκπομπή, νευρωνικά δίκτυο, πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο, κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή

Detection of Acoustic Emission Events in Metal Water Lock Gates in Rivers

ABSTRACT

Detection of acoustic emission events from micro-cracks is a critical element for monitoring and early detection of structural failures in infrastructures. This study focuses on detecting such events in metal gates of lifting locks on rivers, within the framework of the European CRISTAL project, which aims to increase cargo volume through inland waterways by 20% and improve reliability by 80%. A modified autoencoder neural network model was developed for denoising acoustic emission recordings and detecting micro-cracks, using data from gates in France and Italy. The model was trained on data from normal operation and artificially generated acoustic emissions, with the goal of optimizing micro-crack detection. Various neural network architectures, loss functions, and optimizers were tested to optimize the model's learning process.

Εισαγωγή

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας των υποδομών (Παρακολούθηση Δομικής Ακεραιότητας - ΠΔΑ) αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της αξιοπιστίας τους, ιδιαίτερα σε συστήματα που σχετίζονται τις υδάτινες μεταφορές. Στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου CRISTAL, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ανίχνευση συμβάντων μικρορωγμών σε μεταλλικές πύλες δεξαμενών ανύψωσης ποταμών, χρησιμοποιώντας τεχνολογία ακουστικής εκπομπής (acoustic emission - AE) και νευρωνικά δίκτυα. Το έργο CRISTAL, χρηματοδοτείται από την ΕΕ, στοχεύει στην αύξηση του όγκου των φορτίων που μεταφέρονται μέσω εσωτερικών υδάτινων οδών κατά 20% και στη βελτίωση της αξιοπιστίας τους κατά 80%, και μια βασική πτυχή του περιλαμβάνει τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών για την παρακολούθηση και συντήρηση κρίσιμων στοιχείων των υποδομών, όπως οι πύλες των υδατοφραγμάτων, όπως η τεχνολογία ακουστικών εκπομπών (AE), παρακολουθώντας τα ελαστικά κύματα που παράγονται με την απελευθέρωση ενέργειας από ρωγμές ή άλλα συμβάντα αστοχιών¹.

Οι αυτοκωδικοποιητές (autoencoders) έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον τομέα της επεξεργασίας AE, προσφέροντας έναν ισχυρό τρόπο εξαγωγής χαρακτηριστικών - ανωμαλιών. Η χρήση των αυτοκωδικοποιητών σε αυτόν τον τομέα έχει δείξει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτούν την αναγνώριση λεπτών μοτίβων σήματος που μπορεί να υποδεικνύουν πρώιμες ζημιές ή αποτυχία υλικού. Για παράδειγμα, μια μελέτη των Wang και Harald [1] χρησιμοποίησε αυτοκωδικοποιητές για την ανίχνευση υποεπιφανειακών βλαβών στα έδρανα αναλύοντας τα σήματα AE. Ο αυτοκωδικοποιητής εκπαιδεύτηκε για να ανασυνθέσει κανονικά μοτίβα σήματος, και οι αποκλίσεις από αυτή την ανασύνθεση θεωρήθηκαν ως πιθανές βλάβες, επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη παρέμβαση πριν την καταστροφική αποτυχία.

Μια άλλη εφαρμογή αφορά την ανίχνευση σπηλαίωσης σε υδραυλικά μηχανήματα, Kirschner, O. et al. [2], όπου τα σήματα AE επεξεργάστηκαν σε γραφήματα φάσματος, και χρησιμοποιήθηκαν αυτοκωδικοποιητές για την ανίχνευση ανωμαλιών σε αυτά. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την αναγνώριση συμβάντων σπηλαίωσης που συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευθούν με παραδοσιακές μεθόδους λόγω της παροδικότητας και της χαμηλής ενέργειας τους.

Επιπλέον, η χρήση αυτοκωδικοποιητών με πολλαπλά επίπεδα νευρώνων έχει μελετηθεί, Ebrahimkhanlou, A. et al. [3], για τον εντοπισμό και την κατηγοριοποίηση πηγών AE σε σύνθετα αεροδιαστημικά πάνελ. Αυτή η προσέγγιση αξιοποιεί την ικανότητα μείωσης διαστάσεων των αυτοκωδικοποιητών για την επεξεργασία δεδομένων AE υψηλής διάστασης και τον ακριβή εντοπισμό της πηγής των εκπομπών. Οι μελέτες αυτές, και πολλές άλλες [4-6], υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα των αυτοκωδικοποιητών στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας της ανάλυσης σημάτων AE, ενεργώντας ως εργαλεία για την ανίχνευση λεπτών και πολύπλοκων παραλλαγών σημάτων. Στη συνέχεια της παρούσης μελέτης αναπτύσσεται η μεθοδολογία και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν, τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση τους μαζί με συμπεράσματα.

¹ <https://www.cristal-project.eu>

1. Μεθοδολογία και Μοντέλα

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιθεώρηση μιας μεταλλικής πύλης σε δεξαμενές ανύψωσης ποταμών χρησιμοποιώντας ΑΕ, περιλαμβάνει την εγκατάσταση δικτύου πιεζοηλεκτρικών καταγραφών των ΑΕ που προκαλούνται από πιθανές δομικές ανωμαλίες, όπως μικρορωγμές. Τα καταγεγραμμένα σήματα ΑΕ επεξεργάζονται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας έναν εξειδικευμένο αυτοκωδικοποιητή, ο οποίος έχει εκπαιδευτεί να διακρίνει μεταξύ του θορύβου κανονικής λειτουργίας της μεταλλικής πύλης και των συγκεκριμένων ακουστικών σημάτων που σχετίζονται με τις μικρορωγμές. Ο αυτοκωδικοποιητής επιτελεί διπλό ρόλο: αφενός αποθρομβοποιεί τα δεδομένα ΑΕ, και αφετέρου παρέχει μια πρόσθετη έξοδο που δηλώνει εάν τα ανιχνευμένα σήματα μοιάζουν με το πρότυπο που σχετίζεται με τον σχηματισμό μικρορωγμών, όπως αυτά από τα τεστ σπασίματος μύτης μολυβιού ως ένα πολύπλοκο και σύνθετο μοτίβο ΑΕ [7]-[8].

2. Δεδομένα Εκπαίδευσης - Ελέγχου και Υλοποίηση Μοντέλων

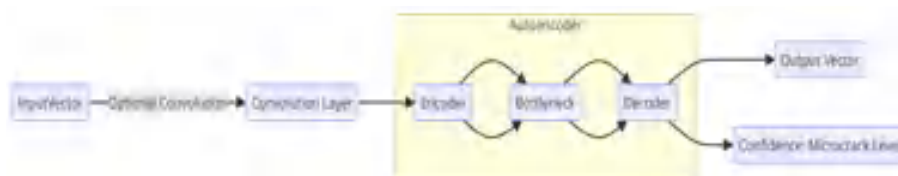
Εδώ περιγράφεται η ανάκτηση και η επεξεργασία των σημάτων εισόδου του αυτοκωδικοποιητή αλλά και η δομή του μαζί με όλες τις παραμέτρους του.

2.1 Δεδομένα και Δημιουργία Κυματομορφών

Εκτός από τα πραγματικά δεδομένα από τις δεξαμενές ανύψωσης, για να δοκιμαστούν, κατανοηθούν και αξιολογηθούν οι ικανότητες των αυτοκωδικοποιητών που αναπτύχθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν και συνθετικά σήματα μέσω κατάλληλης συνάρτησης, η οποία παράγει διάφορες κυματομορφές, όπως ημιτονοειδή, τετραγωνικά, πριονωτά και τριγωνικά κύματα με διάφορες συχνότητες, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις πρώιμες εκπαιδεύσεις για καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων του μοντέλου και των συσχετιζόμενων παραμέτρων του.

2.2 Μοντέλο Αυτοκωδικοποιητή

Το μοντέλο νευρωνικού δικτύου που αναπτύχθηκε αποτελείται από έναν κωδικοποιητή (encoder) και έναν αποκωδικοποιητή (decoder). Ο κωδικοποιητής περιλαμβάνει συνεκτικά και πυκνά επίπεδα που φιλτράρουν και μετατρέπουν τα εισαγόμενα σήματα σε έναν λανθάνοντα χώρο, ενώ ο αποκωδικοποιητής αναδομεί τη λανθάνουσα αναπαράσταση σε σήμα. Επιπλέον, ο αποκωδικοποιητής διαθέτει μια πρόσθετη έξοδο που προσδιορίζει εάν το σήμα εισόδου περιέχει κάποιο (συνθετικό) μοτίβο μικρορωγμής, όπως το Pencil Lead Breaks (PLB).



Σχήμα 2.1 Διάταξη Αυτοκωδικοποιητή

Πίνακας 2.1: Παράμετροι Κωδικοποιητή (Encoder)

Στρώμα	Τύπος	Ενεργοποίηση	Dropout	Μέγεθος Εξόδου
Conv1	Convolutional	ReLU	0.5	(N, 64, 4096)
Conv2	Convolutional	ReLU	0.5	(N, 32, 4096)
Conv3	Convolutional	ReLU	0.5	(N, 16, 4096)
Flatten	Dense	Linear	-	(N, 65535)
Dense	Dense	ReLU	-	(N, 4096)

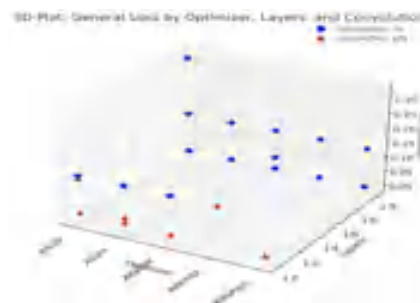
2.3 Επιπλέον Παράμετροι του Μοντέλου

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν διάφορες παραλλαγές του μοντέλου με βάση τις ακόλουθες παραμέτρους (Πίνακα 2.1.):

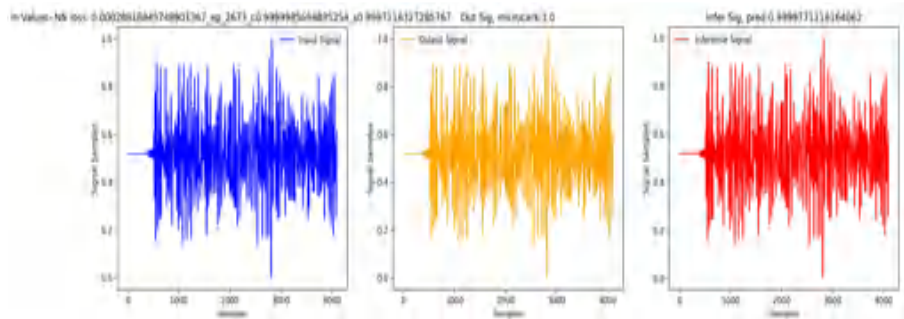
1. *Αριθμός Επιπέδων*: Εξετάστηκαν μοντέλα με 1, 2 και 3 επίπεδα νευρώνων.
2. *Συνελικτικά Επίπεδα*: Εξετάστηκαν μοντέλα με και χωρίς συνελικτικά επίπεδα (convolutional layers).
3. *Συνάρτηση Απώλειας*: Εξετάστηκαν διάφορες συναρτήσεις απώλειας όπως το ‘MSE (Mean Squared Error)’, ‘HuberLoss’, και ‘L1Loss’.
4. *Βελτιστοποιητές*: Δοκιμάστηκαν διάφοροι βελτιστοποιητές όπως οι ‘Adam’, ‘RMSprop’, ‘Adamax’, και ‘SGD’ για τη βελτιστοποίηση της εκμάθησης του μοντέλου.
5. *Κανονικοποίηση L2*: Η κανονικοποίηση L2 (L2 Regularization) εξετάστηκε με τιμές 0.0 και 1e-5.
6. *Μέγεθος Λανθάνοντος Χώρου*: Το μέγεθος του λανθάνοντος χώρου (latent space) δοκιμάστηκε σε τιμές 4, 10, 128, 512, 1024, 2048, και 4096.
7. *Συνάρτησης Ενεργοποίησης ReLU – SiLU*: Καθορίζει τη χρήση της συνάρτησης ενεργοποίησης ReLU, με εναλλακτική τη χρήση της συνάρτησης SiLU.

3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Τα αποτελέσματα, σχήμα 3.1 και 3.2 δείχνουν ότι το μοντέλο μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια μικρορωγμές. Πιο συγκεκριμένα:



Σχήμα 3.1 Αξιολόγηση παραμέτρων ως προς το ολικό λάθος εκπαίδευσης



Σχήμα 3.2 Αριστερά σήμα εισόδου (με μοτίβο μικρορωγμής), στη μέση η έξοδος εκπαίδευσης μαζί με τεχνητό θόρυβο 5% και τη σήμανση ότι είναι μικρορωγμή (microcrack:1.0). Δεξιά η έξοδος με πρόβλεψη μικρορωγμής 0.9999771 και cosine similarity:0.999998 και SSIM(Structural Similarity Index Measure):0.999711

- Η MSELoss υπερέρχει σταθερά έναντι της L1Loss όσον αφορά το γενικό λάθος. Η MSELoss παρουσιάζει πιο ομαλή εκπαίδευση, χαμηλότερες τιμές απώλειας και πιο σταθερή σύγκλιση, ειδικά με συνελκτικές αρχιτεκτονικές.
- Για την MSELoss και την L1Loss, οι συνελκτικές αρχιτεκτονικές τείνουν να αποδίδουν καλύτερα ή τουλάχιστον ισάξια με τα μη συνελκτικά μοντέλα.
- Με τους βελτιστοποιητές Adam ή AdamW, η συμπεριφορά σύγκλισης είναι γενικά πιο σταθερή όταν χρησιμοποιούνται συνελκτικές αρχιτεκτονικές.
- Με 1 επίπεδο, το γενικό λάθος τείνει να είναι χαμηλότερο για αρχιτεκτονικές με ένα επίπεδο, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με συνελκτικά μοντέλα. Με 2 Επίπεδα, το γενικό λάθος τείνει να είναι ελαφρώς υψηλότερη, ειδικά για μεγαλύτερα μεγέθη λανθάνουσας μεταβλητής και όταν χρησιμοποιείται η L1Loss.
- Λανθάνων μέγεθος: 4...512, το γενικό λάθος είναι συνήθως χαμηλό, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με συνελκτικές αρχιτεκτονικές και τη χρήση των Adam ή AdamW.

4. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Αυτή η εργασία ανέπτυξε μια πρωτότυπη μεθοδολογία για την ανίχνευση μικρορωγμών σε μεγάλες μεταλλικές κατασκευές (όπως οι μεταλλικές πύλες ανύψωσης ποταμών). Καταγράφοντας την ΑΕ κανονικής λειτουργίας και εντέχνως εισάγοντας μέσα στο σήμα αυτό την ΑΕ μικρορωγμών είτε με μεθόδους προσομοίωσης εφαρμοζόμενες επί της κατασκευής (τεχνικές PLB [7]-[8]), είτε παραγόμενες εργαστηριακά (tensile testing machine), την ανίχνευση στο ίδιο το αυτούσιο σήμα ΑΕ της κατασκευής την απευθείας ανίχνευση μοτίβων μικρορωγμών, με τη χρήση ειδικά τροποποιημένων αυτοκωδικοποιητών. Με το τρόπο αυτό απλώς επιλέγουμε τα σημεία ενδιαφέροντος στην κατασκευή υπό επιτήρησή (κρίσιμα σημεία στατικής επάρκειας της), και στη συνέχεια εκπαιδεύεται το νευρωνικό ανίχνευσης (με επιτηρούμενη εκπαίδευση) για έκαστο τέτοιο σημείο, με τη χρήση είτε συνθετικών σημάτων ΑΕ για μικρορωγμές είτε με εργαστηριακή παραγωγή τους, με χρήση κατάλληλων μεταλλικών δοκιμίων κάτω από εργαστηριακή ελαστική και πλαστική παραμόρφωση [9]. Τα επόμενα βήματα είναι να εφαρμοστεί η μεθοδολογία σε διάφορες μεγάλες μέταλλο-κατασκευές.

5. Ευχαριστίες – Acknowledgements

This publication has been produced within the project CRISTAL (Critical Infrastructure Simulation of the Multi-Order Interconnected Layers). This project has received funding from European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 101021746.

6. Αναφορές

- [1] Y. Wang, R. H. Hestmo, and A. Vinogradov «Early sub-surface fault detection in rolling element bearing using acoustic emission signal based on a hybrid parameter of energy entropy and deep autoencoder» *Measurement Science and Technology*, 34(6), 064008 (2023)
- [2] O. Kirschner, and S. Riedelbauch «Cavitation detection in hydraulic machinery by analyzing acoustic emissions under strong domain shifts using neural networks» *Physics of Fluids*, 35(2) (2023)
- [3] A. Ebrahimkhanlou, M. B. Schneider, B. Dubuc, and S. Salamone «A deep learning framework for acoustic emission sources localization and characterization in complex aerospace» *Materials evaluation*, 79(4), 391-400 (2021)
- [4] H. Yun, H. Kim, Y. H. Jeong, and M. B. Jun «Autoencoder-based anomaly detection of industrial robot arm using stethoscope based internal sound sensor» *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(3), 1427-1444 (2023)
- [5] G. W. Lee, S. Livadiotis, and S. Salamone «Applicability of Data Augmentation Through Variational Autoencoder for Two-Dimensional Acoustic Emission Source Discrimination on Hollow Cylindrical Structures» *STRUCTURAL HEALTH MONITORING* (2023)
- [6] B. Chalançon, A. Roda-Buch, E. Cornet, G. Rapp, T. Weisser, and L. Brambilla «Acoustic emission monitoring as a non-invasive tool to assist the conservator in the reactivation and maintenance of historical vehicle engines» *Studies in Conservation*, 69(2), 102-112 (2024)
- [7] F. Falcetelli, M. B. Romero, and S. Pant «Modelling of pencil-lead break acoustic emission sources using the time reversal technique» AMS Laurea (2018)
- [8] G. R. Kirikera, V. Shinde, M. J. Schulz, A. Ghoshal, M. Sundaresan and R. Allemang «Damage localisation in composite and metallic structures using a structural neural system and simulated acoustic emissions» *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1), 280-297 (2007)
- [9] A. C. E. Sinclair, D. C. Connors, and C. L. Formby «Acoustic emission analysis during fatigue crack growth in steel» *Materials Science and Engineering*, 28(2), 263-273 (1977)



Remote microphone virtual sensing with multi-microphone configurations

Achilles Kappis^{1,*}, Jordan Cheer¹, Jihui (Aimee) Zhang¹

¹Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, University Road, Southampton, SO17 1BJ, United Kingdom

*A.Kappis@soton.ac.uk

ABSTRACT

Local active noise control applications can greatly benefit from virtual sensing when error microphones cannot be positioned at the location where control is required. A previous study has provided evidence that monitoring microphone configurations comprising nested sub-arrays have the potential to enhance sound field estimation performance in diffuse sound fields. This work extends these findings by investigating the performance of similar microphone configurations in sound fields generated by a two-dimensional source configuration. The estimation accuracy of linear and circular monitoring microphone setups is evaluated, and the findings suggest that the use of nested arrays provides higher estimation accuracy at a larger spatial extent. Furthermore, the robustness of the microphone setups against perturbations is investigated, and it is shown that the configurations with nested arrays suffer from increased sensitivity, which can be partially alleviated with regularisation.

Εκτίμηση ηχητικών πεδίων με συστοιχίες ένθετων μικροφώνων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλές εφαρμογές ενεργούς ηχομείωσης μπορούν να επωφεληθούν από την τηλεσκοπική ανίχνευση ηχητικών πεδίων, ειδικά όταν η τοποθέτηση μικροφώνων στην θέση που απαιτείται έλεγχος δεν είναι εφικτή. Προηγούμενη μελέτη έδειξε ότι οι διατάξεις μικροφώνων με ένθετες υπο-συστοιχίες μπορούν να βελτιώσουν την εκτίμηση διάχυτων ηχητικών πεδίων. Η παρούσα εργασία επεκτείνει την προηγούμενη έρευνα διερευνώντας την χρήση παρόμοιων διατάξεων για την ανίχνευση ηχητικών πεδίων παραγόμενα από δισδιάστατες συστοιχίες πηγών. Για την ανίχνευση χρησιμοποιούνται γραμμικές και κυκλικές διατάξεις μικροφώνων και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διατάξεις αποτελούμενες από υπο-συστοιχίες παρέχουν υψηλότερη ακρίβεια εκτίμησης σε μεγαλύτερη χωρική έκταση. Επιπλέον, διερευνάται η ευαισθησία των διατάξεων σε σφάλματα δείχνοντας ότι η χρήση υπο-συστοιχιών αυξάνει την ευαισθησία στον θόρυβο, κάτι που μπορεί να αντιμετωπιστεί μερικώς με την χρήση κανονικοποίησης.

Introduction

Local active control applications provide feasible solutions to noise control problems [1]. However, in many applications, such as the active headrest [2], it is impractical or even impossible to position microphones at the control location. The augmentation of local active control systems with Virtual Sensing (VS) has led to a plethora of proposed solutions [3]. Information of the sound field at positions remote from the monitoring microphones provided by the VS part of the system is used, to minimize the disturbance at these positions resulting in a shift of the control point to the desired location. Providing accurate sound field estimation is crucial for the control process, and poor performance of the VS algorithm can significantly limit the overall performance of the system [4].

Conventional active control algorithms utilise pressure microphones to sample the sound field. However, past studies have shown that the use of pressure gradient information can enhance both estimation [5] and control performance [6, 7]. Additionally, it has been demonstrated that using pressure measurements of closely spaced sensors provides similar results to using a pressure and pressure gradient component when the distance between the sensors is significantly shorter than the wavelength of the primary disturbance [6, 7].

Building upon a previous study [8], the current work aims to investigate the sound field estimation performance of nested-array microphone configurations in simulated random sound fields. A linear and circular array with their elements formed by subsets of microphones of a four-element sub-array are used for the evaluation.

1. Problem formulation

The block diagram of the system used in this work is shown in *Figure 1.1*. A sound field generated by N_v sources with complex source strengths $\mathbf{v} = [v_1, v_2, v_3 \dots, v_{N_v}]^T$, where $[\cdot]^T$ denotes transposition. The signals are assumed to be generated by wide-sense stationary random processes, characterised by their power spectral density. The disturbance field at N_e virtual microphones, $\mathbf{d}_e = [\mathbf{d}_{e_1}, \mathbf{d}_{e_2}, \mathbf{d}_{e_3} \dots, \mathbf{d}_{e_{N_e}}]^T$, and at N_m monitoring microphones, $\mathbf{d}_m = [\mathbf{d}_{m_1}, \mathbf{d}_{m_2}, \mathbf{d}_{m_3} \dots, \mathbf{d}_{m_{N_m}}]^T$, are given by

$$\mathbf{d}_e = \mathbf{P}_e \mathbf{v} \quad (1.1)$$

$$\mathbf{d}_m = \mathbf{P}_m \mathbf{v}, \quad (1.2)$$

where $\mathbf{P}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times N_v}$ and $\mathbf{P}_m \in \mathbb{C}^{N_m \times N_v}$, are the frequency response matrices from the sources to the virtual and monitoring microphones respectively. The disturbance at the virtual microphones, $\mathbf{d}_e$, is estimated by filtering the measured signals $\mathbf{d}_m$ with the observation filter $\hat{\mathbf{O}}$, where the symbol $[\hat{\cdot}]$ denotes an estimated quantity. The estimation error is given by the difference of the true and estimated sound field as

$$\mathbf{e} = \mathbf{d}_e - \hat{\mathbf{d}}_e = \mathbf{d}_e - \hat{\mathbf{O}} \mathbf{d}_m. \quad (1.3)$$

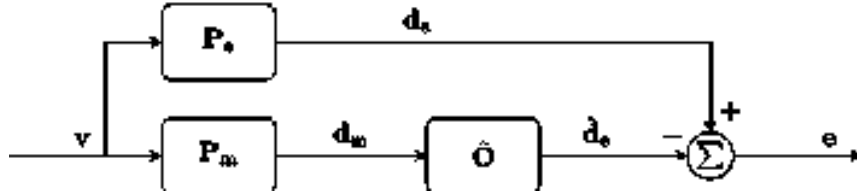


Figure 1.1: Block diagram of the virtual sensing estimation system. To estimate the disturbance signals $\mathbf{d}_e$, the observation filter $\hat{\mathbf{O}}$ is applied to the measured signals $\mathbf{d}_m$ to give the estimated disturbance $\hat{\mathbf{d}}_e$.

The optimal, in the least-squares sense, observation filter can be calculated by minimising the mean squared error [9]

$$J = E[\mathbf{e}^H \mathbf{e}] = \text{trace}\{E[\mathbf{e}\mathbf{e}^H]\} = \text{trace}\{\mathbf{S}_{ee} - \mathbf{S}_{me}\hat{\mathbf{O}}^H - \hat{\mathbf{O}}\mathbf{S}_{me}^H + \hat{\mathbf{O}}\mathbf{S}_{mm}\hat{\mathbf{O}}^H\} \quad (1.4)$$

where $E[\cdot]$ is the expectation operator and $[\cdot]^H$ denotes Hermitian transposition. The quantities $\mathbf{S}_{ee}$ and $\mathbf{S}_{mm}$ are the power spectral densities of the disturbance field at the virtual and monitoring microphones respectively and $\mathbf{S}_{me}$ is the cross-spectral density between the monitoring and virtual microphone signals given by

$$\mathbf{S}_{ee} = E[\mathbf{d}_e \mathbf{d}_e^H] = \mathbf{P}_e E[\mathbf{v} \mathbf{v}^H] \mathbf{P}_e^H = \mathbf{P}_e \mathbf{S}_{vv} \mathbf{P}_e^H \quad (1.5)$$

$$\mathbf{S}_{mm} = E[\mathbf{d}_m \mathbf{d}_m^H] = \mathbf{P}_m E[\mathbf{v} \mathbf{v}^H] \mathbf{P}_m^H = \mathbf{P}_m \mathbf{S}_{vv} \mathbf{P}_m^H \quad (1.6)$$

$$\mathbf{S}_{me} = E[\mathbf{d}_e \mathbf{d}_m^H] = \mathbf{P}_e E[\mathbf{v} \mathbf{v}^H] \mathbf{P}_m^H = \mathbf{P}_e \mathbf{S}_{vv} \mathbf{P}_m^H. \quad (1.7)$$

The quantity $\mathbf{S}_{vv} = E[\mathbf{v} \mathbf{v}^H]$, is the power spectral density of the source strengths.

The solution to the cost function of Equation (1.4) is given by [10]

$$\hat{\mathbf{O}} = \mathbf{S}_{me}(\mathbf{S}_{mm} + \beta \mathbf{I})^{-1} = \mathbf{P}_e \mathbf{S}_{vv} \mathbf{P}_m^H (\mathbf{P}_m \mathbf{S}_{vv} \mathbf{P}_m^H + \beta \mathbf{I})^{-1}, \quad (1.8)$$

where Equation (1.6) and Equation (1.7) were used to expand the cross- and power spectral density terms. The regularization term β is a non-negative real scalar and $\mathbf{I}$ is an $N_m \times N_m$ identity matrix. The regularisation term $\beta \mathbf{I}$ is used to constrain the magnitude of the filter terms and corresponds to adding noise to the microphone signals [10] which can be frequency dependent. At the expense of reduced estimation accuracy [4], regularised filters show increased robustness to perturbations in the monitoring microphone responses [11].

The performance metric used in this work is the normalised mean squared estimation error, given by

$$L_e = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{trace}\{\mathbf{S}_{\varepsilon\varepsilon}\}}{\text{trace}\{\mathbf{S}_{ee}\}} \right), \quad (1.9)$$

with $\mathbf{S}_{\varepsilon\varepsilon} = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^H]$ being the mean squared estimation error. The metric acquires

negative values for increased estimation performance with the perfect estimation accuracy being represented by $-\infty$.

2. System geometry

To facilitate comparison with previous studies [8], a uniform linear array (ULA) with inter-element distance $l_{\text{ULA}} = 0.15$ m and a uniform circular (UCA) array with radius $l_{\text{UCA}} = 0.4$ m were deployed. The elements of the arrays are formed by nested sub-arrays with four microphones arranged in two orthogonal pairs, with the distance between the microphones of each pair equal to $l_p = 0.05$ m. Different configurations were implemented by using subsets of the sub-arrays, resulting in four distinct monitoring microphone arrangements shown in *Figure 2.1*. Two of the arrangements are formed by using one pair from the sub-arrays, parallel to the y axis for the ULA_y and aligned radially for the UCA_r . The other two are implemented by adding a second pair in each sub-array, to form ULA_{xy} and $\text{UCA}_{r\phi}$. Finally, arrays with a single pressure sensor at each element position are deployed to allow comparison with conventional monitoring setups. The monitoring setups are centred at the origin with all receivers being modeled as perfect omnidirectional pressure transducers and scattering effects are not considered.

The microphone configurations are immersed in a sound field generated by thirty two ideal point sources equally spaced on a circle centred at the origin with a radius of 3 m. The sources are assumed to be uncorrelated and of equal strength resulting $\mathbf{S}_{vv} = v\mathbf{I}$, with v the source strength, which in the current work is set to unity. The sound field is estimated on a square $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ grid of 85×85 uniformly distributed virtual microphones. The source arrangement is shown in *Figure 2.1*, where the element positions of the ULA and UCA and the area where the virtual microphones are placed are also shown.

3. Simulations

3.1 Estimation performance over space

The estimation performance of the deployed arrays over the grid of virtual microphones is evaluated at the frequencies of 250 Hz, 500 Hz and 1 kHz. During the filter calculations, a frequency-independent regularization factor $\beta = 10^{-3}$ was applied to minimise numerical errors introduced by the inversion of the power spectral density matrix $\mathbf{S}_{mm}$. The effect of the condition of the matrix is investigated in *Section 3.2* in more depth.

The term *estimation zone* is used in this work to denote the area over which the normalized estimation error is at most -10 dB. The estimation zones for the deployed monitoring microphone configurations are illustrated in *Figure 3.1* as the areas enclosed by the lines. A trend common to all microphone configurations is the extension of the estimation zone along the axis of microphones when the wavelength of the excitation frequency is significantly larger than the distance between them. The dependence of the size of the estimation zone on the distance between the microphones and the wavelength is evident at higher frequencies. When the wavelength is comparable to or shorter than the distance between the array element

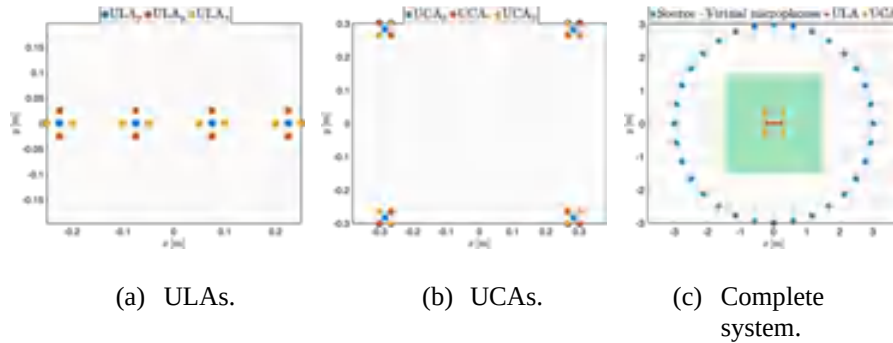


Figure 2.1: The geometry of the implemented system. The three (a) ULA and (b) UCA configurations are shown where the pairs of the pairs of the sub-arrays are color-coded. The fully populated configurations are formed by the union of the two pairs of the sub-arrays (red and yellow sensors). The complete system is shown in (c) where the green area represents the grid of virtual microphones.

positions the shape of the estimation zones becomes that acquired by the sub-arrays alone. Similar findings were reported in past studies [6, 7, 8] and reinforce the suggestion that the estimation performance depends on the coherence between the monitoring and virtual microphones [11].

An extension in the estimation zones is consistently exhibited along the axes of microphone pairs. The effect is prominent for both the ULA and UCA comprising two-element sub-arrays, where the extension of the estimation zone along the axis of the sub-array pairs is evident. Similarly, the linear setups with two microphone sub-arrays and single microphone as elements exhibit comparable estimation zone extension in the x -axis as they have their structure along this direction is the same. Furthermore, the “gaps” in the estimation zones acquired with the fully populated configuration between the configuration’s element positions appear because there is no microphone pair with an axis parallel to these positions. Finally, it is worth noting that increasing the number of microphones for a given array topology monotonically increases the estimation performance, as measured by the extent of the estimation zones.

3.2 Sensitivity to perturbations

It has been demonstrated that dense microphone setups suffer from increased sensitivity to perturbations and noise [4, 8]. The robustness of the deployed configurations is explored here via the condition number of the monitoring microphone power spectral matrix $\kappa(\mathbf{S}_{mm})$. High condition number values suggest that the matrix is ill-conditioned. The regularisation term $\beta \mathbf{I}$ is introduced to control the conditioning of the matrix and increase robustness [4]. However, the appropriate regularisation factor has a strong dependence on the values of the $\mathbf{S}_{mm}$ matrix. Since regularising is equivalent to the introduction of noise in the measured responses [10], in this work, the value of the regularisation factor β is chosen such that it will provide a specified Signal-to-Noise Ratio (SNR) in the monitoring microphone measured

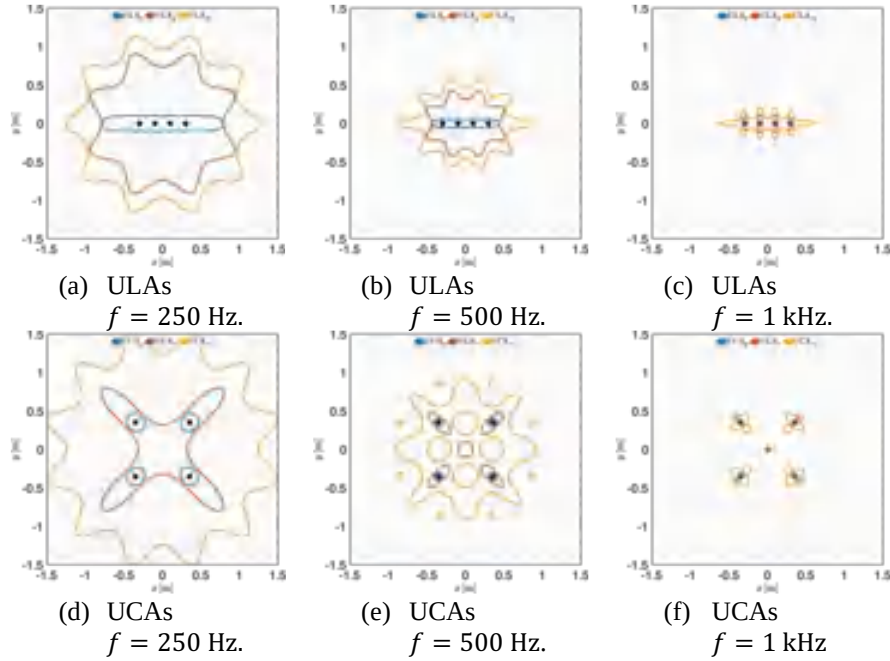


Figure 3.1: Estimation zones for the six deployed arrays at the frequencies of 250 Hz, 500 Hz and 1 kHz. The positions of the array elements are shown as black dots.

responses. The SNR is calculated as [11]

$$\beta = e^2 \frac{\|s_{mm}\|_F}{M^2}, \quad (3.1)$$

where e denotes the normalised Root-Mean-Square (RMS) error due to noise, $\|\cdot\|_F$ is the Frobenius norm, M is the number of microphones and the frequency dependence of the value has been suppressed for notational convenience. The error e takes values in the range $0 \leq e \leq +\infty$ and the SNR can then be calculated in dB as

$$SNR = 10 \log_{10}(e^{-1}) = -10 \log_{10}(e) \quad (3.2)$$

To investigate the sensitivity of the monitoring setups and the effect of regularisation, the condition number and the normalised estimation error, averaged over the virtual microphone grid, for all deployed configurations is calculated for the frequency of 500 Hz and SNR values ranging from 30 dB to -10 dB and are shown in Figure 3.2.

As is evident from the results in the figure, dense microphone configurations, shown in red and yellow lines, exhibit large condition numbers indicating high sensitivity to perturbations. It is worth noting that the linear setups are more sensitive than their circular counterparts, due to the proximity of the array element positions, indicating that the condition of the array is dependent on both the form of the array,

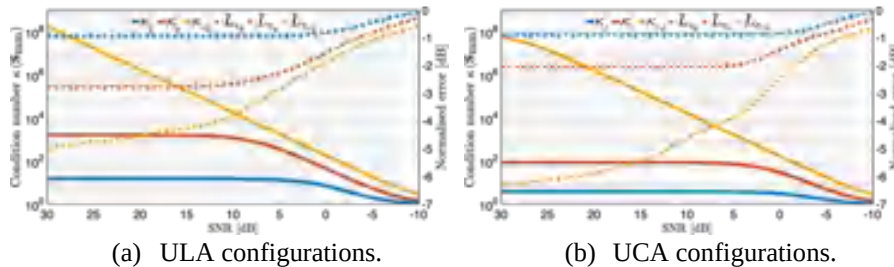


Figure 3.2: Condition number of the monitoring microphone power spectral density matrix and the spatially averaged normalised estimation error. The solid lines correspond to the condition number and the dashed lines to the error.

as well as the structure of the sub-array elements.

The condition number exhibits a plateau at high SNR values with saturation in the estimation performance following the same trend. The average estimation performance for the arrays with single microphone elements is similar, despite the difference in the spatial distribution of the error between them as shown *Figure 3.1*. Between the two microphone sub-array configurations, the linear setup achieves lower estimation error on average. The smaller distance between array positions allows the combination of information as described in the literature [6-8], which is not the case for the circular setup as can be seen in *Figure 3.1.e*.

In the case of the configurations with fully populated sub-arrays, the circular setup outperforms the linear arrangement. The extended area covered by the circular setup in combination with the considerable increase in the coherence between the monitoring and virtual microphones on the microphone axes, provided by the dense sub-arrays, result in a significant enhancement in the estimation performance.

Finally, the condition of all microphone configurations seems to converge to a low value when the SNR deteriorates, with significant reduction in the average estimation performance.

4. Summary

The estimation performance of microphone configurations formed by nested sub-arrays has been evaluated in a simulated sound field generated by a circular array of ideal point sources. The area where the estimation error is less than -10 dB, shows considerable extension along the axis of microphone pairs when the distance between the microphones is significantly shorter than the wavelength of the exciting sound field, supporting findings of past studies [6, 8].

Dense microphone setups achieve lower estimation errors than the conventional arrays but are shown to suffer from increased sensitivity to perturbations. Regularisation can be introduced to increase the robustness of the configurations at the expense of estimation performance. The performance and sensitivity of the microphone configurations are two competing factors, and their balance must be taken into account during the design of the monitoring microphone setups.

5. Acknowledgements

This work was supported by the project “IN-NOVA: Active reduction of noise transmitted into and from enclosures through encapsulated structures”, which has received funding from the European Union’s Horizon Europe programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 101073037 and by UK Research and Innovation under the UK government’s Horizon Europe funding guarantee [grant number EP/X027767/1].

6. References

- [1] S. J. Elliott, P. A. Nelson, “Active Noise Control”, IEEE Signal Processing Magazine **10**, pp. 12–35 (1993).
- [2] W. Jung, S. J. Elliott, and J. Cheer, “Estimation of the pressure at a listener’s ears in an active headrest system using the remote microphone technique”, The Journal of Acoustical Society of America **143**, pp. 2858–2869 (2018).
- [3] D. J. Moreau, B. S. Cazzolato, A. C. Zander, and C. Petersen, “A Review of virtual sensing algorithms for active noise control”, Algorithms **1**, pp. 69–99 (2008).
- [4] J. Zhang, S. J. Elliott, and J. Cheer, “Robust performance of virtual sensing methods for active noise control”, Mechanical Systems and Signal Processing **152** (2021).
- [5] B. Xu, S. D. Sommerfeldt, and T. W. Leishman, “Generalised acoustic energy density”, The Journal of the Acoustical Society of America **130**, pp. 1370–1380 (2011).
- [6] S. J. Elliott and J. Garcia-Bonito, “Active cancellation of pressure and pressure gradient in a diffuse sound field”, Journal of Sound and Vibration **186**, pp. 696–704 (1995).
- [7] D. J. Moreau, J. Ghan, B. S. Cazzolato, and A. C. Zhander, “Active noise control in a pure tone diffuse sound field using virtual sensing”, The Journal of the Acoustical Society of America **125**, pp. 3742–3755 (2009).
- [8] A. Kappis, J. Cheer, and Jihui (Aimee) Zhang, “Remote sensing using multi-microphone configurations for local active noise control applications” in *Proceedings of the 30th International Congress on Sound and Vibration*, (2024).
- [9] S. J. Elliott and J. Cheer, “Modeling local active sound control with remote sensors in spatially random pressure fields”, The Journal of the Acoustical Society of America **137**, pp. 1936–1946 (2015).
- [10] S. J. Elliott, J. Cheer, J. W. Choi, and Y. Kim, “Robustness and regularization of personal audio systems”, IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing **20**, pp. 2123–2133 (2012).
- [11] W. Jung, S. J. Elliott, and J. Cheer, “Combining the remote microphone technique with head-tracking for local active sound control”, The Journal of the Acoustical Society of America **142**, pp. 298–307 (2017).
- [12] P. Zhang, S. Wang, H. Duan, J. Tao, H. Zou, and X. Qiu, “A study on coherence between virtual signal and physical signals in remote acoustic sensing”, The Journal of the Acoustical Society of America **152**, pp. 2840–2848 (2022).



***Η χρήση οπτικοακουστικών διαδραστικών αφηγήσεων
και δραστηριοτήτων ως μέσο ηχητικής ευαισθητοποίησης
παιδιών 9-12 ετών***

Κωνσταντίνα Σταυροπούλου^{1,*}, Μηνάς Εμμανουήλ²
^{1, 2} Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
*kstavropoulou@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα ανακοίνωση αναδεικνύεται ο σχεδιασμός, η δημιουργία και η χρήση οπτικοακουστικών διαδραστικών αφηγήσεων στα πλαίσια έρευνας που πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της ηχητικής ευαισθητοποίησης παιδιών ηλικίας 9-12. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο τριθέσιο δημοτικό σχολείο του χωριού Ζάκρος στο νομό Λασιθίου. Εκ προοιμίου, η προσέγγιση της εν λόγω έρευνας αποδέχεται και αναδεικνύει την αμφίδρομη σχέση μεταξύ καλλιτεχνικής δημιουργίας και ερευνητικής διαδικασίας. Για τις ανάγκες του ερευνητικού σκοπού σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τρεις οπτικοακουστικές διαδραστικές αφηγήσεις με περιφερικό ήχο και μία ηχητική διαδραστική δραστηριότητα. Διεξήχθη συλλογική μελέτη περίπτωσης, όπου μέσω ποιοτικών μεθόδων ανάλυσης των δεδομένων εξήχθησαν ποικίλα αποτελέσματα. Τα συμπεράσματα οδηγούν στην επιβεβαίωση της πολύπλευρης συμβολής των πολυμεσικών αφηγήσεων και των σύγχρονων τεχνολογιών του ήχου στην ηχητική εκπαίδευση των παιδιών, αλλά και αφήνουν ενδιαφέρουσες ενδείξεις σε σχέση με τον περιφερικό ήχο και την αντιληπτική τους ικανότητα.

"The implementation of audiovisual interactive narratives and activities as a tool for sound awareness for children aged 9-12"

ABSTRACT

This presentation highlights the design, creation, and use of audiovisual interactive narratives in a study investigating sound awareness in children aged 9-12. The study was conducted at the three-class primary school in Zakros, Lasithi. The research approach emphasized the reciprocal relationship between artistic creation and the research process. Three audiovisual interactive narratives with surround sound and one interactive sound activity were developed. A collective case study using qualitative data analysis produced varied results. The findings confirm the significant contribution of multimedia narratives and modern sound technologies to the children's auditory development, while also providing intriguing insights into their perceptual ability concerning surround sound.

Εισαγωγή

Ζούμε σε ένα κόσμο, όπου τίποτα ουσιαστικό δε συμβαίνει χωρίς να είναι παρόν ο ήχος [1], ενώ παράλληλα διανύουμε την εποχή των καθημερινών θορύβων, των ήχων χαμηλής ευκρίνειας και της τάσης για μονοαισθητηριακή αντίληψη του περιβάλλοντος. Εν μέσω μίας τέτοιας περιόδου, ζητήματα όπως η καλλιέργεια της ακουσματικής εμπειρίας και η ευαισθητοποίηση των παιδιών στους ήχους και τα ηχοτοπία έρχονται στο προσκήνιο απασχολώντας τόσο την καλλιτεχνική, όσο και την ακαδημαϊκή αλλά και εκπαιδευτική κοινότητα. Η πολυσχιδής σχέση της τέχνης με τη φύση, αλλά και με τις σύγχρονες πολυμεσικές τεχνολογίες και τις τεχνολογίες του ήχου και της μουσικής, θεωρείται ολοένα και ικανότερη να ανταποκριθεί εκπαιδευτικά στις σύγχρονες αυτές ανάγκες.

Η παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε σε παιδιά ηλικίας 9-12 ετών στο τριθέσιο δημοτικό σχολείο του χωριού Ζάκρος στο νομό Λασιθίου. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τρεις οπτικοακουστικές διαδραστικές αφηγήσεις με περιφερικό ήχο και μία ηχητική διαδραστική δραστηριότητα. Βασικό σκοπό της έρευνας αυτής αποτέλεσε η μελέτη της ηχητικής ευαισθητοποίησης των παιδιών ως αποτέλεσμα του βιώματος του εν λόγω καλλιτεχνικού project.

1. Ηχητική εκπαίδευση και μουσική τεχνολογία

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις και ποικίλα βιώματα μέσω των οποίων δίνεται η δυνατότητα της καλλιέργειας της ακουσματικής εμπειρίας, της ηχητικής εκπαίδευσης και της διερεύνησης της ηχητικής ευαισθητοποίησης. Παρατηρείται μέσω της βιβλιογραφίας, η συμβολή των συσκευών των τεχνολογιών του ήχου, όπως οι φορητοί εγγραφείς, στην καταγραφή και εξερεύνηση ηχοτοπίων από τη δεκαετία του 1970. Στη δεκαετία αυτή κυριαρχούσαν αναλογικά μέσα, όπως οι δίσκοι βινυλίου και τα κασετόφωνα, τα οποία σταδιακά αντικαταστάθηκαν έως ότου οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις, όπως οι εφαρμογές για "έξυπνα" κινητά τηλέφωνα, επιτρέπουν πλέον σε οποιονδήποτε να δημιουργεί και να επεξεργάζεται ήχους εύκολα και προσιτά.

Η χρήση της σύγχρονης μουσικής τεχνολογίας πλέον ανοίγει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων από τη βελτίωση του κινήτρου και του ενδιαφέροντος των μαθητών, μέχρι την εξερεύνηση και τον πειραματισμό με τους ήχους [2] και επιτρέπει στα παιδιά να διαδραματίσουν εκτός από τους παραδοσιακούς ρόλους του ερμηνευτή και του ακροατή, αλλά και ένα διευρυμένο ρόλο ακροατή ως παραγωγός και σχεδιαστής ηχητικών περιβαλλόντων [3].

2. Ψηφιακές πολυμεσικές αφηγήσεις και σύγχρονα διαδραστικά περιβάλλοντα

Οι αφηγήσεις αποτελούν ένα διαχρονικό εργαλείο που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν για διδακτικούς σκοπούς. Με την έλευση των σύγχρονων τεχνολογιών, οι παραδοσιακές αφηγήσεις εξελίχθηκαν σε ψηφιακές πολυμεσικές μορφές, οι οποίες συνδυάζουν διάφορα ψηφιακά μέσα, όπως ήχο, βίντεο και διαδραστικά στοιχεία [4]. Επιπλέον, η πολυδιάστατη αυτή μορφή μάθησης

υποστηρίζει τη μάθηση μέσω πολλαπλών κινήτρων, αλληλεπίδρασης και συναισθηματικής εμπλοκής. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση στη χρήση ψηφιακών αφηγήσεων στην εκπαίδευση [5], ωστόσο η εφαρμογή τους στη μουσική και ηχητική εκπαίδευση παραμένει σχετικά ανεξερευνήτη [6].

Αναφορικά με την ένταξη της διάδρασης στις ψηφιακές πολυμεσικές αφηγήσεις, η ανάπτυξη των διαδραστικών τεχνολογιών, βασισμένων σε κινήσεις σώματος και χειρισμούς αντικειμένων, έχει ανοίξει νέες προοπτικές για καινοτόμες μορφές αλληλεπίδρασης [7]. Στον τομέα της εκπαίδευσης, οι διαδραστικές τεχνολογίες έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ευεργετικές, προωθώντας διαδικασίες ομαδικής και κοινωνικής μάθησης που απαλλάσσουν τους μαθητές από το άγχος και ενισχύουν το κίνητρο για γνώση [8]. Στην ηχητική και κυρίως στη μουσική εκπαίδευση, η εξέλιξη προσιτών τεχνολογικών εργαλείων, τόσο σε επίπεδο λογισμικού όσο και υλικού, έχει δώσει νέες δυνατότητες για δημιουργία διαδραστικών συστημάτων. Η χρήση αυτών των συστημάτων ανοίγει νέους ορίζοντες στην ηχητική εκπαίδευση, αναδεικνύοντας με ένα διαφορετικό και δημιουργικό τρόπο το βίωμα του ήχου και της μουσικής. Η ένταξη του σώματος στις διαδικασίες της δημιουργίας αναδεικνύει την κίνηση ως στοιχείο της αντίληψης του ήχου, κάτι που οι παραδοσιακές τεχνολογίες συχνά παραμέλησαν [9]. Στα πλαίσια της έρευνας, αναπτύχθηκε ένα διαδραστικό εκπαιδευτικό περιβάλλον με τη χρήση απτών διεπαφών. Οι διεπαφές συλλαμβάνουν την ανθρώπινη κίνηση και ενσωματώνουν τις δράσεις αυτές σε ψηφιακές εφαρμογές, επιτρέποντας τη δημιουργική συμμετοχή χωρίς την απαίτηση τεχνικών δεξιοτήτων [7].

3. Μεθοδολογία της έρευνας

Η μελέτη είχε ως στόχο να διερευνήσει την ακουστική ευαισθητοποίηση των παιδιών μέσω της εμπειρίας τους με ένα οπτικοακουστικό διαδραστικό πρότζεκτ. Τα ερευνητικά ερωτήματα αφορούν την αντιληπτική ικανότητα των παιδιών σε σχέση με τους ήχους και τα ηχοτοπία των αφηγήσεων, καθώς και τη δημιουργική αντίληψη του ήχου. Για την έρευνα επιλέχθηκε η ποιοτική προσέγγιση με συλλογική μελέτη περίπτωσης. Η επιλογή του δείγματος έγινε μέσω σκόπιμης στρωματοποιημένης δειγματοληψίας με τον συνδυασμό των στρατηγικών κριτηρίου και χιονοστιβάδας [10], περιλαμβάνοντας δύο ποικιλόμορφες ομάδες μαθητών από το ολοήμερο δημοτικό σχολείο της Ζάκρου. Συμμετείχαν τέσσερα κορίτσια και δύο αγόρια από τη Γ' και Δ' τάξη, καθώς και τέσσερα κορίτσια και τρία αγόρια από την Ε' και ΣΤ' τάξη. Κριτήρια επιλογής ήταν η ηλικία, ο τόπος κατοικίας και η έλλειψη εξοικείωσης με βιωματικές δράσεις βασισμένες σε σύγχρονες τεχνολογίες. Σημαντική θεωρήθηκε η σύνδεση των παιδιών με το φυσικό περιβάλλον και τα ηχοτοπία της περιοχής τους.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα εργαλεία συλλογής δεδομένων: βιντεοσκοπήσεις, ομάδες εστίασης, σημειώσεις πεδίου και ηχογραφήσεις. Οι βιντεοσκοπήσεις, οι οποίες αποτέλεσαν βασικό εργαλείο όλων των σταδίων της δράσης με τα παιδιά, μεταγράφηκαν και αναλύθηκαν, ενώ οι ομάδες εστίασης ανέδειξαν τη σύνθετη αντίληψη και τα συναισθήματα των παιδιών. Η παρατήρηση των μη λεκτικών αντιδράσεων των παιδιών κατέγραψε συμπεριφορές και αλληλεπιδράσεις κατά τη διάρκεια των αφηγήσεων. Στην ηχητική δραστηριότητα ηχογραφήθηκαν έξι

συνθέσεις, τρεις από κάθε ομάδα, με σκοπό τη συμβολή στη διερεύνηση της δημιουργικής αντίληψης του ήχου.

4. Περιγραφή της δράσης με τα παιδιά

Στο πλαίσιο της έρευνας δημιουργήθηκε ένα καλλιτεχνικό πρότζεκτ, που περιλάμβανε τρεις οπτικοακουστικές διαδραστικές αφηγήσεις και μια δραστηριότητα σύνθεσης με ηχητική διάδραση. Οι αφηγήσεις βασίστηκαν στα λαϊκά Σητειακά παραμύθια «Γκιουζέλ Ντουνιά», «Η πούλια και ο αυγερινός» και στο διήγημα «Ο Κολόμπρος» του Dino Buzzati.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις συναντήσεις με τα παιδιά εντός της σχολικής αίθουσας κατά τη διάρκεια του ωραρίου, όπου σε κάθε συνάντηση τα παιδιά παρακολούθησαν μία διαδραστική αφήγηση. Μετά την προβολή, τα παιδιά κλήθηκαν να δημιουργήσουν μια πρωτότυπη ηχητική σύνθεση εμπνευσμένη από την αφήγηση και στη συνέχεια συμμετείχαν σε μία ομάδα εστίασης.

Η αίθουσα ήταν διαμορφωμένη με οθόνη προβολής για τα βίντεο, ηχεία περιφερικής διάταξης (surround audio), καθώς και αντικείμενα τοποθετημένα μπροστά από κάθε παιδί. Αυτά τα αντικείμενα ήταν ηλεκτραγώγιμα, συνδεδεμένα με μία διεπαφή με τον υπολογιστή, και αντιστοιχούσαν σε στοιχεία της κάθε αφήγησης (π.χ. φυτό, πέτρα, μέταλλο και γυάλα με νερό). Στη διάρκεια των αφηγήσεων υπήρχαν αφηγηματικές παύσεις, όπου μια λάμπα μπροστά από κάθε αντικείμενο έδινε σήμα στο παιδί να το αγγίξει. Με το άγγιγμα, τα παιδιά ενεργοποιούσαν ήχους που αντιστοιχούσαν στις σκηνές των αφηγήσεων, ενώ μπορούσαν να μεταβάλουν τον τονικό τους ύψος και άλλα χαρακτηριστικά.

Μετά τις αφηγήσεις, τα παιδιά είχαν χρόνο να πειραματιστούν περαιτέρω με την ηχητική διάδραση με τα αντικείμενα. Στη συνέχεια, υπό καθοδήγηση οι μαθητές χρησιμοποίησαν κάποιες καρτέλες με τις απεικονίσεις των αντικειμένων και κατασκεύασαν μια μορφή εναλλακτικής παρτιτούρας για την ηχητική τους σύνθεση. Οι συνθέσεις ηχογραφήθηκαν ζωντανά και ακολούθησε η ακρόαση τους, καθώς και συζήτηση αναστοχασμού.

5. Δημιουργία του οπτικοακουστικού διαδραστικού project

Η έρευνα στηρίχτηκε στην αμφίδρομη σχέση μεταξύ καλλιτεχνικής δημιουργίας και ερευνητικής διαδικασίας. Στον κεντρικό άξονα της προσέγγισης όλων των δημιουργικών φάσεων τοποθετήθηκε ο ήχος και η ανάδειξη αυτού, με σκοπό τη δημιουργία μίας ποιοτικής και πολύπλευρης ηχητικής εμπειρίας για τα παιδιά που θα εξυπηρετεί ταυτόχρονα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη διερεύνηση των ερευνητικών ερωτημάτων.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μία σύντομη έρευνα για την εύρεση κατάλληλων ιστοριών για τις αφηγήσεις. Στη συνέχεια και σε διάστημα επτά μηνών πραγματοποιήθηκαν έξι επισκέψεις στο γεωπάρκο της Σητείας για ηχοπεριπάτους και καταγραφή ήχων και ηχοτοπίων. Οι ηχογραφήσεις έγιναν με φορητούς εγγραφείς, και εξοπλισμό μικροφώνων, σε διάφορα σπήλαια, παραλίες, φαράγγια και τοποθεσίες του γεωπάρκου. Παράλληλα το ίδιο χρονικό διάστημα, έγιναν ηχογραφήσεις των αφηγήσεων και κάποιων παραδοσιακών μουσικών οργάνων σε home studio στην Αθήνα, με επαγγελματία αφηγητή. Με την ολοκλήρωση και

επεξεργασία του ηχητικού σχεδιασμού των αφηγήσεων έγινε και η τετραφωνική τους μίξη (Quad 4.0).

Η οπτικοποίηση των αφηγήσεων ήρθε σε δεύτερο χρόνο και δημιουργήθηκε σε συνεργασία με την εικαστικό Μαρία Χατζημηνά. Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις επισκέψεις στο γεωπάρκο για τα γυρίσματα, που έγιναν στις ίδιες τοποθεσίες που προηγήθηκαν οι ηχογραφήσεις πεδίου. Το μοντάζ έγινε έπειτα από προσεκτική μελέτη του ηχητικού σχεδιασμού κάθε αφήγησης και ερευνητικές καθοδηγήσεις.

Το τελικό στάδιο της δημιουργίας αφορούσε την κατασκευή της διάδρασης για τις αφηγήσεις και την ηχητική δραστηριότητα. Αρχικά, επιλέχθηκαν οι διαδραστικές πλακέτες TouchMe και Playtron της Playtronica ως midi ελεγκτές για να ενεργοποιούν ήχους μέσω του αγγίγματος στα ηλεκτραγώγιμα αντικείμενα. Τα ηχητικά δείγματα των διεπαφών σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να εναρμονίζονται με τους ήχους των αφηγήσεων. Το σύστημα συνδέθηκε με το λογισμικό Reaper, χρησιμοποιώντας midi mapping για την ενεργοποίηση ήχων ανάλογα με τις απτικές ενέργειες των χρηστών.

6. Αποτελέσματα

Οι θεματικές κατηγορίες που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων είναι οι εξής: η κατανόηση και ο σχολιασμός ιδιοτήτων του ηχητικού σχεδιασμού, η εξοικείωση με την ηχητική διάδραση και η συμμετοχή στη δημιουργία ηχητικής σύνθεσης.

Μετά την παρακολούθηση των αφηγήσεων, τα παιδιά έκαναν αυθόρμητα σχόλια σχετικά με τον ηχητικό σχεδιασμό, εκφράζοντας προτιμήσεις για συγκεκριμένους ήχους. Τα περισσότερα παιδιά έδειξαν ενδιαφέρον για τις επιλογές στον ήχο, με ορισμένα να ερμηνεύουν βαθύτερα τις ηχητικές συνδέσεις. Ένα παιδί, για παράδειγμα, ανέλυσε τον μυστήριο ήχο ενός καρχαρία, ενώ άλλα αναγνώρισαν τη δραματική και αρμονική φύση της μουσικής που συνόδευε τη θάλασσα. Παρατηρήθηκε επίσης η ανάπτυξη της ικανότητας εσωτερικής ακρόασης, με τα παιδιά να ανακαλούν ηχητικές στιγμές μετά το τέλος των αφηγήσεων. Σημαντική ήταν και η αντίληψη του περιφερικού ήχου από τα μικρότερα παιδιά, που εντυπωσιάστηκαν, ενώ τα μεγαλύτερα επικεντρώθηκαν περισσότερο στην ένταση και την ποιότητα του. Επιπλέον, αρκετά παιδιά αναγνώρισαν παραδοσιακά κρητικά όργανα και ήχους από ηχογραφήσεις πεδίου της ευρύτερης περιοχής τους. Οι παρατηρήσεις τους έδειξαν ιδιαίτερη κατανόηση, με ορισμένα να ταυτοποιούν ακόμη και συγκεκριμένες τοποθεσίες ηχογράφησης των φυσικών ήχων.

Τα περισσότερα παιδιά ενθουσιάστηκαν με την ύπαρξη της διάδρασης, αν και κάποια ένιωσαν αρχικά αμηχανία ή άγχος. Με την καθοδήγηση, τα παιδιά εξοικειώθηκαν με τη χρήση των αντικειμένων και άρχισαν να πειραματίζονται με τις πλακέτες Playtron και TouchMe. Τα μεγαλύτερα παιδιά κατανόησαν καλύτερα τις διαφορές στις πλακέτες και έδειξαν μεγαλύτερη περιέργεια, ενώ όλα προτίμησαν αντικείμενα που σχετίζονταν με υγρά στοιχεία. Σχεδόν όλα τα παιδιά εξέφρασαν τις ηχητικές τους προτιμήσεις και σχολίασαν την σύνδεση του ήχου των αντικειμένων με την αφήγηση. Μερικά συνέδεσαν τους ήχους των αντικειμένων της διάδρασης με συγκεκριμένα μουσικά όργανα, ενώ άλλα προβληματίστηκαν για την κυριολεκτική ή μεταφορική απόδοση των ήχων. Κάποια παιδιά προτίμησαν μια ελεύθερη ηχητική ερμηνεία των αντικειμένων, ενώ άλλα δυσκολεύτηκαν να κατανοήσουν τη

μεταφορική ηχητική απόδοση, προτιμώντας έναν πιο κυριολεκτικό ήχο, όπως το παράδειγμα ενός παιδιού που δεν βρήκε τον ήχο του καρχαρία ικανοποιητικό γιατί δεν ήταν ρεαλιστικός.

Μετά την αφήγηση ιστοριών, όλα τα παιδιά έδειξαν ενθουσιασμό για τη δημιουργία δικής τους ηχητικής σύνθεσης. Οι μεγαλύτεροι μαθητές προσέγγισαν πιο ενεργά τη διαδικασία, ενώ οι μικρότεροι, αν και συμμετείχαν, επηρεάστηκαν από κόπωση και εξωτερικούς παράγοντες. Οι συνθέσεις τους βασίστηκαν σε στοιχεία που τους εντυπωσίασαν από τις αφηγήσεις, όπως ήχοι και εικόνες, καθώς και σε αγαπημένους ήχους μεταξύ των αντικειμένων. Η εναλλακτική παρτιτούρα με καρτέλες διευκόλυνε τη σύνθεση, οδηγώντας σε πιο πολύπλοκες ηχητικές δομές. Τα παιδιά πειραματίστηκαν με τη ροή των ήχων, προσθέτοντας σταδιακά περισσότερα χαρακτηριστικά όπως συνηχήσεις, δυναμικές και παύσεις. Στα σχόλιά τους, εξέφρασαν ικανοποίηση για το αποτέλεσμα, με ορισμένα παιδιά να προτείνουν ακόμα και βελτιώσεις, αποδεικνύοντας τη σταδιακή εξέλιξή τους στην κατανόηση του ήχου ως υλικό σύνθεσης.

7. Συζήτηση

Η ανάλυση των δεδομένων της έρευνας έδειξε ότι τα παιδιά αναγνώρισαν σημαντικές ηχητικές ιδιότητες, συχνά συνδέονταν με τα φυσικά τοπία και τα ηχοτοπία των ιστοριών και σχολίαζαν δημιουργικά τις καλλιτεχνικές επιλογές του ηχητικού σχεδιασμού. Επίσης, διαχειρίστηκαν με ιδιαίτερη ευκολία τον ήχο ως υλικό σύνθεσης με τη βοήθεια της διάδρασης. Γενικότερα, οι μαθητές έδειξαν ικανότητα διευρυμένης αντίληψης και ευαισθητοποίησης στον ήχο μέσω των βιωματικών πολυμεσικών ερεθισμάτων. Η χρήση τεχνολογικών εργαλείων φάνηκε να συμβάλλει σημαντικά σε αυτή τη διαδικασία, παρέχοντας ευκαιρίες για μία δημιουργική ηχητική εκπαίδευση.

Ο κύριος προβληματισμός από τα ευρήματα της έρευνας που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης σε σχέση με τις αντιληπτικές ικανότητες των παιδιών ήταν η αδυναμία των μεγαλύτερων παιδιών να αντιληφθούν τον περιφερικό ήχο. Παρά τις καλές τους ικανότητες στην ηχητική αντίληψη και την προσεκτική ακρόαση, δεν έδωσαν ιδιαίτερη σημασία στη χωροθέτηση του ήχου.

Τέλος, αξιολογείται πως η εξέλιξη στο σκέλος της διάδρασης και της χωροθέτησης του ήχου θα αποφέρει στο project ακόμη πιο αποτελεσματικά οφέλη για την ηχητική ευαισθητοποίηση των παιδιών.

8. Αναφορές

- [1] Attali, J. *Θόρυβοι. Δοκίμιο Πολιτικής Οικονομίας της Μουσικής* Κέδρος, Αθήνα. (1991)
- [2] Sastre, J. & Cerda, J. & Garcia, W. & Hernandez, C.A. & Lloret, N. & Murillo, A. & Pico, D. & Serrano, J. E.& Scarani, S. & Dannenberg, R. B. «New Technologies for Music Education» in *Second International Conference on e-Learning and e-Technologies in Education*, (2013).
- [3] Rowe, V. & Triantafyllaki, A. & Pachet, F. *Children's Creative Music-Making with Reflexive Interactive Technology: Adventures in improvising and composing* Routledge (2016).

- [4] Bouchrika, I. *Digital Storytelling: Benefits, Examples, Tools & Tips* Research (2022)
- [5] Robin, B. R. «Digital Storytelling: A Powerful Technology Tool for the 21st Century Classroom» *Theory Into Practice* **47**, pp.220-228 (2008)
- [6] Walzer, D. A. «Digital Storytelling in Music and Audio Education: Inspiring Modern Reflective Practice with Relevant Technology» *TOPICS for Music Education Praxis* **3**, pp. 46-76 (2016)
- [7] Guarda, G. , & Rodrigues de Souza Fausto, I. & Garcia-Garcia, J. A. & Braz, R.M.M. «The Makey Makey Inclusive Tangible Interface and its Educational Perspectives» in *XXXIII Brazilian Symposium on Informatics in Education* (2022)
- [8] Zhao, H. & Narikbayeva, L. & Wu, Y. «Interactive systems for music composition: a new paradigm in music education» *Interactive Learning Environments* **30** (2022)
- [9] Jensenius, A. «An Action–Sound Approach to Teaching Interactive Music» *Organised Sound* **18**, pp. 178-189 (2013)
- [10] Patton, M. Q. *Qualitative Research and Evaluation Methods. Integrating Theory and Practise* Sage Publications, Inc. New York (2015).



A framework for organising audio-visual cross-modal correspondences for the Soundsketcher project

Konstantinos Giannos^{1,*}, Asterios Zacharakis¹, George Athanasopoulos² & Emilios Cambouropoulos¹

¹School of Music Studies, Aristotle University of Thessaloniki

²Humboldt-Universität zu Berlin

*giannosk@mus.auth.gr (υπεύθυνου)

ABSTRACT

The study of cross-modal correspondences, the systematic association between different sensory modalities, has steadily increased in recent years, with examples like the bouba-kiki effect illustrating these associations between shapes and sounds. Besides this concept, aural sonology explores how sound can be visually represented, particularly in the analysis of electro-acoustic music. In parallel, graphic score creation links visual elements with sounds, often relying on artistic intuition. The Soundsketcher project seeks to develop a tool for automatic music visualisation using established audio-visual correspondences, aiming to map musical characteristics like pitch, loudness, and timbre to visual features such as vertical position, size, angularity, and hue. The project will evaluate how well these mappings translate complex audio into graphic scores and their potential for artistic expression.

Πλαίσιο οργάνωσης οπτικο-ακουστικών αντιστοιχίσεων για το έργο Soundsketcher

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη των διαισθητηριακών αντιστοιχίσεων, δηλαδή της συστηματικής συσχέτισης μεταξύ διαφορετικών αισθητηριακών οδών, αναπτύσσεται σταθερά, με παραδείγματα όπως το φαινόμενο μπούμπα-κίκι που αναδεικνύει τη συσχέτιση σχημάτων με ήχους. Πέραν τούτου, η ακουστική ηχολογία ερευνά την οπτική αναπαράσταση του ήχου, ιδιαίτερα κατά την ανάλυση ηλεκτρακουστικής μουσικής. Παράλληλα, η δημιουργία γραφικών παρτιτούρων συνδυάζει οπτικά στοιχεία με ήχους, συχνά αξιοποιώντας καλλιτεχνικά κριτήρια. Το έργο Soundsketcher προσβλέπει στην ανάπτυξη ενός εργαλείου αυτόματης οπτικοποίησης της μουσικής βασισμένο σε καθιερωμένες οπτικο-ακουστικές αντιστοιχίσεις, επιδιώκοντας να χαρτογραφήσει μουσικά χαρακτηριστικά όπως το τονικό ύψος, την ένταση, ή τη χροιά σε οπτικά χαρακτηριστικά, όπως η κατακόρυφη θέση, το μέγεθος, η ύπαρξη γωνιών και η απόχρωση. Το εργαλείο θα αξιολογηθεί ως προς τη μετάφραση πιο περίπλοκων ήχων σε γραφική παρτιτούρα και το δυνητικό πλαίσιο καλλιτεχνικής έκφρασης.

Introduction

Over the last decades, there has been an increasing interest in cross-modal correspondences where attributes and features from different sensory modalities are systematically associated with each other. One famous example of such correspondence is the bouba-kiki, or maluma-takete effect. According to that, round and smooth objects tend to be matched with “bouba”, contrary to angular and rough objects that tend to be matched with “kiki” [1]. Associations between the auditory and the visual (i.e., spatial, geometrical, etc) extend beyond simple shapes and sound pairings, such as 2- or 3-dimensional visualisations, mental imagery [2], free-hand drawings [3-4], or gestural motion [5].

Building on this idea of translating sound into visual terms, the field of aural sonology specifically investigates how sound can be visually represented and analysed. In that domain, various systems have been developed to analyse and represent electro-acoustic music, enabling users to manually interact with the systems, such as ianalyse 5 [6] or Acousmographie [7].

In parallel to these analytical systems, graphic score creation is an artistic practice that similarly pairs visual elements with sounds, offering a guide to sound production or a visual analogy of auditory experiences. Such approaches often rely more on artistic intuition than on established cross-modal mappings. The Soundsketcher project seeks to create a prototype application for automatic music visualisation through graphic scores. One of the fundamental goals is to base mappings between sonic and visual structures on associations derived from existing knowledge of audio-visual correspondences. This study presents the currently identified cross-modal correspondences between musical or acoustic characteristics and visual properties as the framework that underpins Soundsketcher’s mappings.

1. Sound properties - Visual correspondences

1.1 Pitch

One of the most extensively studied cross-modal relationships is that between musical pitch—commonly represented by the fundamental frequency (F0)—and its visual counterparts. A key association in this relationship is *vertical elevation*: ‘high’ corresponds to high pitch and ‘low’ to low pitch (e.g., [8]), which is observed in many languages of the world [9-10] and is reflected in the Western music notation system. Additional findings have revealed that the *horizontal dimension* has been mapped onto pitch with ‘left’ corresponding to lower pitches and ‘right’ to higher pitches [5], which appears to be a comparatively weaker connection as it is found mainly in pianists [11]. *Size* is another visual attribute that has been related to pitch. Specifically, large objects have been linked to low pitches, while small objects to high pitches [12], with the association getting stronger with age [13]. Also, *thickness* is consistently mapped to low pitches and thinness to high pitches [14]. Finally, an association between *brightness* and pitch height has been observed in individual pitches, meaning that brighter colours correspond to higher pitches [15], as well as

ascending melodic motions correspond to bright colours and descending motions are mapped to darker colours [16].

1.2 Loudness

Besides pitch height, loudness is a percept accompanied by a long list of studied associations and has been modelled in various ways [17-18]. Regarding *spatial location*, louder sounds were found to be related to higher elevation [18], or horizontal movement [5]. Albeit both pitch and loudness have been associated with vertical elevation, in simultaneous alteration of both, the pitch association appears to be stronger than the loudness one [5]. Additionally, large objects are typically matched to louder sounds, while small objects are matched to quieter sounds [20]. Lastly, strong associations have been observed between loudness and *brightness* in adults [21] and infants [22].

1.3 Time

Visual representations of time in music notation tend to be influenced by culture and language. Written language is linear, and some possible directions are left-to-right (e.g., Latin, Greek, Cyrillic alphabets, etc.), right-to-left (e.g., Arabic, Hebrew), or top-to-bottom (e.g., Japanese kanji), thus, informing the way these populations may represent time [9]. For example, traditional Western musical notation is arranged linearly in a left-to-right fashion, whereas a portion of traditional Japanese musicians opted for vertical, top-to-bottom representations. At the same time, nonliterate participants largely unexposed to Western culture opted for iconic representations of sound without necessarily representing time [4], though line segment length had been found to be proportional to sound duration for multiple populations [9].

1.4 Timbre

Timbre is one of the least explored sound elements for its potential visual analogues. A handful of studies have examined the relationship between timbre and shape, where instruments producing soft sounds such as the piano or the cello were associated with rounded shapes and instruments such as crash cymbals were associated with angular shapes [23]. At the same time, listeners have linked auditory roughness with jagged and spiky 2- and 3-dimensional shapes [24-25].

Despite the scarcity of studies on direct timbral-visual associations, recent works have identified some salient semantic dimensions of timbre such as brightness, roughness or mass [26] and their various nuances [27-28]. Interestingly, most of these semantic concepts can be visually represented. However, timbre is considerably more complex to model perceptually compared to pitch and loudness. Identifying perceptually relevant timbre features is already a complex task, with the identification of semantically relevant ones posing an even greater challenge. Nevertheless, evidence on the acoustic correlates of semantic concepts continues to accumulate. For example, sound sources characterised by an energy distribution that is skewed towards higher partials [26], strong temporal modulations or prominent noisy components [29-31] are more likely to be described as rough. Similarly,

high-frequency components, usually quantified by the spectral centroid, are typically associated with higher auditory brightness (e.g., [32]. The concept of auditory mass is more elusive in acoustic terms, with some evidence suggesting a positive link with spectrotemporal variation and inharmonicity [26] or with loudness, spectral saturation and low registers [28]. Notably, the majority of these studies focus on isolated musical sounds, while mapping concurrent audio streams to graphic representations introduces an additional level of complexity. This challenge can be at least partially addressed through the advancing capabilities of AI-powered sound source separation applications for musical signals.

1.5 Tonality-Harmony

An increasing amount of research focuses on higher-level musical features such as tonality or harmony. Listeners regard the lack of functional tonal progressions reflected in diatonic modes as an element of dissonance and, in turn, map such musical stimuli to rough images of pixel noise [33]. Similarly, the dissonance of chords in musical excerpts is matched with both visual and tactile representations of roughness [34].

2. Visual mapping of Soundsketcher

2.1 Selecting a visual representation

Here, we propose a series of visual analogues to the auditory concepts reviewed to support the Soundsketcher system. Certainly, this task is far from trivial, and some overlaps may exist; for instance, Smalley [35] highlights the existence of noises with high pitch content or pitches with high noise content (e.g., whistling, breathy speech, screeching, etc.). Nonetheless, we opted for the following pairs acknowledging the empirical research regarding common cross-modal correspondences and the Western classical paradigm. As summarised in the table, pitch is assigned to vertical elevation, and time to the left-to-right direction. Duration is matched to length, and loudness is mapped to area/object size. Timbral concepts such as fullness, thickness, or density, have been theoretically connected to the spectral flux, inharmonicity and loudness, possibly extending the idea of size to solidness/hollowness. Regarding other prominent timbral semantics, roughness can be mapped to angularity and brightness to hue and/or colour. In the figure below, it is demonstrated how a rectangle/line segment is manipulated along these visual aspects to convert audio samples into a computer-generated graphic score. Acknowledging the cultural and artistic dimensions of these correspondences, users will be free to choose the correspondences of their preference.

Table 2.1 Proposed visual concepts as analogues to auditory/acoustic concepts

Auditory concept	Acoustic feature	Visual concept
pitch	F0	elevation
loudness	loudness models	object size/elevation

time direction	-	left-to-right
duration	onset detection, segmentation	length
roughness	modulation power spectrum, harmonic to noise ratio	angularity
brightness	spectral centroid	hue/colour, brightness
thickness	spectral flux, inharmonicity, loudness	thickness



Figure 2.1 Screenshot of the Soundsketcher system displaying a graphic representation of an audio file

2.2 Evaluation

The initial application of the mappings as they appear in Figure 2.1, will be tested in simpler case studies. The rising gestures can be interpreted as rising tones, the larger objects as louder, the shapes with more angles as sonically rougher and so on. Starting from simple audio samples where certain audio features (e.g., pitch and loudness) alter distinctly, we plan to assess whether users will understand the graphic score as a translation of the audio and if alternative correspondences are preferred. Subsequently, more complex examples involving combinatory alterations of acoustic features will be introduced. Furthermore, this way we aim to examine if other types of representations are useful, considering prescriptive aspects such as the origin of a sound or the necessary action to produce it. In addition, we expect to explore whether these correspondences are restrictive or not in artistic endeavours and how the generated graphic scores are open to interpretations. Later, more complex audio with diverse timbral characteristics and simultaneously changing audio features will be investigated, along with how this complexity is reflected in the multivariate manipulations of the visual features.

3. Conclusion

In conclusion, this paper presents the foundation of the Soundsketcher system's graphic score generation by proposing mappings between sound characteristics such as pitch, loudness, and timbre to visual properties like vertical elevation, size, and shape. The proposed correspondences are informed by empirical research, while also allowing flexibility for users to reflect their individual preferences. The evaluation phase will further investigate the clarity and interpretability of these mappings, particularly in more complex auditory scenarios. Ultimately, Soundsketcher aims to purposefully combine the auditory and visual experiences, enhancing both artistic creativity and music interpretation.

4. Acknowledgement

This project is carried out within the framework of the National Recovery and Resilience Plan Greece 2.0, funded by the European Union – NextGenerationEU (Implementation body: HFRI).

5. References

- [1] V. S. Ramachandran and E. M. Hubbard, "Psychophysical investigations into the neural basis of synaesthesia," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, **268**(1470), pp. 979–983, (2001). doi:10.1098/rspb.2000.1576
- [2] Z. Eitan and R. Y. Granot, "How music moves," *Music Perception*, **23**(3), pp. 221–248, (2006). doi:10.1525/mp.2006.23.3.221
- [3] L. Engeln and R. Groh, "Coherence of audible shapes—a qualitative user study for coherent visual audio design with resynthesized shapes," *Personal and Ubiquitous Computing*, **25**(4), pp. 651–661, (2020). doi:10.1007/s00779-020-01392-5
- [4] G. Athanasopoulos and N. Moran, "Cross-cultural representations of musical shape," *Empirical Musicology Review*, pp. 185–199, (2013). doi:10.18061/emr.v8i3-4.3940
- [5] M. B. Küssner, D. Tidhar, H. M. Prior, and D. Leech-Wilkinson, "Musicians are more consistent: Gestural cross-modal mappings of Pitch, Loudness and tempo in real-time," *Frontiers in Psychology*, **5**, (2014). doi:10.3389/fpsyg.2014.00789
- [6] P. Couprie, "EAnalysis: Developing a sound-based music analytical tool," *Expanding the Horizon of Electroacoustic Music Analysis*, pp. 170–194, (2016). doi:10.1017/cbo9781316339633.009
- [7] Y. Geslin and A. Lefèvre. Sound and musical representation: the Acousmographie software. In *Proceedings in International Conference on Mathematics and Computing (ICMC2004), San Francisco, California, USA*. (2004).
- [8] K. Uno and K. Yokosawa, "Cross-modal correspondence between Auditory Pitch and visual elevation modulates audiovisual temporal recalibration," *Scientific Reports*, **12**(1), Dec. 2022. doi:10.1038/s41598-022-25614-3
- [9] G. Athanasopoulos, S.-L. Tan, and N. Moran, "Influence of literacy on representation of time in musical stimuli: An exploratory cross-cultural study in the

UK, Japan, and Papua New Guinea,” *Psychology of Music*, **44**(5), pp. 1126–1144, (2016). doi:10.1177/0305735615613427

[10] E. Rusconi, B. Kwan, B. Giordano, C. Umiltà, and B. Butterworth, “Spatial representation of pitch height: The SMARC effect,” *Cognition*, **99**(2), pp. 113–129, (2006). doi:10.1016/j.cognition.2005.01.004

[11] L. Stewart, V. Walsh, and U. Frith, “Reading music modifies spatial mapping in pianists,” *Perception & Psychophysics*, **66**(2), pp. 183–195, (2004). doi:10.3758/bf03194871

[12] L. J. Speed, I. Croijmans, S. Dolscheid, and A. Majid, “Crossmodal associations with olfactory, auditory, and tactile stimuli in children and adults,” *i-Perception*, **12**(6), (2021). doi:10.1177/20416695211048513

[13] L. F. Cuturi, A. Tonelli, G. Cappagli, and M. Gori, “Coarse to fine audio-visual size correspondences develop during primary school age,” *Frontiers in Psychology*, **10**, (2019). doi:10.3389/fpsyg.2019.02068

[14] S. Dolscheid, S. Shayan, A. Majid, and D. Casasanto, “The thickness of musical pitch,” *Psychological Science*, **24**(5), pp. 613–621, (2013). doi:10.1177/0956797612457374

[15] J. Ward, B. Huckstep, and E. Tsakanikos, “Sound-colour synaesthesia: To what extent does it use cross-modal mechanisms common to us all?,” *Cortex*, **42**(2), pp. 264–280, (2006). doi:10.1016/s0010-9452(08)70352-6

[16] W. G. Collier and T. L. Hubbard, “Judgments of happiness, brightness, speed and tempo change of auditory stimuli varying in pitch and tempo,” *Psychomusicology: A Journal of Research in Music Cognition*, **17**(1–2), pp. 36–55, (1998). doi:10.1037/h0094060

[17] P. Boersma and D. Weenink. Praat: doing phonetics by computer. Version 5.3.15. (2012).

[18] B. R. Glasberg and B. C. Moore. A model of loudness applicable to time-varying sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, **50**(5), 331–342. (2002).

[19] D. Kohn and Z. Eitan. Seeing Sound Moving: Congruence of Pitch and Loudness with Human Movement. In *12th International Conference on Music Perception and Cognition/8th Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music*. Thessaloniki: The School of Music Studies, Aristotle University of Thessaloniki, p. 541 (2012).

[20] Z. Eitan. How pitch and loudness shape musical space and motion: New findings and persisting questions. In *The psychology of music in multimedia*, edited by S.-L. Tan, A. Cohen, S. Lipscomb, and R. Kendall, pp. 161–187. Oxford: Oxford University Press. (2013).

[21] L. E. Marks, “On cross-modal similarity: Auditory-visual interactions in speeded discrimination,” *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **13**(3), pp. 384–394, (1987). doi:10.1037//0096-1523.13.3.384

[22] D. J. Lewkowicz and G. Turkewitz, “Cross-modal equivalence in early infancy: Auditory–visual intensity matching,” *Developmental Psychology*, **16**(6), pp. 597–607, (1980). doi:10.1037/0012-1649.16.6.597

[23] M. Adeli, J. Rouat, and S. Molotchnikoff, “Audiovisual correspondence between musical timbre and visual shapes,” *Frontiers in Human Neuroscience*, **8**, (2014). doi:10.3389/fnhum.2014.00352

- [24] K. Liew, S. J. Styles, and P. Lindborg, Dissonance and roughness in cross-modal perception. In *Proceedings of the 6th Conference of the Asia Pacific Society for the Cognitive Sciences of Music*. (2017).
- [25] K. Liew, P. Lindborg, R. Rodrigues, and S. J. Styles, “Cross-modal perception of noise-in-music: Audiences generate spiky shapes in response to auditory roughness in a novel electroacoustic concert setting,” *Frontiers in Psychology*, **9**, (2018). doi:10.3389/fpsyg.2018.00178
- [26] A. Zacharakis, K. Pasiadis, and J. D. Reiss, “An interlanguage study of musical timbre semantic dimensions and their acoustic correlates,” *Music Perception*, **31**(4), pp. 339–358, (2014). doi:10.1525/mp.2014.31.4.339
- [27] L. Reymore, “Characterizing prototypical musical instrument timbres with timbre trait profiles,” *Musicae Scientiae*, **26**(3), pp. 648–674, (2021). doi:10.1177/10298649211001523
- [28] J. Noble, E. Thoret, M. Henry, and S. McAdams, “Semantic dimensions of sound mass music,” *Music Perception*, **38**(2), pp. 214–242, (2020). doi:10.1525/mp.2020.38.2.214
- [29] J. Rozé, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet, and S. Ystad, “Exploring the perceived harshness of cello sounds by morphing and synthesis techniques,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, **141**(3), pp. 2121–2136, (2017). doi:10.1121/1.4978522
- [30] L. Reymore, E. Beauvais-Lacasse, B. K. Smith, and S. McAdams, “Modeling noise-related timbre semantic categories of orchestral instrument sounds with audio features, pitch register, and Instrument Family,” *Frontiers in Psychology*, **13**, (2022). doi:10.3389/fpsyg.2022.796422
- [31] V. Rosi, P. Arias Sarah, O. Houix, N. Misdariis, and P. Susini, “Shared mental representations underlie metaphorical sound concepts,” *Scientific Reports*, **13**(1), (2023). doi:10.1038/s41598-023-32214-2
- [32] A. Almeida, E. Schubert, J. Smith, and J. Wolfe, “Brightness scaling of periodic tones,” *Attention, Perception, & Psychophysics*, **79**(7), pp. 1892–1896, (2017). doi:10.3758/s13414-017-1394-6
- [33] K. Giannos, G. Athanasopoulos, and E. Cambouropoulos, “Cross-modal associations between Harmonic Dissonance and visual roughness,” *Music & Science*, **4**, (2021). doi:10.1177/20592043211055484
- [34] K. Giannos, G. Athanasopoulos, and M. Küssner. Cross-modal associations between auditory and tactile roughness across Western and non-Western harmonisations. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*. (in press).
- [35] D. Smalley, “Spectromorphology: Explaining sound-shapes,” *Organised Sound*, **2**(2), pp. 107–126, (1997). doi:10.1017/s1355771897009059



Ακουστο-απτική διέγερση και αισθησιοκινητικός συγχρονισμός: μία μουσική διδακτική παρέμβαση

Παπαδόγιαννη-Κουραντή Μάρθα ^{1,*}, Μπακογιάννης Κωνσταντίνος¹,
Αναγνωστοπούλου Χριστίνα¹, Ανδρεοπούλου Αρετή ¹

¹Τμήμα Μουσικών Σπουδών Φιλοσοφικής Σχολής ΕΚΠΑ
*marthapapadogianni@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα εξετάζει τις πιθανές επιδράσεις μίας διτροπικής παρέμβασης που ενσωματώνει την απτική διέγερση στη μουσική διδασκαλία. Υποθέτοντας ότι η εφαρμογή των πρόσθετων μουσικών δονήσεων δύναται να ενισχύει την ικανότητα συγχρονισμού των παιδιών, αξιολογείται ποσοτικά η αισθησιοκινητική ικανότητά τους να ακολουθούν μετρονομικούς παλμούς. Στην έρευνα συμμετείχαν 60 παιδιά δημοτικού, ηλικίας 8 έως 10 ετών, τα οποία μοιράστηκαν σε μία πειραματική ομάδα και μία ομάδα ελέγχου. Το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζει στην σύγκριση της αισθησιοκινητικής απόδοσης των παιδιών. Παράλληλα, εξετάζεται η ακρίβεια και η ταχύτητα του συγχρονισμού των παιδιών σε σχέση με την ηλικία τους. Τα αρχικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η απτική διέγερση δεν επηρέασε σημαντικά την ικανότητα συγχρονισμού. Η ηλικία φαίνεται να επιδρά σημαντικά, με τα μεγαλύτερα παιδιά να εμφανίζουν υψηλότερη ακρίβεια και συνέπεια σε όλες τις δοκιμασίες.

Auditory-tactile stimulation and sensorimotor synchronization: an educational music intervention

ABSTRACT

The present study focuses on the possible impacts of a bimodal music training intervention, by integrating tactile stimulation in the music class, hypothesizing that sound vibrations would affect positively the sensorimotor synchronization capacity of children. In order to examine this effect, all children completed a kinesthetic assessment tool in which they should synchronize their drumming with metronomic clicks. Sixty children between 8 and 10 years old were recruited from a primary school in Athens, divided into one control- and one experimental group. Research focused on the synchronization performances between groups, as well as on synchronization accuracy and speed, controlling for age effects. The preliminary results showed non significant effects of the intervention on children's synchronization performance. On the other hand, age was a significant factor. Older children presented significantly greater accuracy and consistency in all tasks.

Εισαγωγή

Το μουσικό βίωμα είναι από την φύση του πολυαισθητηριακό, ενεργοποιώντας διαφορετικά συστήματα, όπως το ακουστικό και το σωματοαισθητικό [1]. Οι ηχητικές πληροφορίες που λαμβάνει το ανθρώπινο σώμα συνοδεύονται από δονήσεις, επηρεάζοντας την αντίληψη ποικίλων χαρακτηριστικών του ήχου, όπως η ένταση, η συχνότητα και η διάρκεια [2]. Ο ανθρώπινος οργανισμός αντιδρά αυθόρμητα στα ηχητικά ερεθίσματα που χαρακτηρίζονται από έναν εγγενή παλμό. Η αντίδραση αυτή προσδιορίζεται με τον όρο *αισθησιοκινητικός συγχρονισμός*, και περιγράφει την ικανότητά μας να συντονίζουμε την κίνησή μας με τον παλμό ενός ηχητικού ερεθίσματος [3]. Η παλμική κίνηση μπορεί να είναι κίνηση ενός δακτύλου, το χτύπημα της παλάμης, χτύπημα με μπαγκέτα ή ακόμη και συγχρονισμός των κάτω άκρων. Η σωματική αντίδραση ενεργοποιείται με τη συμμετοχή ακουστικών και κινητικών περιοχών που βρίσκονται στον σωματοαισθητικό εγκεφαλικό φλοιό και αλληλεπιδρούν [4]. Ενώ μέχρι την ηλικία των 7 ετών τα περισσότερα παιδιά μπορούν να αντιληφθούν τον παλμό ενός ηχητικού ερεθίσματος στο επίπεδο ενός ενήλικα χωρίς μουσική εκπαίδευση, ο αισθησιοκινητικός συγχρονισμός, περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα κινητικών δεξιοτήτων που παρουσιάζουν διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης. Η αισθησιοκινητική ικανότητα συνεχίζει να αναπτύσσεται μέχρι και την ηλικία των 12 ετών όπου, δίχως μουσική εμπειρία ή εκπαίδευση, η ατομική απόδοση διατηρείται στην ενήλικη ζωή μας ([5],[6],[7]).

Με αφετηρία τις πολυτροπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακουστικών και απτικών ερεθισμάτων και τη συμμετοχή του ακουστικού και σωματοαισθητικού φλοιού όπου εντοπίζονται και κινητικές περιοχές, η παρούσα έρευνα εξετάζει τις πιθανές επιδράσεις μίας διτροπικής μουσικής παρέμβασης, στην αισθησιοκινητική και άρρηκτα συνδεδεμένη με την αντίληψη του παλμού σωματική μας αντίδραση να ακολουθούμε τον παλμό που “νιώθουμε” [8]. Η έρευνα επικεντρώνεται στην ικανότητα συγχρονισμού με χτύπημα μπαγκέτας, καθώς προηγούμενες έρευνες μελετούν κυρίως χτύπημα του δείκτη ή κίνηση ολόκληρου του σώματος [9].

1. Μεθοδολογία

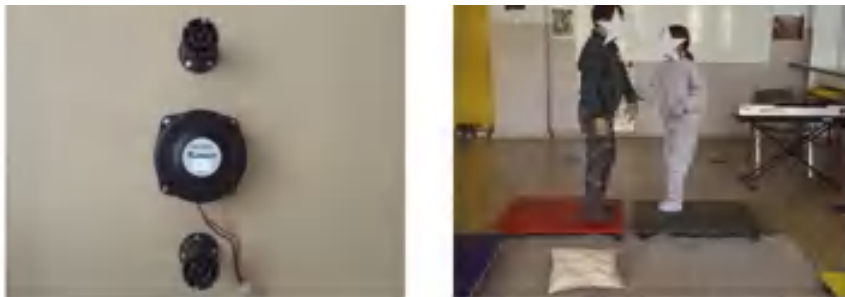
Η παρούσα μελέτη αποτελεί μέρος μίας μεγαλύτερης έρευνας που σχεδιάστηκε με πρότυπο τη μεθοδολογία της έρευνας μεικτών μεθόδων, συνδέοντας ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα. Στην έρευνα συμμετείχαν 60 παιδιά, 8 έως 10 ετών, από δημοτικό σχολείο της Αθήνας. Το σύνολο των παιδιών κατανεμήθηκε σε μία πειραματική ομάδα και μία ομάδα ελέγχου, ακολουθώντας τη μέθοδο 2-group-Control-group design. Σκοπός της έρευνας ήταν να εξετάσει αν η πειραματική ομάδα παρουσίασε μεγαλύτερη βελτίωση απόδοσης σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου. Εδώ παρουσιάζονται ποσοτικά δεδομένα τα οποία αντλήθηκαν από την αξιολόγηση της ικανότητας συγχρονισμού των παιδιών. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές ορίζονται η παρέμβαση (με/χωρίς δονήσεις) και η ηλικία και ως εξαρτημένη μεταβλητή οι κιναισθητικές επιδόσεις των παιδιών. Τα παιδιά ολοκλήρωσαν τη δοκιμασία τρεις φορές: πριν την παρέμβαση, στη διάρκειά της και στο τέλος της έρευνας.

1.1 Διδακτική παρέμβαση

Η διδακτική προσέγγιση επικεντρώθηκε στην αντίληψη του παλμού και τον αισθησιοκινητικό συγχρονισμό, ενώ παράλληλα ολοκληρώθηκε και ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, όπως ακουστικές ασκήσεις, κρουστά σώματος, τραγούδι, αφήγηση ιστοριών, αυτοσχεδιασμός, μουσική επιτέλεση και μουσικά παιχνίδια. Η παρέμβαση ακολούθησε έναν κορμό δεκαέξι διδακτικών ωρών (45λεπτά) που ομαδοποιήθηκαν σε δύο περιόδους (8+8) μουσικής εκπαίδευσης.

1.2 Πειραματικό σύστημα

Για τη μεταφορά των απτικών ερεθισμάτων κατασκευάστηκε ένα σύστημα με τη μορφή πατώματος [10], το οποίο τοποθετήθηκε στην τάξη της Μουσικής Αγωγής. Το πάτωμα αποτελείται από ένα σύνολο επιφανειών μοριοσανίδας, οι οποίες λειτουργήσαν και ως καθίσματα. Κάτω από κάθε επιφάνεια εφάπτεται μία συσκευή μεταφοράς χαμηλών συχνοτήτων (Body Shaker Rockwood BS 301-L, 4 Ω) με μέγιστη απόκριση στο εύρος 5-100 Hz [Σχήμα 1.1]. Κάποια ηχητικά παραδείγματα επεξεργάζονταν real-time μέσω ανοιχτών λογισμικών (Reaper, Pure Data), ενώ άλλα δημιουργήθηκαν με τα ίδια προγράμματα πριν την έναρξη της έρευνας.



Σχήμα 1.1 (α)εφαπτόμενη συσκευή μεταφοράς χαμηλών συχνοτήτων, (β) επιφάνειες πειραματικού συστήματος

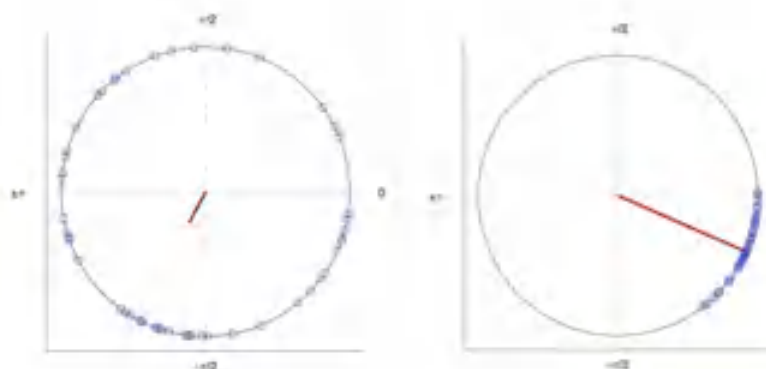
1.3 Πειραματική διαδικασία

Το κιναισθητικό μέρος διαρκεί 15 λεπτά και εξετάζει την ικανότητα συγχρονισμού των παιδιών σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: μετρονόμο και μουσικά αποσπάσματα με απλό ή μικό μέτρο. Η δοκιμασία αξιολόγησης της ικανότητας συγχρονισμού που επιλέχθηκε είναι το κιναισθητικό μέρος του εργαλείου Complex Beat Alignment Tapping Test – cBATT [11]. Όλα τα παιδιά ολοκλήρωσαν το πείραμα ατομικά, χτυπώντας με μία μπαγκέτα σε ένα ηλεκτρονικό τύμπανο (Percpad Alesis). Τα χτυπήματα της μπαγκέτας ηχογραφούνταν ως MIDI αρχεία μέσω του Reaper v6.0. Αρχικά, κλήθηκαν να χτυπήσουν έναν αυθόρμητο, σταθερό παλμό (χωρίς εξωτερικό ερέθισμα) για 30 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια,

εμφανίζονταν με τυχαία σειρά τρεις διαφορετικοί μετρονόμοι 80 BPM, 100 BPM και 120 BPM και τα παιδιά έπρεπε να ακολουθήσουν τον εκάστοτε παλμό. Κάθε μετρονομικός κύκλος είχε διάρκεια 20ms, και τα παιδιά όριζαν την έντασή τους.

2. Αποτελέσματα

Στο πρώτο στάδιο ανάλυσης των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η μεταβλητότητα στα δεδομένα συγχρονισμού ήταν μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, κάποια παιδιά έδιναν πολλαπλά χτυπήματα ανάμεσα σε δύο παλμούς αναφοράς και υπήρξαν περιπτώσεις που το χτύπημα απουσίαζε. Ενώ ζητήθηκε να ακολουθήσουν ως βάση τη μονάδα χρόνου του τετάρτου, πολλά παιδιά χτυπούσαν όγδοα, παραβιάζοντας την σχέση 1:1 με τον μετρονόμο. Οι διαφορές αυτές οδήγησαν στην αναζήτηση μίας εναλλακτικής στατιστικής. Σε έρευνες φαινομένων, όπου τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από μία περιοδικότητα, οι μέθοδοι κυκλικής στατιστικής προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης και ερμηνείας αποτελεσμάτων που μπορεί να χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ακρίβεια ή ασυνέπεια στην ικανότητα συγχρονισμού ([11],[12]). Για την κυκλική ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη CircStat του λογισμικού MATLAB [12]. Κάθε απόκριση της μπαγκέτας παρουσιάζεται σαν σημείο στην περιφέρεια ενός μοναδιαίου κύκλου με αριστερόστροφη φορά. Σε κάθε χτύπημα αντιστοιχεί ένα μέσο διάνυσμα, που περιγράφεται από το μήκος διανύσματος R και τη γωνία θ . Το μήκος R κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 και είναι δείκτης συνέπειας και συνοχής των χτυπημάτων. Η γωνία θ προσδιορίζει την ακρίβεια συγχρονισμού και το κατά πόσον το χτύπημα έγινε πριν (+) ή μετά (-) τον παλμό αναφοράς (Σχήμα 2.1).

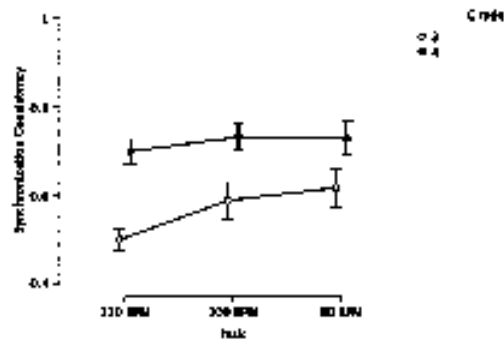


Σχήμα 2.1 Ελλιπής ($R \approx 0$) και υψηλή ($R \approx 1$) ικανότητα συγχρονισμού

2.1 Συγχρονισμός στον παλμό

Η μέση απόδοση συγχρονισμού αξιολογήθηκε εξαρτώμενη από τον τύπο παρέμβασης (με/χωρίς δονήσεις) και την ηλικία των παιδιών. Ο σχεδιασμός ακολούθησε τη μεθοδολογία σύγκρισης των μέσων με ανάλυση διακύμανσης κατά δύο κριτήρια (two-way ANOVA), τον τύπο παρέμβασης και την ηλικία. Ο τύπος

παρέμβασης δεν είχε σημαντική επίδραση στην συνολική επίδοση των παιδιών. Ωστόσο, η ανάλυση έδειξε ότι η ηλικία ήταν στατιστικά σημαντικός παράγοντας επιρροής στην ικανότητα συγχρονισμού και το μέγεθος της επίδρασης ήταν υψηλό (Σχήμα 2.2).



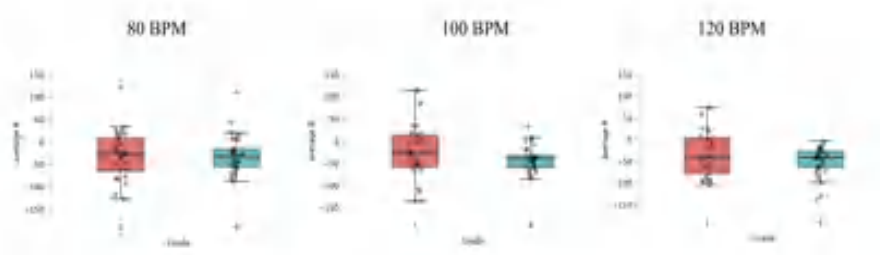
Σχήμα 2.2 Μέσες τιμές της συνέπειας και συνοχής στον παλμό (mean vector R) για κάθε ηλικιακή ομάδα στους 3 διαφορετικούς μετρονόμους

Τα μεγαλύτερης ηλικίας παιδιά (9-10 ετών) παρουσίασαν υψηλότερη ακρίβεια συγχρονισμού και η συνοχή των χτυπημάτων της μπαγκέτας ήταν μεγαλύτερη (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1 Ανάλυση Διακύμανσης Μέσης Απόδοσης Συγχρονισμού με ανεξάρτητους παράγοντες ηλικία και τύπο παρέμβασης

Tempo BPM	μέτρηση	<i>F</i>	<i>p</i>	η^2
120	πρώτη	5.31	0.03	0.19
	δεύτερη	24.28	<.001	0.41
	τρίτη	4.22	0.05	0.09
100	πρώτη	5.83	0.02	0.23
	δεύτερη	4.1	0.05	0.14
	τρίτη	7.64	0.01	0.16
80	πρώτη	3.02	0.09	0.11
	δεύτερη	11.95	<.001	0.24
	τρίτη	15.66	<.001	0.29

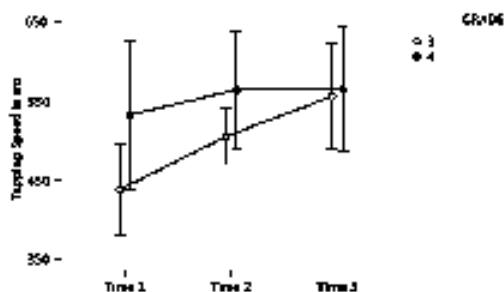
Οι τιμές για τη διανυσματική γωνία θ χαρακτηρίζονται από έντονη διαφοροποίηση, παρουσιάζοντας μία τάση τα παιδιά να χτυπούν μετά την ακρόαση των μετρονομικών κλικς. Προκειμένου να συγκριθούν οι μέσες τιμές θ διεξήχθησαν ανεξάρτητες αναλύσεις διακύμανσης κυκλικών δεδομένων (circular ANOVAs). Η ανάλυση δεν έδειξε σημαντικές επιδράσεις του τύπου παρέμβασης και της ηλικίας στην ακρίβεια συγχρονισμού. Επιπλέον δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών.



Σχήμα 2.3 Μέσες τιμές της ακρίβειας συγχρονισμού θ για κάθε ηλικιακή ομάδα στους 3 διαφορετικούς μετρονόμους

2.2 Συσχέτιση αυθόρμητου παλμού και απόδοσης συγχρονισμού

Στο μέρος του αυθόρμητου χτυπήματος απουσίαζε κάποιο ακουστικό ερέθισμα. Για την αξιολόγηση των δεδομένων υιοθετήθηκε ένα σχέδιο γραμμικής ανάλυσης, όπως περιγράφεται στο [13]. Η συνέπεια και η μεταβλητότητα των χτυπημάτων των παιδιών ήταν παρόμοια, ανεξάρτητα από την ηλικία και την ερευνητική παρέμβαση.



Σχήμα 2.4 Μέσες τιμές της ταχύτητας του αυθόρμητου παλμικού χτυπήματος των παιδιών για κάθε ηλικιακή ομάδα στις 3 διαφορετικές μετρήσεις

Συνολικά, η ταχύτητα απόδοσης των μεγαλύτερων παιδιών ήταν πιο αργή (555.33 ms/108 BPM) σε σύγκριση με την ταχύτητα των παιδιών μικρότερης ηλικίας (500.6 ms /120 BPM). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με παλαιότερα ευρήματα, που υποστηρίζουν ότι η ταχύτητα του αυθόρμητου χτυπήματος τείνει να μειώνεται όσο αυξάνεται η ηλικία [11].

3. Επίλογος

Το παρόν πείραμα διερεύνησε την ικανότητα συγχρονισμού παιδιών 8 έως 10 ετών, εστιάζοντας στην ακρίβεια και την συνέπεια των χτυπημάτων τους σε σχέση με τρία εξωτερικά ακουστικά ερεθίσματα μετρονομικών παλμών. Η βασική υπόθεση ότι η απτική διέγερση θα βελτιώσει σημαντικά περισσότερο την αισθησιοκινητική ικανότητα των παιδιών της πειραματικής ομάδας δεν επιβεβαιώθηκε. Η ανάλυση των δεδομένων, έδειξε η πλειοψηφία των παιδιών δεν χτυπούσε τυχαία, ωστόσο η μεταβλητότητα των χτυπημάτων ήταν πολύ μεγάλη αναχαιτίζοντας τη γενικεύση των αποτελεσμάτων. Τα ευρήματα αυτά ενισχύουν την άποψη ότι ενώ ήδη από την ηλικία των 7 ετών η αντίληψη του παλμού έχει αναπτυχθεί στο υψηλότερο επίπεδο, οι αισθησιοκινητικές δεξιότητες συγχρονισμού εξελίσσονται προοδευτικά μέχρι την ηλικία των 12 ετών [15]. Η παρέμβαση δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση στην ακρίβεια και την συνέπεια συγχρονισμού, καθώς τα παιδιά και από τις δύο ερευνητικές ομάδες εμφάνισαν κοινή πρόοδο στη μέση απόδοσή τους. Η βελτίωση στην απόδοση μπορεί να αποδοθεί στη διδακτική προσέγγιση, επικυρώνοντας ευρήματα ότι μουσικές δεξιότητες σχετικές με τον χρόνο ωφελούνται από μουσικές δραστηριότητες που εστιάζουν στον παλμό ([5], [14],[15],[16]). Μελλοντικά, θα ήταν σημαντικό να συμμετάσχει μία τρίτη ομάδα ελέγχου που θα ολοκληρώσει μία διαφορετική διδακτική προσέγγιση. Επιπλέον η ικανότητα συγχρονισμού μπορεί να αξιολογηθεί με περισσότερα ηχητικά παραδείγματα, τόσο σε επίδεδο μετρονομικών παλμών, όσο και με μουσικά αποσπάσματα. Καθώς η σωματική κίνηση επηρεάζει την αντίληψη του παλμού, στο παρόν πείραμα τα παιδιά κλήθηκαν να είναι καθιστά και να συγχρονίζονται μόνο με την κίνηση της μπαγκέτας. Η εστίαση σε διαφορετικές σωματικές κινήσεις θα μπορούσε να υποστηρίξει την βαθύτερη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων που διέπουν τις αισθήσεις της ακοής και της αφής.

Η συγκεκριμένη μελέτη παρείχε αρχικά στοιχεία για την ικανότητα συγχρονισμού στην παιδική ηλικία. Προτείνει την ενσωμάτωση πολυαισθητηριακών προσεγγίσεων στη μουσική εκπαίδευση σε τυπικά και άτυπα εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, ώστε, στο δεδομένο μαθησιακό πλαίσιο, να ενισχύεται η αντίληψη βασικών μουσικών χαρακτηριστικών και η ανάπτυξη διαφορετικών αισθησιοκινητικών δεξιοτήτων.

4. Αναφορές

[1] Merchel, S., & Altinsoy, M. E., Psychophysical comparison of the auditory and tactile perception: A survey. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 14(3), 271–283, (2020)

- [2] Giordano, M., Sullivan, J., & Wanderley, M. M., Design of Vibrotactile Feedback and Stimulation for Music Performance. In S. Papetti & C. Saitis (Eds.), *Musical Haptics* (pp. 193–214). Springer International Publishing, (2018).
- [3] Calling, L., Noble, H., & Goswami, U., Neural entrainment and sensorimotor synchronization to the beat in children with developmental dyslexia: an EEG study. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 360, (2017).
- [4] Nozaradan, S., Peretz, I., & Mouraux, A. (2012). Selective Neuronal Entrainment to the Beat and Meter Embedded in a Musical Rhythm. *Journal of Neuroscience*, 32(49), 17572–17581, (2012)
- [5] Gauthier, D. and Dunn, R.E., Comparing Two Approaches for Teaching Rhythm Reading Skills to First-Grade Children: A Pilot Study, *Research & Issues in Music Education*: Vol.2, No.1, Article4, (2004).
- [6] Repp, B. H., & Su, Y.-H., Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403–452, (2013).
- [7] Tierney, A. T., & Kraus, N., The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language*, 124(3), 225–231, (2013).
- [8] Novich, S. D., & Eagleman, D. M., Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin’s achievable throughput. *Experimental Brain Research*, 233(10), 2777–2788, (2015).
- [9] Repp, B., Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 969–992, (2006b).
- [10] Miura, S., & Sugimoto, M., T-RHYTHM: A System for Supporting Rhythm Learning by Using Tactile Devices. *IEEE International Workshop on Wireless and Mobile Technologies in Education (WMTE'05)*, 264–268, (2005)
- [11] Einarson, K. M., & Trainor, L. J., The Effect of Visual Information on Young Children’s Perceptual Sensitivity to Musical Beat Alignment. *Timing & Time Perception*, 3(1–2), 88–101, (2015).
- [12] Berens, P. CircStat: A *MATLAB* Toolbox for Circular Statistics. *Journal of Statistical Software*, 31(10), (2009).
- [13] Launay, J., Grube, M., & Stewart, L. Dysrhythmia: A specific congenital rhythm perception deficit. *Frontiers in Psychology*, 5, 18, (2014).
- [14] Matthews, T. E., Thibodeau, J. N. L., Gunther, B. P., & Penhune, V. B. (2016). The Impact of Instrument-Specific Musical Training on Rhythm Perception and Production. *Frontiers in Psychology*, 7, 69, (2016)
- [15] Gooding, L., & Standley, J. M., Musical Development and Learning Characteristics of Students: A Compilation of Key Points From the Research Literature Organized by Age. *Update: Applications of Research in Music Education*, (2011)
- [16] Slater, J., Tierney, A., & Kraus, N., At-Risk Elementary School Children with One Year of Classroom Music Instruction Are Better at Keeping a Beat. *PLoS ONE*, 8(10), (2013).



**Κατευθυντικότητα των ελληνικών φωνηέντων στο
τραγούδι βάσει συχνότητων φωνοσυντονισμού: Μελέτη
περίπτωσης κλασικού τραγουδιού και Βυζαντινής
ψαλτικής**

Γιώργος Δεδούσης^{1,*}, Κωνσταντίνος Μπακογιάννης², Αρετή Ανδρεοπούλου³,
Αναστασία Γεωργάκη⁴

^{1,2,3,4}Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT),
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
*gdedousis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας της φωνής επηρεάζονται από παράγοντες όπως το άνοιγμα του στόματος και το σχήμα της φωνητικής οδού, που επηρεάζουν και τις συχνότητες φωνοσυντονισμών. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει προκαταρκτικά ευρήματα ως προς τη σχέση της κατευθυντικότητας με τις συχνότητες φωνοσυντονισμών στην ελληνική άδουσα φωνή. Τα ελληνικά φωνήεντα τραγουδήθηκαν σε διάφορα τονικά ύψη από τέσσερις επαγγελματίες τραγουδιστές, δύο κλασικούς και δύο ψαλτών βυζαντινής μουσικής. Οι μετρήσεις κατευθυντικότητας για κάθε φωνήεν έγιναν σε ζώνες τρίτης οκτάβας με κέντρο τις τρεις πρώτες συχνότητες φωνοσυντονισμού του κάθε συμμετέχοντα. Τα δεδομένα δείχνουν ότι τα μοτίβα κατευθυντικότητας μπορεί να αλλάζουν ανάλογα με το τονικό ύψος και τη συχνότητα φωνοσυντονισμού, χωρίς όμως να παράγουν ισχυρά μοτίβα.

**Directivity characteristics of sung Greek vowels on
formant frequencies: Case study of classical singing and
Byzantine chant**

ABSTRACT

The directivity characteristics of the voice are influenced by factors such as the size of the mouth opening and the shape of the vocal tract, which also affect the formant frequencies. This study presents preliminary findings regarding the relationship between directivity and formant frequencies of the Greek singing voice. The Greek vowels were sung at various pitches by four professional singers, two classical singers and two Byzantine chant singers. Directivity measurements for each vowel were performed in third octave bands centered on the first three formant frequencies of each participant. The data indicate that directivity patterns may vary according to pitch and formant frequency, yet do not consistently produce strong patterns.

Εισαγωγή

Έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες έρευνες σχετικά με τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά της ομιλούσας και της άδουσας φωνής [1, 2, 3, 4]. Μελέτες που συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας της άδουσας και ομιλούσας φωνής έχουν καταδείξει διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο. Για παράδειγμα, οι κλασικοί τραγουδιστές τείνουν να έχουν υψηλότερη κατευθυντικότητα σε σύγκριση με την ομιλία [3].

Οι Kocon & Monson [1] αναφέρουν ότι η διαμόρφωση της φωνητικής οδού και το άνοιγμα του στόματος αλλάζουν κατά τη διάρκεια της ομιλίας, επηρεάζοντας την προβολή της φωνής, με το άνοιγμα να επηρεάζει την κατευθυντικότητα και κατά τη διάρκεια του τραγουδιού [5]. Η στάση του σώματος, η κλίση του κεφαλιού [6], η θέση του ήχου στη στοματική κοιλότητα (π.χ. τα μπροστινά φωνήεντα είναι πιο κατευθυντικά), το τονικό ύψος (π.χ. μεγαλύτερη κατευθυντικότητα σε υψηλότερα τονικά ύψη) και λιγότερο ο τύπος της φώνησης (αυξημένη σε πιεσμένη φώνηση έναντι χαλαρής) [3], καθώς και η φασματική χειραγώγηση μέσω τεχνικών τραγουδιού, επηρεάζουν επίσης την κατευθυντικότητα, ενώ υπάρχουν και σταθερές παράμετροι, όπως το μέγεθος του κορμού και του κεφαλιού, που επηρεάζουν [5].

Ωστόσο, παράγοντες όπως το άνοιγμα του στόματος και το σχήμα της φωνητικής οδού, θεωρούνται σημαντικοί για τις συχνότητες των φωνοσυντονισμών, με τον πρώτο και τον δεύτερο φωνοσυντονισμό να διαμορφώνουν κυρίως την ποιότητα του φωνήματος και τον τρίτο, τέταρτο και πέμπτο, την ποιότητα της φωνής («χρόχρωμα») [7]. Οι συχνότητες αυτές επηρεάζουν επίσης το φάσμα του φωνήματος, ενώ υπάρχουν τεχνικές τραγουδιού που επηρεάζουν αυτές τις συχνότητες [8]. Τέτοιες προσαρμογές χρησιμοποιούνται από τους τραγουδιστές για να τροποποιήσουν το φασματικό περιεχόμενο της φωνής τους και μπορούν επίσης να επηρεάσουν την κατευθυντικότητα [9]. Επομένως, έχει ενδιαφέρον να μελετηθεί η κατευθυντικότητα της φωνής με επίκεντρο τις συχνότητες φωνοσυντονισμού.

Αν και έχουν διεξαχθεί έρευνες σχετικά με τα φωνολογικά θέματα της ελληνικής γλώσσας και, πιο συγκεκριμένα, με τους φωνοσυντονισμούς που αντιστοιχούν σε αυτήν (π.χ. [10]), λίγες έρευνες έχουν διεξαχθεί σχετικά με τους φωνοσυντονισμούς στο τραγούδι [11] και την κατευθυντικότητα [12]. Επιπλέον, οι μελέτες αυτές δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες, ελλείψει ενός κοινού πρωτοκόλλου μέτρησης [10].

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στα χαρακτηριστικά της κατευθυντικότητας στο οριζόντιο επίπεδο των ελληνικών τραγουδιστών φωνηέντων (μονοφθόγγων) /a/ (α), /e/ (ε, αι), /i/ (ι, η, υ, οι, ει), /o/ (ο, ω), /u/ (ου), όταν διερευνώνται με κέντρο τις σχετικές συχνότητες φωνοσυντονισμού, λαμβάνοντας υπόψη τα τραγουδιστικά στυλ δύο επαγγελματιών κλασικών τραγουδιστών και δύο ψαλτών. Το τελευταίο είναι ένα στυλ όπου οι μελέτες που εστιάζουν στους φωνοσυντονισμούς [13], στη σύγκλισή τους (formant tuning) [14], καθώς και στα φωνητικά στολίδια [15] είναι αρκετά σπάνιες.

1. Μεθοδολογία

Σύμφωνα με έρευνες στο πεδίο [5,16], η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε στην ακουστικά μελετημένη ημι-απηχοϊκή αίθουσα του Εργαστηρίου Μουσικής

Ακουστικής και Τεχνολογίας (LabMAT) του ΕΚΠΑ. Χρησιμοποιήθηκαν 29 πυκνωτικά μικρόφωνα RODE-M5, μικρού διαφράγματος, τοποθετημένα συμμετρικά σε γωνίες κλίσης $+90^\circ$, $+30^\circ$, 0° , -30° πάνω σε ημισφαιρική κατασκευή λεπτού κελύφους ακτίνας 158,5cm. Η παρούσα μελέτη, λόγω του περιορισμένου χώρου, θα επικεντρωθεί στις μετρήσεις στο οριζόντιο επίπεδο (12 μικρόφωνα τοποθετημένα σε αζιμουθιακά βήματα 30° σε κλίση 0°). Οι επιμέρους συχνοτικές αποκρίσεις των μικροφώνων συλλέχθηκαν με τη χρήση του ScanIR [17] σε ένα MacBook Pro 2020 M1 με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab 2021a.

Οι συμμετέχοντες τοποθετήθηκαν στο κέντρο της συστοιχίας μικροφώνων σε όρθια στάση. Το ύψος της διάταξης ρυθμίστηκε με τη χρήση αισθητήρων ανύψωσης για να ευθυγραμμιστεί με τη θέση του στόματος κάθε τραγουδιστή. Ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιήθηκαν για τη διατήρηση της σωστής ευθυγράμμισης των υποκειμένων καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, δημιουργώντας παράλληλα μια πιο φυσική εμπειρία τραγουδιού, επιτρέποντας μικρές κινήσεις του σώματος και του κεφαλιού που σχετίζονται με την τεχνική και τη φωνητική προβολή και έχει αποδειχθεί ότι δεν έχουν αντιληπτική επίδραση στα δεδομένα κατευθυντικότητας [12].

Πριν από τις μετρήσεις, όλα τα σήματα εισόδου βαθμονομήθηκαν με τη χρήση ροζ θορύβου (78 dBA) από ένα παντοκατευθυντικό μεγάφωνο της Brüel & Kjær (OmniPower SoundSource Type 4292-L), τοποθετημένο στη θέση του τραγουδιστή, εξασφαλίζοντας σταθερές στάθμες σε όλα τα μικρόφωνα με ανοχή $\pm 0,5$ dB. Τα σήματα ροζ θορύβου αναλύθηκαν σε ζώνες τρίτης οκτάβας και λήφθηκαν επίπεδα βαθμονόμησης για την εξίσωση των επιπέδων RMS σε κάθε ζώνη. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας δύο ψηφιακές κονσόλες Yamaha TF1 (διασυνδεδεμένες μέσω DANTE), μέσω των ενσωματωμένων προενισχυτών τους, και ηχογραφήθηκαν σε φορητό υπολογιστή χρησιμοποιώντας το Cubase 11.

Αφού ευθυγραμμίστηκαν με τη συστοιχία μικροφώνων, οι συμμετέχοντες (2 άνδρες επαγγελματίες τραγουδιστές κλασικού τραγουδιού και 2 άνδρες ψάλτες) έλαβαν οδηγίες να τραγουδήσουν καθένα από τα πέντε ελληνικά φωνήεντα /a/ (α), /e/ (ε, αι), /i/ (ι, η, υ, οι, ει), /o/ (ο, ω), /u/ (ου) στις νότες A2, E3 και C#4, για περίπου δύο δευτερόλεπτα ο καθένας. Ο στόχος των διαφορετικών τονικών υψών ήταν να εξεταστούν πιθανές αποκλίσεις μεταξύ των χαμηλών, μεσαίων και υψηλών φωνητικών ρετζίστρων. Ωστόσο, ένας από τους συμμετέχοντες (ψάλτης), δεν μπόρεσε να παράξει τη νότα C#4, καθώς ήταν έξω από το φωνητικό του εύρος. Αντί αυτού, ηχογράφησε τη νότα A3, το οποίο μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως υψηλό ρετζίστρο για τον συγκεκριμένο συμμετέχοντα.

Οι ηχογραφήσεις ανά συμμετέχοντα και μικρόφωνο αποδιαμορφώθηκαν σύμφωνα με τις αποκρίσεις των μικροφώνων για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της διάταξης μέτρησης στα δεδομένα και η στάθμη βαθμονομήθηκε ανά ζώνη τρίτης οκτάβας, ώστε να ληφθούν παντοκατευθυντικές αποκρίσεις. Προκειμένου να μειωθεί ο αντίκτυπος του θορύβου που εισάγεται στα δεδομένα από ζώνες συχνοτήτων με ανεπαρκή ενέργεια, υπολογίστηκε η στάθμη σήματος προς θόρυβο και προέκυψε ένα κατώτατο όριο θορύβου που κατέστειλε κάθε δεδομένο εντός 3dB από τη στάθμη του [12]. Η ανάλυση των συχνοτήτων φωνοσυντονισμού έγινε με το Fast Track [18], προσαρμόζοντας τις παραμέτρους ανάλογα με τους συμμετέχοντες.

Για κάθε φωνήεν και ρετζίστρο, τα δεδομένα κατευθυντικότητας υπολογίστηκαν σε ζώνες τρίτης οκτάβας με επίκεντρο τις αντίστοιχες συχνότητες φωνοσυντονισμού F1, F2, F3 κάθε συμμετέχοντα, οι οποίες υπολογίστηκαν από τη μέση τιμή ανά συχνότητα φωνοσυντονισμού των εννέα μπροστινών μικροφώνων (0° , 30° , 330°

αζιμούθιο στο οριζόντιο επίπεδο και 0° , 45° , 315° αζιμούθιο σε ανύψωση -30° και $+30^\circ$).

2. Αποτελέσματα

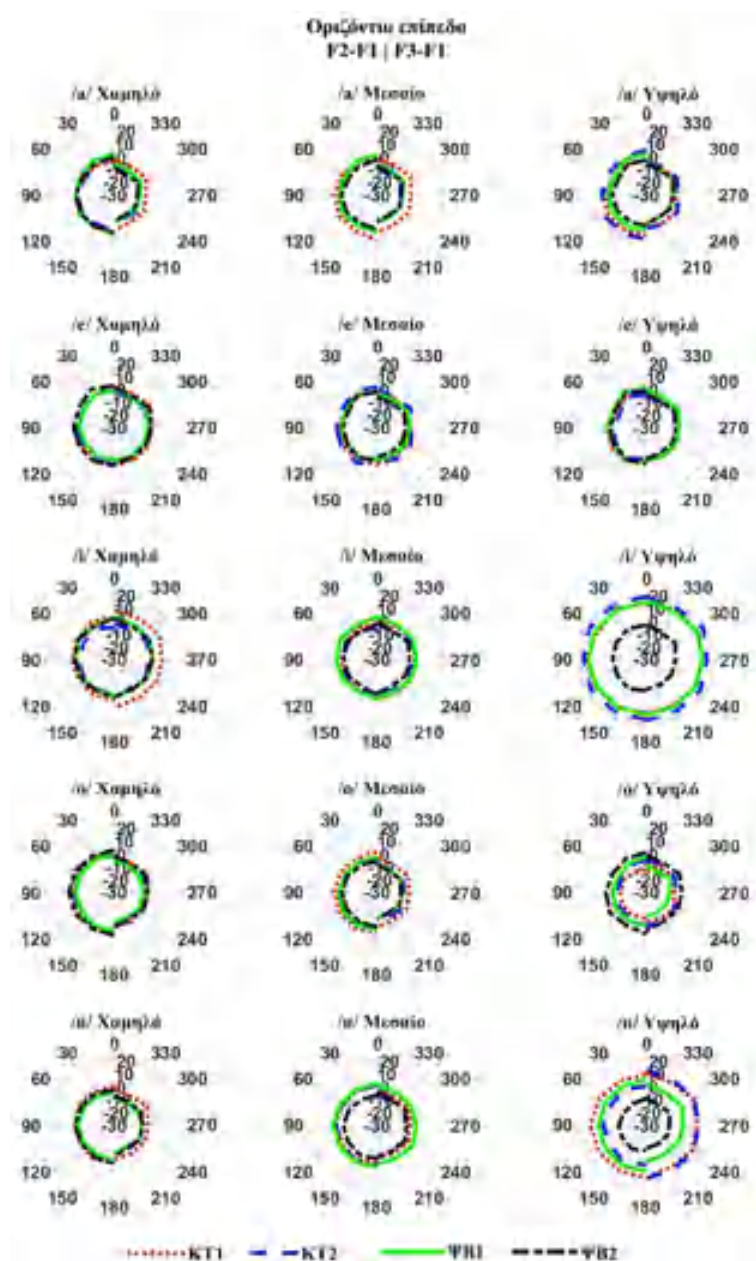
Η κατευθυντικότητα όλων των φωνηέντων στην περιοχή του πρώτου φωνοσυντονισμού F1 παρουσιάζει παντοκατευθυντικά χαρακτηριστικά, λόγω του χαμηλού εύρους συχνοτήτων της F1 (περίπου 250Hz έως 1000Hz), ενώ οι περιοχές φωνοσυντονισμού F2 και F3 παρουσιάζουν διαφορετικά κατευθυντικά χαρακτηριστικά. Σε κάθε πολικό διάγραμμα στο **Error! Reference source not found.** απεικονίζεται στην αριστερή πλευρά η διαφορά στην κατευθυντικότητα με κέντρο την περιοχή του F2 σε σχέση με όταν αυτή μετريέται με κέντρο το F1, ενώ στη δεξιά πλευρά απεικονίζεται η διαφορά με κέντρο το F3 σε σχέση με το F1. Η αναπαράσταση αυτή δύναται να καταδείξει πιθανές αλλαγές στην κατευθυντικότητα των ελληνικών φωνηέντων στις περιοχές F1, F2 και F3. Οι συμμετέχοντες είναι κλασικός τραγουδιστής 1 και 2 (KT1, KT2), ψάλτης βυζαντινής 1 και 2 (ΨB1, ΨB2).

Η κατευθυντικότητα του φωνήεντος /a/ είναι λιγότερο παντοκατευθυντική στις περιοχές F2 και F3 σε σχέση με την περιοχή F1. Παρόλα αυτά, στην περιοχή F2, ο KT1 διευρύνει την προβολή σε σχέση με την F1 στο πλάι και πίσω, στο μεσαίο (F2=1005Hz) και υψηλό ρετζίστρο (F2=1064Hz), ενώ ο KT2 παρουσιάζει εντονότερη προβολή μόνο στο υψηλό ρετζίστρο (F2=1044,5Hz), με την κατευθυντικότητα να είναι λιγότερο έντονη στο πλάι. Από τους ψάλτες βυζαντινής ο ΨB1 φαίνεται να έχει πιο έντονη προβολή σε όλα τα ρετζίστρα στις 0° , 30° και 330° (χαμηλό ρετζίστρο: F2=1065Hz, μεσαίο: F2=1070Hz, υψηλό: F2=1105Hz). Κατ' επέκταση οι περιοχές F2 και F3 των συμμετεχόντων παρουσιάζουν λιγότερο έντονη προβολή και περισσότερες κατευθυντικές ιδιότητες (ιδιαίτερα στην περιοχή F3) σε σύγκριση με την F1, αλλά σε διαφορετικό βαθμό. Διαφαίνεται επίσης οι κλασικοί τραγουδιστές να διατηρούν την προβολή τους στις περιοχές F2 και F3 περισσότερο από τους ψάλτες της βυζαντινής.

Η διασπορά του φωνήεντος /e/ στις περιοχές F2 και F3 φαίνεται να είναι παρόμοια με την περιοχή F1, η οποία είναι κυρίως παντοκατευθυντική. Ο KT2 έχει ελαφρά εντονότερη προβολή στην περιοχή F2 στο μεσαίο ρετζίστρο (F2=1505Hz) και ο ΨB2 στο χαμηλό ρετζίστρο (F2=1626,5Hz). Στην περιοχή F3 οι συμμετέχοντες παρουσιάζουν κατευθυντικά χαρακτηριστικά με μειωμένη προβολή. Σε σχέση με το φωνήεν /a/, το φωνήεν /e/ εμφανίζει πιο ομοιόμορφη διασπορά, ιδιαίτερα στην περιοχή F3. Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των κλασικών τραγουδιστών και των ψαλτών της βυζαντινής στις περιοχές F2 και F3 στο χαμηλό ρετζίστρο είναι παρόμοια, αλλά οι ψάλτες εμφανίζουν λιγότερο εστιασμένη προβολή, ιδιαίτερα στο υψηλό ρετζίστρο στην περιοχή F2.

Όσον αφορά το φωνήεν /i/, φαίνεται ότι όλοι οι συμμετέχοντες, εκτός του ΨB2, παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη διασπορά στις περιοχές F2 και F3 προς όλες τις γωνίες αζιμούθιου, στο υψηλό ρετζίστρο. Ο KT1 παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και στο χαμηλό ρετζίστρο. Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των συμμετεχόντων στο φωνήεν /i/ φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά από αυτά που παρατηρήθηκαν στα φωνήεντα /a/ και /e/. Η σημαντική διαφορά μεταξύ των ΨB1

και ΨB2 καθιστά δύσκολη τη σύγκριση μεταξύ των κλασικών τραγουδιστών και των ψαλτών, αν και οι δύο φαίνεται να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά στο χαμηλό



Σχήμα 2.1 Πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας των τεσσάρων συμμετεχόντων στο οριζόντιο επίπεδο (5 φωνήεντα, 3 ρετζίστρα). Η αριστερή πλευρά κάθε πολικού

διαγράμματος απεικονίζει την κατευθυντικότητα του 2ου φωνοσυντονισμού σε σχέση με τον 1ο (F2-F1) και η δεξιά πλευρά του 3ου σε σχέση με τον 1ο (F3-F1).

ρετζίστρο και στις δύο περιοχές F2 και F3, δηλαδή ελαφρώς εστιασμένη προβολή με ελάχιστες κορυφές.

Προχωρώντας στο φωνήεν /ο/, τα δεδομένα δείχνουν ότι οι περιοχές F2 και F3 φαίνεται να έχουν μικρότερη προβολή από την F1 για τους περισσότερους συμμετέχοντες, με τη μικρότερη να παρατηρείται στον KT1 στην περιοχή F2 στο υψηλό ρετζίστρο (F2=960Hz). Ωστόσο, ο ίδιος συμμετέχων παρουσιάζει ελαφρώς πιο έντονη προβολή στο μεσαίο ρετζίστρο στην περιοχή F2 (F2=731,5Hz). Ο ΨB2 παρουσιάζει πιο έντονη προβολή στην περιοχή F2 σε σχέση με την F1, στο χαμηλό ρετζίστρο (F2=755,5Hz). Το φωνήεν /ο/ έχει παρόμοια χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας (σχεδόν παντοκατευθυντικά) τόσο για τους κλασικούς τραγουδιστές όσο και για τους ψάλτες στο χαμηλό ρετζίστρο στην περιοχή F2. Στο μεσαίο ρετζίστρο στην περιοχή F2, οι κλασικοί τραγουδιστές τείνουν να διατηρούν αυτό το παντοκατευθυντικό χαρακτηριστικό, ενώ οι ψάλτες της βυζαντινής μουσικής φαίνεται να διατηρούν την προβολή τους στο υψηλό ρετζίστρο.

Τέλος, το φωνήεν /υ/ παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με το φωνήεν /ι/, ειδικά στο υψηλό ρετζίστρο. Φαίνεται ότι οι KT1 και ΨB1 έχουν μεγαλύτερη προβολή στην περιοχή F2, στο υψηλό ρετζίστρο (F2=765,5Hz και 847,5Hz αντίστοιχα), ενώ οι KT1 και KT2 παρουσιάζουν επίσης έντονη προβολή στην περιοχή F3 (F3=2538,5Hz και 2565,5Hz αντίστοιχα) στο υψηλό ρετζίστρο. Επιπλέον, η προβολή του ΨB1 στην περιοχή F2 στο μεσαίο ρετζίστρο (F2=699Hz) είναι επίσης έντονη αλλά σε μικρότερο βαθμό. Τα χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας των κλασικών τραγουδιστών στην περιοχή F2 είναι αρκετά παντοκατευθυντικά σε όλα τα ρετζίστρα. Το υψηλό τους ρετζίστρο παρουσιάζει αξιοσημείωτες κορυφές τόσο στην περιοχή F2 όσο και στην F3, ενώ οι ψάλτες της βυζαντινής μουσικής – κυρίως ο ΨB1 – ακολουθούν αυτήν την τάση στην περιοχή F2. Στο χαμηλό ρετζίστρο, οι κλασικοί τραγουδιστές και οι ψάλτες της βυζαντινής μουσικής μοιράζονται επίσης παρόμοια χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας, αλλά οι κλασικοί τραγουδιστές τείνουν να έχουν πιο έντονη προβολή.

3. Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας είναι σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία σχετικά με την αριστερή/δεξιά συμμετρική προβολή της φωνής στο τραγούδι [12,16]. Τα μοτίβα κατευθυντικότητας μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με το τονικό ύψος και την κεντρική συχνότητα [2,3]. Ωστόσο, είναι δύσκολο να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με το είδος του τραγουδιού και πώς αυτό μπορεί να επηρεάσει την κατευθυντικότητα. Ακόμα και μεταξύ τραγουδιστών του ίδιου είδους μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές, με το φωνήεν /ε/ να είναι αυτό με τη μικρότερη μεταβλητότητα τόσο στην περιοχή F2 όσο και στην περιοχή F3, ενώ τα φωνήεντα /ι/ και /υ/ αυτά με τη μεγαλύτερη.

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ενδείξεις ότι οι κλασικοί τραγουδιστές τείνουν να παρουσιάζουν πιο έντονη προβολή, κυρίως στην περιοχή F3 στο υψηλό ρετζίστρο των ελληνικών φωνηέντων /ι/ και /υ/. Οι τιμές των ψαλτών για το φωνήεν /ι/ στην περιοχή F2 και, ιδιαίτερα, στο υψηλό ρετζίστρο είναι αρκετά διαφορετικές. Παρόλο

που και οι δύο είναι ψάλτες, ο ΨΒ1 φαίνεται να ακολουθεί το μοτίβο των κλασσικών τραγουδιστών. Μεγαλύτερο δείγμα ψαλτών θα μπορούσε να δώσει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτή τη διαφορά.

Έχει αναφερθεί ότι, από το περισσότερο προς το λιγότερο κατευθυντικό, τα φωνήεντα εμφανίζονται με την ακόλουθη σειρά: /a/, /e/, /i/, /o/, /u/ [2,4], η οποία φαίνεται να αντιστοιχεί στο άνοιγμα του στόματος [4,5]. Τα δεδομένα της παρούσας έρευνας υποστηρίζουν αυτό το εύρημα με την εξαίρεση των ελληνικών φωνηέντων /u/ και /i/, που είναι λιγότερο κατευθυντικά, ειδικά στο υψηλό ρετζίστρο στην περιοχή F3, ενώ το /e/ φαίνεται να είναι το πιο κατευθυντικό σε σχέση με το F1. Το εύρημα αυτό μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στο διαφορετικό άνοιγμα του στόματος των τραγουδιστών [5], και, εν μέρει, στον τρόπο που προφέρονται τα ελληνικά φωνήεντα σε σχέση με άλλες γλώσσες.

Περιορισμός της παρούσας μελέτης είναι ο μικρός αριθμός των συμμετεχόντων, ο οποίος δυσκολεύει την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Επίσης, οι συχνότητες των φωνοσυντονισμών υπολογίζονται ως μέσος όρος εννέα μικροφώνων και όχι ενός μικροφώνου τοποθετημένου κοντά στο στόμα του τραγουδιστή. Αν και η απόσταση ηχογράφησης είναι πιθανό να επηρεάσει τις συχνότητες φωνοσυντονισμών, η προκύπτουσα απόκλιση βρίσκεται εντός τους εύρους διακυμάνσεων του ομιλητή [19].

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης συμβάλλουν στην υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με την ανάλυση των φωνοσυντονισμών και της κατευθυντικότητας της άδουσας φωνής στη νεοελληνική γλώσσα και τη βυζαντινή ψαλμωδία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως βάση για αποδοτικότερες τεχνικές ηχογράφησης και εφαρμογή αισθητήρων για τη μελέτη της φωνής.

Μελλοντικές εργασίες θα επικεντρωθούν στην κατευθυντικότητα στις συχνότητες του τέταρτου και πέμπτου φωνοσυντονισμού (F4, F5), παρέχοντας περαιτέρω πληροφορίες για την περιοχή σύγκλισης των φωνοσυντονισμών (formant tuning). Επιπλέον, η ανάλυση θα συμπεριλάβει κατευθύνσεις πέραν του οριζόντιου επιπέδου, καθώς και μεγαλύτερο αριθμό τραγουδιστών, με διαφορετικό εκπαιδευτικό υπόβαθρο και εμπειρία σε διάφορα είδη τραγουδιού.

4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό Έργο με τίτλο «Συναισθηματική Τεχνητή Νοημοσύνη στη Μουσική Έκφραση» υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση της Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 015111).



5. Αναφορές

- [1] P. Kocon and B. B. Monson, "Horizontal directivity patterns differ between vowels extracted from running speech," *The Journal of the Acoustical Society of America* **144**(1), EL7–EL12 (2018).
- [2] A. H. Marshall and J. Meyer, "The Directivity and Auditory Impressions of Singers," *Acta Acustica united with Acustica* **58**(3), 130–140 (1985).

- [3] M. Brandner, M. Frank, and A. Sontacchi, "Horizontal and Vertical Voice Directivity Characteristics of Sung Vowels in Classical Singing," *Acoustics* **4**(4), 849–866 (2022).
- [4] C. Pörschmann and J. M. Arend, "Investigating phoneme-dependencies of spherical voice directivity patterns," *The Journal of the Acoustical Society of America* **149**(6), 4553–4564 (2021).
- [5] M. Brandner, R. Blandin, M. Frank, and A. Sontacchi, "A pilot study on the influence of mouth configuration and torso on singing voice directivity," *The Journal of the Acoustical Society of America* **148**(3), 1169–1180 (2020).
- [6] R. Blandin and M. Brandner, "Influence of the vocal tract on voice directivity," in *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics* (2019), pp. 1795–1801.
- [7] B. H. Story, "The vocal tract in singing," in *The Oxford Handbook of Singing*, G. F. Welch, D. M. Howard, and J. Nix, eds. (Oxford University Press, 2016), pp. 131–211.
- [8] J. Sundberg, "The Singing Voice," in *The Oxford Handbook of Voice Perception*, S. Frühholz and P. Belin, eds., 1st ed., Oxford Library of Psychology (Oxford University Press, 2019), **1**, pp. 117–142.
- [9] D. Cabrera, P. J. Davis, and A. Connolly, "Long-Term Horizontal Vocal Directivity of Opera Singers: Effects of Singing Projection and Acoustic Environment," *Journal of Voice* **25**(6), e291–e303 (2011).
- [10] A. Arvaniti, "Greek Phonetics, The State of the Art," *J Greek Linguist* **8**(1), 97–208 (2007).
- [11] S. Kalozakis, A. Georgaki, and G. Kouroupetroglou, "FORMANT TUNING IN CRETAN RIZITIKO SINGING," in *Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications: 12th International Workshop*, C. Manfredi, ed. (Firenze University Press, 2021), pp. 127–130.
- [12] K. Bakogiannis, G. Dedousis, Y. Malafis, and A. Andreopoulou, "On the spherical directivity and formant analysis of the singing voice; a case study of professional singers in Greek Classical and Byzantine music," in (Audio Engineering Society, 2022).
- [13] D. Delviniotis, "Analysis of Byzantine music - Greek orthodox chant- by using signal processing techniques," National and Kapodistrian University of Athens (2002).
- [14] G. Chrysochoidis, G. Kouroupetroglou, D. Delviniotis, and S. Theodoridis, "Formant tuning in Byzantine chant," in *Proceedings of the Int. Conference Sound and Music Computer* (2013), pp. 217–223.
- [15] D. S. Delviniotis and S. Theodoridis, "On Exploring Vocal Ornamentation in Byzantine Chant," *Journal of Voice* **33**(2), 256.e17–256.e34 (2019).
- [16] B. B. Boren and A. Roginska, "Sound radiation of trained vocalizers," *Proceedings of Meetings on Acoustics* **19**(1), 035025 (2013).
- [17] J. Vanasse, A. Genovese, and A. Roginska, "Multichannel Impulse Response Measurements in MATLAB: An Update on ScanIR," in (Audio Engineering Society, 2019).
- [18] S. Barreda, "Fast Track: fast (nearly) automatic formant-tracking using Praat," *Linguistics Vanguard* **7**(1), (2021).

[19] E. B. Brixen and S. Christensen, "Influence of Recording Distance and Direction on the Analysis of Voice Formants - Initial Considerations," in (Audio Engineering Society, 2011).



Χαρτογράφηση του Εύρους Ζώνης των Φωνοσυντονισμών στο Σύγχρονο Φωνητικό Ιδίωμα του Ριζίτικου Τραγουδιού

Σπύρος Καλοζάκης, Αρετή Ανδρεοπούλου, Αναστασία Γεωργάκη
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT)
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Πανεπιστημιούπολη - Ζωγράφου, 157 84, Αθήνα.
skalozakis@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη, εστιάζει στους φωνοσυντονισμούς του σύγχρονου φωνητικού ιδιώματος στο Ριζίτικο τραγούδι. Ειδικότερα, αναφέρεται στο εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών (Formant Bandwidth) με την πραγματοποίηση μίας -πρώτης- καταγραφής του εύρους των δύο χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1,B2) στο Ριζίτικο τραγούδι, μέσα από ένα -ενδεικτικό- δείγμα δεκατεσσάρων (14) Κρητών τραγουδιστών των οποίων η καταγωγή προέρχεται από τρεις (3) διαφορετικούς Νομούς της Μεγαλονήσου (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο). Η εφαρμογή από μέρους μας της τεχνικής του αντίστροφου φιλτραρίσματος (Inverse Filtering), κατέδειξε το σημαντικά «στενότερο» εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών των τραγουδιστών με καταγωγή από τα Χανιά για το φωνήεν /α/ σε σχέση με τους τραγουδιστές από το Ηράκλειο και το Ρέθυμνο, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα το «έντονο» ένγρινο στοιχείο ενός (1) Ρεθύμνιου τραγουδιστή κατά τη φωνητική εκφορά του παραπάνω φωνήεντος (/α/).

Mapping the Formant Bandwidth in the Modern Vocal Idiom of Rizitiko Singing

ABSTRACT

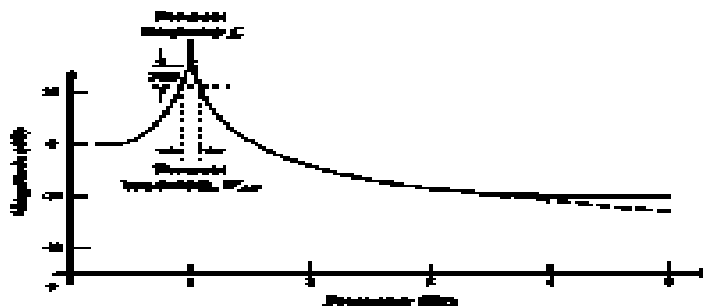
The present study, focuses on formant frequencies of the modern vocal idiom of Rizitiko singing. More specifically, it refers to Formant Bandwidth by carrying out a -first- recording of the bandwidth of the two lower formants (B1, B2) in Rizitiko singing, through an -indicative- sample of fourteen (14) singers whose origin derived from three (3) different Prefectures of Crete (Chania, Rethymnon, Heraklion). Our application of Inverse Filtering technique, demonstrated the significantly “narrower” Formant Bandwidth of the singers originated from Chania for vowel /a/ compared to the singers from Rethymnon and Heraklion, highlighting at the same time the “intense” nasal element during the phonetic utterance of the above vowel (/a/) of one (1) Rethymnian singer.

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο των ερευνών που εξετάζουν ακουστικά την τραγουδιστική εκφορά σε φωνητικά στυλ του «πηγαίου» τραγουδιού (cultural singing) [1],[2] στο οποίο (πλαίσιο) εντάσσεται και η παρούσα εργασία, αλλά και σε έρευνα που ανέλυσε ακουστικά τραγουδιστικά στυλ του κλασικού ρεπερτορίου (όπερα) [3], παρατηρείται ότι δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα ηχοχρωματικά χαρακτηριστικά της φωνής και συγκεκριμένα στη διερεύνηση των προσαρμογών της φωνητικής οδού (vocal tract) μέσω των φωνοσυντονισμών κατά την τραγουδιστική επιτέλεση. Οι εκπεμπόμενοι ήχοι της ανθρώπινης φώνησης «μεταφέρονται» ακουστικά με μεγαλύτερη ευκολία (με μεγαλύτερο πλάτος/ένταση), όταν συμπίπτουν συχνотικά με τις συχνότητες των φωνοσυντονισμών [4],[5]. Οι φωνοσυντονισμοί επομένως, συνιστούν τους συντονισμούς της φωνητικής οδού (vocal tract) στην πηγαία ηχητική διέγερση (voice source) η οποία παράγεται στη γλωττίδα [6] και για την ακουστική τους ανάλυση λαμβάνονται υπόψη τέσσερις (4) παράμετροι. Συγκεκριμένα: **1)** η κεντρική συχνότητα μέσω της οποίας «αντλούνται» σημαντικές πληροφορίες για τις προσαρμογές της φωνητικής οδού κατά την τραγουδιστική επιτέλεση (και ομιλία). **2)** Η στάθμη ισχύος, για την οποία τα συμπεράσματα τα οποία «εξάγονται» προκύπτουν από την εξέταση των μεγάλου μέσου όρου φασμάτων (Long Term Average Spectrum – LTAS), ώστε να «θεμελιωθεί» εν πολλοίς, μία σημαντική αύξηση του ηχητικού σήματος της άδουσας φωνής (και ομιλούσας) η οποία δεν ενέχει τη χρήση μικροφώνου. **3)** Η συσχέτισή τους είτε με τη συχνότητα φώνησης (θεμελιώδης συχνότητα), είτε με τις αρμονικές συχνότητες ή μέρη (partials) αυτών (αρμονικών), για την «ανίχνευση» τραγουδιστικών τεχνικών που ως σκοπό έχουν την αύξηση της ακουστότητας της φωνής σε σχέση με την ακουστότητα της ορχήστρας [7]. **4)** Το εύρος ζώνης αυτών (Formant Bandwidth).

1. Εύρος Ζώνης Φωνοσυντονισμών

Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα [8], το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών συνδέεται με το πλάτος τους, ώστε όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος κορυφής, επομένως το επίπεδο πλάτους των αρμονικών. Για τη μέτρησή του, λαμβάνεται υπόψιν το πλάτος της ζώνης το οποίο σχηματίζεται τρία (3) Decibel (dB) κάτω από την κορυφή (peak) του φωνοσυντονισμού των αρμονικών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Γραφική αναπαράσταση του εύρους ζώνης του φωνοσυντονισμού σχηματιζόμενο 3 dB, κάτω από την κορυφή του. Πηγή: (Kang et al., 2016) [8].

Με άλλα λόγια, το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών (Formant Bandwidth) μπορεί να οριστεί ως η συχνοτική περιοχή στην οποία η ενίσχυση διαφοροποιείται κατά -3 dB (κάτω) από την ενίσχυση της κεντρικής συχνότητας η οποία εξετάζεται.

1.1 Διερεύνηση του Εύρους Ζώνης των Φωνοσυντονισμών στο Τραγούδι: Μία Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στον μικρό αριθμό ερευνών που έχουν διεξαχθεί μεμονωμένα όσον αφορά το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών της άδουσας φωνής, οι οποίες εξέτασαν ακουστικά την τραγουδιστική στυλιστική εκφορά τόσο στο κλασικό ρεπερτόριο [3], όσο και στο «πηγαίο» τραγούδι [1],[2], σημειώνεται το ιδιαίτερο και ξεχωριστό ηχόχρωμα της φωνής των τραγουδιστών, όταν κατά την τραγουδιστική επιτέλεση ο πρώτος (F1) ή ο δεύτερος φωνοσυντονισμός (F2) συμπίπτει συχνοτικά είτε με τη θεμελιώδη συχνότητα (F0), είτε με τις αρμονικές συχνότητες ή μέρη (partials) αυτών¹ και ταυτόχρονα το εύρος ζώνης -αντίστοιχα- του πρώτου (B1) ή του δεύτερου φωνοσυντονισμού (B2) είναι «στενό» (μικρή συχνοτική τιμή), σε σχέση με τους τραγουδιστές των οποίων το εύρος ζώνης είναι ευρύτερο (μεγαλύτερη συχνοτική τιμή).

Το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών, συνδέεται με την ακουστική αντίληψη και τη λεπτομερή ακουστική ακρίβεια, αναφορικά με την αναγνώριση συλλαβών και λέξεων κατά την ομιλία και κατ' επέκταση στο τραγούδι. Ειδικότερα, η λεπτομέρεια (η δυνατότητα καλύτερης αντίληψης αναγνώρισης από τον ακροατή της συλλαβής που αρθρώνεται από τον ομιλητή/τραγουδιστή) μειώνεται, όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών (Broad Formant Bandwidth). Αντίστροφα, όσο στενεύει το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών (Narrow Formant Bandwidth) από τον ομιλητή/τραγουδιστή, ο ακροατής έχει μία σαφώς λεπτομερέστερη αντίληψη (φασματική «αποτύπωση») της λέξης και της συλλαβής που αρθρώνεται κατά το άκουσμά της [9]. Εν ολίγοις, η αντίληψη αναγνώρισης μίας συλλαβής (η μεγαλύτερη λεπτομέρεια της ακοής μας ως ακροατές) αυξάνεται, όσο το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών στενεύει (μικρή συχνοτική τιμή) και μειώνεται όσο αυτό (Formant Bandwidth) αποκτά μεγαλύτερο εύρος (μεγαλύτερη συχνοτική τιμή). Χαρακτηριστικά παραδείγματα των προηγούμενων δίνονται σε νεότερη έρευνα [10], η οποία σημειώνει ότι σε συνθήκες μεγάλης έντασης θορύβου (εργοστασιακό περιβάλλον) ή ακόμη και μουσικής (νυχτερινά κέντρα διασκέδασης), το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών στενεύει μεταξύ των συνομιλούντων (έστω και ασυναίσθητα), ούτως ώστε αυτοί να γίνονται καταληπτοί μεταξύ τους.

1.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν το Εύρος Ζώνης των Φωνοσυντονισμών

Σε προγενέστερη μελέτη [11], υπογραμμίζεται το γεγονός ότι το άνοιγμα της γλωττίδας είναι η κύρια αιτία ενός αυξημένου εύρους ζώνης για τον πρώτο φωνοσυντονισμό (B1), στοιχείο το οποίο -όπως προαναφέρθηκε- δεν προάγει τη λεπτομερή ακουστική αντίληψη της συλλαβής και της λέξης όταν αυτή προφέρεται κατά αυτόν τον τρόπο (αυξημένο εύρος), ενώ παράλληλα το εύρος μειώνεται όσο το

¹ Το φαινόμενο το οποίο περιγράφουμε, ονομάζεται «κούρδισμα» των φωνοσυντονισμών και στη διεθνή βιβλιογραφία το συναντάμε υπό τον όρο "Formant Tuning".

άνοιγμα της γλωττίδας μικραίνει (κλείνει). Επιπλέον, στην ίδια έρευνα [11] ένα σημαντικό συμπέρασμα το οποίο προέκυψε αναφορικά με το εύρος ζώνης του πρώτου φωνοσυντονισμού (B1), συνίσταται στη συσχέτισή του με την εκπνοή. Ειδικότερα, η παραπάνω έρευνα μέσα από τα ευρήματά της υποστηρίζει, ότι όσο περισσότερη η ροή του αέρα (airflow) κατά τη διαδικασία της αναπνοής (εκπνοή/ peak flow) φέρει το φωνήεν που προφέρεται από τον ομιλητή ή τραγουδιστή, τόσο μεγαλύτερο το εύρος του B1. Παράλληλα, σε εκτεταμένη έρευνα [12] η οποία εξέτασε ακουστικά την Ολλανδική, την Αγγλική και τη Γερμανική Γλώσσα, υποστηρίζει ότι τα εύρη ζώνης των τριών χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1, B2, B3), συμβάλλουν στην ακουστική και στη φωνητική «ακεραιότητα» (phonetic integrity) των δυναμικά μεταβαλλόμενων ήχων.

2. Σχεδίαση της Πειραματικής Διαδικασίας για την Ανάλυση του Εύρους Ζώνης των Φωνοσυντονισμών στο Ριζίτικο Τραγούδι

Στόχος της παρούσας μελέτης, αποτέλεσε η πραγματοποίηση μίας -πρώτης- καταγραφής του εύρους ζώνης των δύο χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1,B2) του σύγχρονου φωνητικού ιδιώματος στο ριζίτικο τραγούδι, μέσα από ένα -ενδεικτικό- δείγμα δεκατεσσάρων (14) Κρητών τραγουδιστών των οποίων η καταγωγή προέρχεται από τρεις (3) διαφορετικούς Νομούς της Μεγαλονήσου (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο). Συγκεκριμένα, το ηχητικό δείγμα περιλάμβανε έξι (6) τραγουδιστές από το Ρέθυμνο, τέσσερις (4) από τα Χανιά και τέσσερις (4) από το Ηράκλειο, οι οποίοι ηχογραφήθηκαν κατά την τραγουδιστική «εκτέλεση» (στην τονική βαθμίδα της ανιούσας μείζονας κλίμακας) του «ανοιχτού» φωνήεντος /a/ και εντός του τονικού εύρους των φωνών τους (comfortable pitch range).

2.1 Χώρος Ηχογραφήσεων και Επιλογή Τραγουδιστών

Όλοι οι συμμετέχοντες τραγουδιστές οι οποίοι συγκρότησαν το «σώμα» (corpus) των ηχογραφήσεων, επιλέχθηκαν βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων. Ενδεικτικά, μεταξύ αυτών αποτέλεσε το φύλο (άρρεν), καθώς το ριζίτικο επιτελείται αποκλειστικά και μόνο από ανδρικές φωνές, η ηλικία, καθώς ήταν ζητούμενο οι συμμετέχοντες να έχουν μικρή ηλικιακή απόσταση μεταξύ τους (η οποία κυμαίνεται μεταξύ 27 έως 43 ετών), η καταγωγή τους, η οποία έπρεπε να προέρχεται από τους τρεις (3) προαναφερθέντες Νομούς στους οποίους συναντάται το ριζίτικο, αλλά και το ρεπερτόριό τους το οποίο οπωσδήποτε έπρεπε να περιλαμβάνει το ριζίτικο. Ταυτόχρονα, λήφθηκε η απαραίτητη μέριμνα ώστε όλες οι ηχογραφήσεις να πραγματοποιηθούν στον ίδιο χώρο (σε ένα από τα πλήρως εξοπλισμένα στούντιο ηχογράφησης του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου) με τη χρησιμοποίηση -σε κάθε ηχογράφηση (session)- πανομοιότυπου εξοπλισμού και χώρου, για τη διασφάλιση του ίδιου ακουστικού περιβάλλοντος σε όλες ανεξαιρέτως τις ηχογραφήσεις.

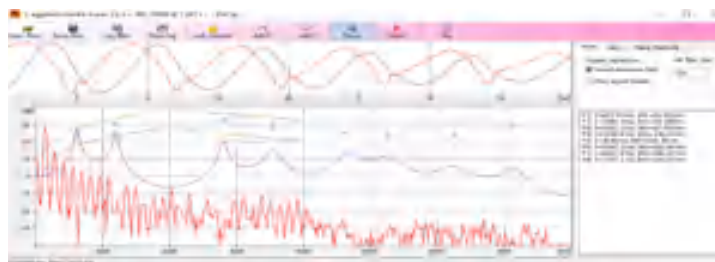
2.2 Επιλογή Λογισμικού Προγράμματος

Σε αντίθεση με την κεντρική συχνότητα των φωνοσυντονισμών της ανθρώπινης φωνής η οποία μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια, η ακριβής εκτίμηση του εύρους

ζώνης αυτών (φωνοσυντονισμών) συνιστά μία αρκετά δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία υπολογισμού [13]. Τούτο οφείλεται στο γεγονός, ότι τα περισσότερα λογισμικά προγράμματα τα οποία εξειδικεύονται στην εύρεση της κεντρικής συχνότητας των φωνοσυντονισμών, είτε αυτά χρησιμοποιούν κώδικα γραμμικής πρόβλεψης (Linear Prediction Code - LPC) για την «εξαγωγή» διάφορων παραμέτρων της φώνησης, είτε μη γραμμικό κώδικα (non Linear Code), δεν παρέχουν την απαιτούμενη ακρίβεια στην εύρεση του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών [10], [14]. Το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών στη σύγχρονη εκδοχή του ριζίτικου τραγουδιού, ήταν το *Sopran* και η -λογισμική- επέκταση (plug-in) αυτού το *DeCap*². Το εν λόγω πρόγραμμα δεν χρησιμοποιεί αυτόματη μέθοδο εύρεσης ζώνης των φωνοσυντονισμών επί τη βάσει κάποιου γραμμικού κώδικα και μοντέλου πρόβλεψης (LPC), ούτε βασίζεται στη μη γραμμική αλληλεπίδραση πηγής-φίλτρου. Αντιθέτως, βασίζεται στην μέθοδο του «αντίστροφου φιλτραρίσματος» (Inverse Filtering).

2.3 Μεθοδολογία - Τεχνική του Αντίστροφου Φιλτραρίσματος (Inverse Filtering)

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για την «εξαγωγή» της φωνητικής παραμέτρου του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών στο ριζίτικο τραγούδι, βασίστηκε στην ψηφιακή επεξεργασία του ηχητικού σήματος της φωνής, με την εφαρμογή της τεχνικής του αντίστροφου φιλτραρίσματος κατά το πρότυπο (μεθοδολογία) προγενέστερων ερευνών οι οποίες εξέτασαν το εύρος ζώνης ανδρικών οπερατικών φωνών [3], αλλά και αυτό (εύρος ζώνης) της φωνής στο «πηγαίο» τραγούδι [1]. Έπειτα από μία σειρά απαραίτητων εργασιών στο πρόγραμμα *Sopran*, όπως -μεταξύ άλλων- η «εισαγωγή» των αρχείων ήχου και η μετατροπή της δειγματοληψίας αυτών (αρχείων), έλαβε χώρα η εφαρμογή της τεχνικής του αντίστροφου φιλτραρίσματος με τη χρήση της λογισμικής επέκτασης *DeCap* όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 2.1).



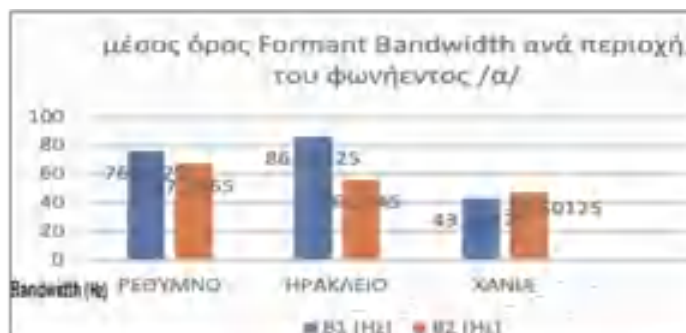
Εικόνα 2.1 Απεικόνιση προγράμματος DeCap των δύο σημάτων (flow glottogram και inverse filtered flow derivative), μετά τη διαδικασία του αντίστροφου φιλτραρίσματος, για την τονική βαθμίδα του φωνήεντος /a/, Ρεθυμνιικής καταγωγής τραγουδιστή.

² Καταλήξαμε στα προαναφερθέντα λογισμικά προγράμματα, ύστερα από εκτεταμένη έρευνα, αλλά και την -μετέπειτα- προσωπική επικοινωνία μας με τους Dr Johan Sundberg (Professor Emeritus, Royal Institute of Technology - KTH, Stockholm) και Dr Svante Granqvist (Professor, Royal Institute of Technology - KTH, Stockholm) του οποίου τα συγκεκριμένα λογισμικά αποτελούν προϊόν προσωπικής έμπνευσης και δημιουργίας (και διατίθενται στην ιστοσελίδα: www.tolvan.com).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η εφαρμογή της τεχνικής του αντίστροφου φιλτραρίσματος, βασίστηκε στους απόλυτα χειροκίνητους (manual), «λεπτούς» και προσεκτικούς χειρισμούς επί του φάσματος της γλωττιδικής ροής (flow glottogram) και την επισημείωση των φωνοσυντονισμών (οι οποίοι απεικονίζονται ως διάφανοι κύκλοι στην προηγούμενη εικόνα) του φωνητικού σήματος. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα (Sopran/DeCap), κατέστησε εφικτή την εύρεση των κεντρικών συχνοτήτων και το αντίστοιχο εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών με τη βοήθεια ενός αντίστροφου φίλτρου (Inverse Filtering), προσφέροντας παράλληλα τη δυνατότητα εμφάνισης σε πραγματικό χρόνο του σήματος ροής που προκύπτει όταν χρησιμοποιείται αυτό το φίλτρο.

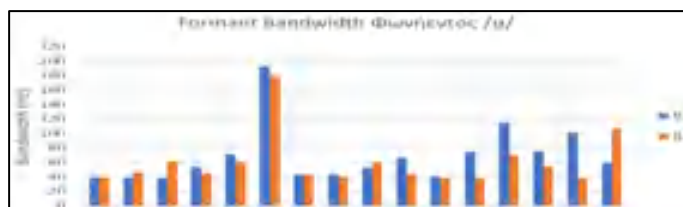
3. Αποτελέσματα

Σύμφωνα με την ανάλυση των μετρήσεων, καταδεικνύεται το σημαντικά «στενότερο» εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών των τραγουδιστών με καταγωγή από τα Χανιά για το φωνήεν /a/ σε σχέση με τους τραγουδιστές από το Ηράκλειο και το Ρέθυμνο. Το «στενότερο» (μικρότερο) εύρος των δύο χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1, B2) των τραγουδιστών από τα Χανιά, «αποτυπώνεται» στο ακόλουθο γράφημα (γράφημα 3.1) σε μορφή ιστογράμματος των μέσων όρων του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών ανά -κρητική- περιοχή.



Γράφημα 3.1 Ταξινομημένο ανά περιοχή (βάσει καταγωγής των τραγουδιστών) ιστόγραμμα του εύρους ζώνης των δύο (2) χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1, B2) με μπλε και πορτοκαλί χρώμα αντίστοιχα, για το φωνήεν /a/.

Ταυτόχρονα οι μετρήσεις, «αποκάλυψαν» το -εμφανώς- μεγαλύτερο (υψηλότερο συχνοτικά) εύρος και για τους δύο υπό εξέταση φωνοσυντονισμούς (B1,B2) ενός (1) Ρεθύμιου τραγουδιστή, αναδεικνύοντας το «έντονο» ένρινο στοιχείο κατά την τραγουδιστική επιτέλεση του φωνήεντος /a/, όπως «αποτυπώνεται» στο γράφημα που ακολουθεί (γράφημα 3.2 επόμενης σελίδας). Στην περίπτωση του Ρεθύμιου τραγουδιστή, φαίνεται να ισχύει το συμπέρασμα προηγούμενης έρευνας σύμφωνα με το οποίο το εύρος ζώνης των φωνοσυντονισμών, σχετίζεται -μεταξύ άλλων- με τη «ρινικότητα» του φωνήεντος (vowel nasality) κατά τη φώνηση [13]. Ειδικότερα, μεταξύ των συμμετεχόντων τραγουδιστών, ο συγκεκριμένος κατά την ηχογράφησή του εμφανίστηκε (όπως ο ίδιος γνωστοποίησε) με κρυολόγημα συνοδεία καταρροής, μη μπορώντας να αναπνεύσει με ευκολία από τη μύτη.



Γράφημα 3.2 Συνολικό ιστόγραμμα του εύρους ζώνης των δύο (2) χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1, B2) με μπλε και πορτοκαλί χρώμα αντίστοιχα, του φωνήεντος /a/, των συμμετεχόντων τραγουδιστών, με την υψηλότερη συχνοτική τιμή για αυτούς (B1, B2) να ανήκουν σε Ρεθύμνιο τραγουδιστή (6^{ος} από δεξιά).

4. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή της τεχνικής του αντίστροφου φιλτραρίσματος η οποία χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα χρήσιμη -επίσης- για την κωδικοποίηση, τη σύνθεση και την τροποποίηση της φωνής [15], έδωσε τη δυνατότητα της «εξαγωγής» του σημαντικού συμπεράσματος του «στενότερου» εύρους ζώνης των δύο χαμηλότερων φωνοσυντονισμών (B1,B2) των τραγουδιστών με καταγωγή από τα Χανιά, κατά τη σύγχρονη εκφορά του ριζίτικου τραγουδιού, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα το «έντονο» ένρινο στοιχείο ενός Ρεθύμνιου τραγουδιστή. Παράλληλα, τα ευρήματα της παρούσας έρευνας φανερώνουν την ιδιαιτερότητα του ηχοχρώματος των τραγουδιστών με καταγωγή από τα Χανιά, κατά την τραγουδιστική εκφορά. Ενδεχομένως, σημαντικό ρόλο σε τούτο, έχει η μουσική παραστατικότητα και η καταγωγή των Χανιωτών τραγουδιστών, η οποία συμπίπτει με αυτή του ριζίτικου τραγουδιού (Χανιά). Ακουστικά, αυτή η ιδιαιτερότητα του ηχοχρώματος οφείλεται στην τραγουδιστική στυλιστική εκφορά τους η οποία παράγει «στενό» εύρος ζώνης στους δύο χαμηλότερους φωνοσυντονισμούς (B1,B2), σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ταυτόχρονα οι συγκεκριμένοι φωνοσυντονισμοί (F1,F2) συμπίπτουν («κουρδίζονται») με τις αρμονικές συχνότητες (Formant Tuning/) για το συγκεκριμένο φωνήεν (/a/), όπως παρουσιάστηκε σε προγενέστερη μελέτη μας [16].

Παρά το ενδεικτικό δείγμα το οποίο συμπεριλήφθηκε στις μετρήσεις συγκροτούμενο από δεκατέσσερις (14) γηγενείς τραγουδιστές της Κρήτης, οι οποίοι εξετάστηκαν κατά την τραγουδιστική επιτέλεση ενός (1) και μοναδικού φωνήεντος (/a/), εντούτοις τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνιστούν μία πρώτη «εικόνα» και μία αξιόπιστη «σκιαγράφιση» του εύρους ζώνης των φωνοσυντονισμών της σύγχρονης Κρητικής τραγουδιστικής φωνής του ριζίτικου τραγουδιού.

5. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας, ευχαριστούν τους δύο Σουηδούς Καθηγητές Dr Johan Sundberg και Dr Svante Granqvist για τις πολύτιμες συμβουλές τους. Επίσης, ευχαριστούμε το Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, για την παραχώρηση του στούντιο ηχογραφήσεων και του τεχνικού εξοπλισμού του. Τέλος, ευχαριστούμε όλους ανεξαιρέτως τους συμμετέχοντες τραγουδιστές της παρούσας εργασίας.

6. Αναφορές

- [1] Sundberg, J., Lindblom, B., Hefele, A.M. “Voice Source, Formant Frequencies and Vocal Tract Shape in Overtone Singing. A Case Study”. *J. Logopedics Phoniatrics Vocology*. **48**(2) pp: 75-87 (2023).
- [2] Bloothoof, G., Bringmann, E., Cappellen, M., Luipen, J.B., Thomasen, K.P. “Acoustics and Perception of Overtone Singing”. *J. Acoust. Soc. Am.* **92**(4) (1992).
- [3] Sundberg, J., La, M.B., Gill, B.P. “Formant Tuning Strategies in Professional Male Opera Singers”. *Journal of Voice*, Vol. **27**, No. 3, pp: 278-288 (2013).
- [4] Sundberg, J. “Articulatory Interpretation of the Singing Formant”, *J. Acoust. Soc. Am.* **55**(4), pp: 838–844, (1974).
- [5] Sundberg, J. “*The Science of the Singing Voice*”. Illinois University Press, Northern Illinois, (1987).
- [6] Δελβινιώτης, Δ. Θεοδωρίδης, Σ. Αμαργιανάκης, Γ. «Σύγκριση των Φωνηέντων της Βυζαντινής Μουσικής με τα Αντίστοιχα της Ομιλίας και του Ανδρικού Οπερατικού Τραγουδιού». *Πρακτικά: 1^ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Μουσικής Έρευνας*, Ινστιτούτο Έρευνας Μουσικής και Ακουστικής (Ι.Ε.Μ.Α), (2001).
- [7] Joliveau, E., Smith, J., Wolfe, J. “Vocal Tract Resonances in Singing: The Soprano Voice,” *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, pp: 2434–2439, (2004).
- [8] Kang, M., Islam, S., Islam, R., Jong-Myon Kim. “Accelerating the Formant Synthesis of Haegeum Sounds Using a General-Purpose Graphics Processing Unit”, *Springer Link, Multimedia Tools Appl.* **75**, pp:15445–15459, (2016).
- [9] Summerfield, Q., Foster, J., Tyler, R. “Influences of Formant Bandwidth and Auditory Frequency Selectivity on Identification of Place of Articulation in Stop Consonants”. Elsevier Science Publishers B.V. (1985).
- [10] Vincelas, L. “*Formant Bandwidth and Resilience of Speech to Noise*”. Master Thesis, ENS - Laboratoire Psychologie de la Perception - Hearing Group, Université Paris Descartes, Paris (2011).
- [11] Park, H. “Time Course of the First Formant Bandwidth”. *Linguistic Society of America*, **28**, pp: 213-224, (2002).
- [12] Peeters, W.J.M. “*Diphthong Dynamics: A Cross-Linguistic Perceptual Analysis of Temporal Patterns in Dutch, English, and German*”. PhD Thesis, The University of Utrecht, The Netherlands, Utrecht (1991).
- [13] Khodai-Joopari. M, Clermont, F. “A Comparative Study of Empirical Formulae for Estimating Vowel-Formant Bandwidths”. *Proceedings of the 9th Australian International Conference on Speech Science & Technology Melbourne*, Australian Speech Science & Technology Association Inc. (2002)
- [14] Harrison, P.T. “*Making Accurate Formant Measurements: An Empirical Investigation of the Influence of the Measurement Tool, Analysis Settings and Speaker on Formant Measurements*”. PhD Thesis, University of York, UK, (2013).
- [15] Kafentzis, P.G. “*On the Inverse Filtering of Speech*”. Master of Science Thesis, Department of Computer Science, University of Crete, Heraklion (2010).
- [16] Kalozakis, S., Georgaki, A., Kouroupetoglou, G. “Formant Tuning in Cretan Ritzitiko Singing”. *Proceedings of the 12th International Workshop on Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications*, MAVIBA, Firenze, Italy, pp:127-130, (2021). <https://doi.org/10.36253/978-88-5518-449-6>



Εφαρμογές σοβαρών παιχνιδιών στη συλλογή και συναισθηματική επισημείωση δειγμάτων ομιλίας

Ματσουλιάδης Λάζαρος^{1*}, Χαδέλλης Λουκάς², Δημούλας Χαράλαμπος³

^{1*} matsouliadis.l@gmail.com (υπεύθυνου)

² lukehdlls@gmail.com

³ c.a.dimoulas@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στον τομέα των σοβαρών παιχνιδιών, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας Αναγνώρισης Συναισθημάτων Ομιλίας (Speech Emotion Recognition – SER) παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη οδό για τη βελτίωση της συλλογής δεδομένων και την ενίσχυση της διαδραστικότητας των χρηστών. Αυτή η εργασία εξερευνά τις δυνατότητες των σοβαρών παιχνιδιών με δυνατότητα SER να συλλέγουν πλούσια δεδομένα ομιλίας από τους παίκτες, συμβάλλοντας στην πρόοδο τόσο της τεχνολογίας SER όσο και της ανάπτυξης σοβαρών παιχνιδιών.

Η έρευνα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη δύο διαφορετικών εφαρμογών σοβαρών παιχνιδιών ειδικά σχεδιασμένων για τη συλλογή δεδομένων χροιάς φωνής. Αυτά τα παιχνίδια, που δημιουργήθηκαν με χρήση της Unreal Engine 5, παρέχουν εμπειρίες παιχνιδιού, ενώ ταυτόχρονα καταγράφουν τις συναισθηματικές εκφράσεις των παικτών μέσω της ομιλίας τους.

Η ενσωμάτωση SER σε σοβαρά παιχνίδια προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Πρώτον, διευκολύνει τη συλλογή ποικίλων δεδομένων ομιλίας, τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας SER. Δεύτερον, βελτιώνει την εμπειρία του χρήστη επιτρέποντας στα παιχνίδια να προσαρμόζονται και να ανταποκρίνονται στις συναισθηματικές καταστάσεις των παικτών, δημιουργώντας πιο εξατομικευμένη εμπειρία για κάθε χρήστη.

Πέρα από την ενσωμάτωση SER, η εργασία εστιάζει και στην υλοποίηση προηγμένης τεχνολογίας ήχου, αξιοποιώντας χωρικό ήχο (spatial sound), φαινόμενο Ντόπλερ (Doppler Effect), την διφωνικότητα του ήχου (Binaural) και μηχανισμούς τρισδιάστατης ηχητικής τοποθέτησης (3D sound). Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων συμβάλλει στην υλοποίηση ρεαλιστικών ηχητικών περιβαλλόντων, ενισχύοντας την αίσθηση παρουσίας και την συναισθηματική σύνδεση των παικτών με το παιχνίδι.

Αυτή η εργασία αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα των σοβαρών παιχνιδιών με την δυνατότητα SER ως εργαλείο για τη συλλογή δεδομένων και την ενίσχυση της διαδραστικότητας με τους χρήστες. Οι εφαρμογές παιχνιδιών που αναπτύχθηκαν και η υλοποίηση των τεχνολογιών ήχου ανοίγουν τον δρόμο για το μέλλον του σχεδιασμού παιχνιδιών, όπου η συναισθηματική νοημοσύνη και η ρεαλιστική ηχητική εμπειρία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη δημιουργία παιχνιδιών με βαθύτερη απήχηση στους χρήστες και αισθητή επίδραση στην ψυχολογία και τη συμπεριφορά τους.

Applications of serious games in the collection and emotional labeling of speech samples

ABSTRACT

In the field of serious games, the integration of Speech Emotion Recognition (SER) technology presents a promising avenue for improving data collection and enhancing user interactivity. This research explores the potential of serious games integrated with SER technology to gather rich speech data from players, contributing to advancements in both SER technology and the development of serious games.

The research presented in this paper focuses on the design and development of two distinct serious game applications specifically tailored for collecting voice tone data. These games, created using Unreal Engine 5, provide engaging gameplay experiences while simultaneously capturing players' emotional expressions through their speech.

The integration of SER into serious games offers a multitude of advantages. Firstly, it facilitates the collection of diverse speech data, which is essential for the advancement of SER technology. Secondly, it enhances the user experience by allowing games to adapt and respond to players' emotional states, creating a more personalized experience for each user.

Beyond SER integration, the research also focuses on implementing advanced audio technology, utilizing spatial audio, Doppler, binaural, and 3D sound positioning mechanisms. The incorporation of these elements contributes to the creation of realistic sound environments, enhancing the sense of presence and emotional connection of players to the game.

This research demonstrates the effectiveness of serious games integrated with SER technology as a tool for data collection and enhancing user interactivity. The developed game applications and the implementation of audio technologies pave the way for the future of game design, where emotional intelligence and realistic audio experiences play a pivotal role in creating video games with a deeper impact on users and a noticeable effect on their psychology and behavior.

Εισαγωγή

Η διεπαφή ανθρώπου-υπολογιστή έχει εξελιχθεί ραγδαία χάρη στην τεχνητή νοημοσύνη, με την αναγνώριση συναισθημάτων να αποτελεί κεντρικό άξονα. Η εργασία αυτή εξερευνά τη χρήση σοβαρών παιχνιδιών ως εργαλείο για τη συλλογή δεδομένων φωνής και την ανάπτυξη μοντέλων αναγνώρισης συναισθημάτων.

Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν δύο παιχνίδια, το “Silent Kingdom” και το “Job Interview Simulator”, με στόχο να καταγράψουν μια ποικιλία συναισθηματικών εκφράσεων, όπως χαρά, θυμός, φόβος, λύπη και αηδία. Το “Silent Kingdom” είναι δομημένο έτσι ώστε να ζητάει την εκφορά όλων των συναισθημάτων σε μια ήδη προκαθορισμένη ιστορία που πάντα εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο. Σε αντίθεση το “Job Interview Simulator” δεν υπάρχει κάποια απαίτηση

εκφοράς συγκεκριμένου συναισθήματος, έτσι εξελίσσεται βασισμένο στις εκφορές του παίκτη.

Η εργασία αυτή αποτελεί ένα βήμα προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης τεχνολογιών που μπορούν να κατανοούν και να ανταποκρίνονται στα ανθρώπινα συναισθήματα, ανοίγοντας νέους ορίζοντες για την αλληλεπίδραση ανθρώπου – υπολογιστή [1][2].

1. Ανάλυση συναισθημάτων ομιλίας μέσω Unreal Engine

Η ανάλυση της ομιλίας γίνεται μέσω της βάσης δεδομένων Acted Emotional Speech Dynamic Database (AESDD) μέσω Cloud, μετά από εξαγωγή των αρχείων .wav από την Unreal Engine, μετά την ανάλυση εισάγονται τα αποτελέσματα στην Unreal Engine που φέρουν την συνέχεια στην ιστορία στα δύο παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχεδιάγραμμα. Στην πραγματικότητα ο έλεγχος αυτός χρειάζεται 16 δευτερόλεπτα ώστε να γίνει η μεταφόρτωση του αρχείου .wav όπως βλέπουμε στο σχήμα (1.1)[3].



Σχήμα 1.1 Σχεδιάγραμμα ροής επικοινωνίας AESDD με Unreal Engine

Αναλυτικότερα, η καθυστέρηση έχει εισαχθεί στον κώδικα ως χρόνος ασφάλειας, ώστε να έχει μεταφορτωθεί το αρχείο και να έχει εισαχθεί το αποτέλεσμα πριν τον έλεγχο για αποφυγή προβλημάτων.

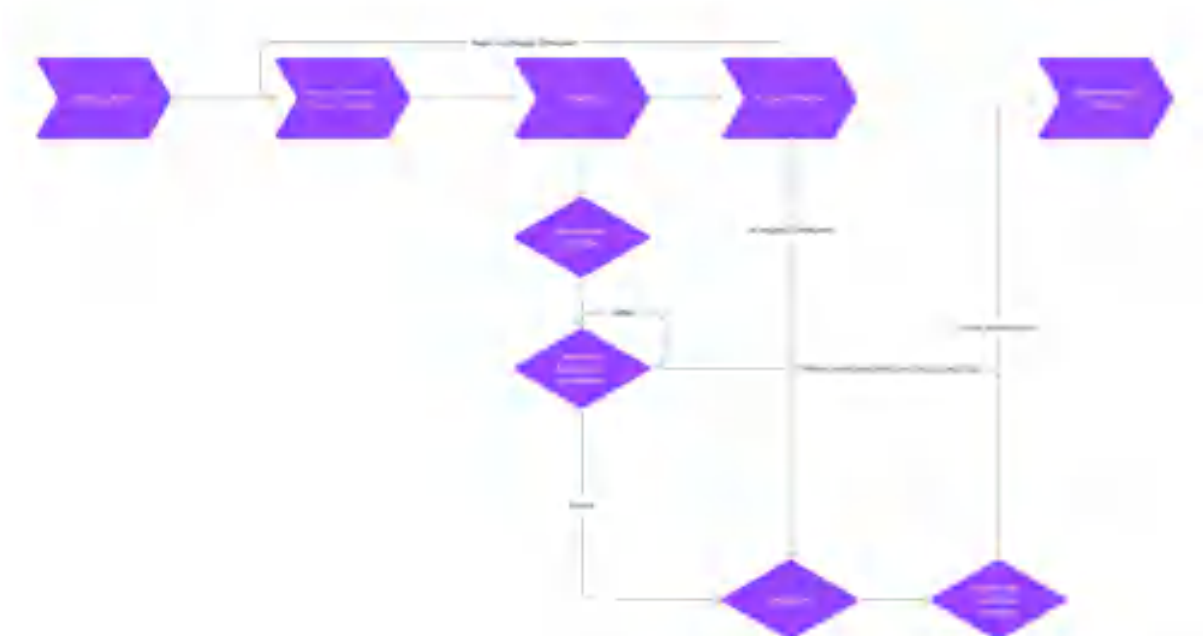
2. Σχεδιασμός – Υλοποίηση των παιχνιδιών

Με την ανάπτυξη δύο διαφορετικών βιντεοπαιχνιδιών, καλύπτονται ποικιλόμορφες προτιμήσεις, γεγονός που διευρύνει το κοινό των παικτών. Στο παιχνίδι πλατφόρμας (Silent Kingdom), η προσέγγιση είναι πιο κλασική (Arcade) ο παίκτης έχει ζωές και υπάρχουν πίστες. Επικεντρώνεται στην κίνηση του παίκτη στον χώρο, στην αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, του ζητείται του παίκτη συγκεκριμένη εκφορά συναισθημάτων για να προχωρήσει την ιστορία στο παιχνίδι, και την αντιμετώπιση των εχθρών. Από την άλλη, το παιχνίδι προσομοίωσης (Job Interview Simulator) απευθύνεται σε εκείνους που απολαμβάνουν τα παιχνίδια ρόλων, τη λήψη αποφάσεων και την εξερεύνηση σεναρίων της καθημερινής ζωής, όπως και

δεν του ζητείται συγκεκριμένη εκφορά συναισθημάτων, προσφέροντας μια πιο ρεαλιστική εμπειρία[4].

2.1 Σχεδιασμός Silent Kingdom

Το παιχνίδι αυτό ανήκει στο είδος των 2D περιπετειών πλατφόρμας. Ο παίκτης πρέπει να χρησιμοποιήσει την ικανότητά του να κινείται για να ξεπεράσει διάφορα εμπόδια που συναντά. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να αμυνθεί και να επιτεθεί σε ενδεχόμενους εχθρούς που μπορεί να βρεθούν μπροστά του. Ο στόχος του παιχνιδιού είναι να καταφέρει ο παίκτης, μέσω της έκφρασης συναισθημάτων, να διδάξει στους μη παίζοντες χαρακτήρες πώς να εκφράζουν τα αντίστοιχα συναισθήματα. Παρακάτω φαίνεται η εμπειρία του χρήστη σχήμα (2.2).



Σχήμα 2.2 Εμπειρία του παίκτη (User Experience – UX) στο Silent Kingdom

2.2 Υλοποίηση Silent Kingdom

Οι χαρακτήρες στο Silent Kingdom είναι συνολικά 7, εκ των οποίων οι 6 είναι μη παίζοντες χαρακτήρες (NPC) που ενεργοποιούνται μόνο όταν ο παίκτης τους πλησιάσει. Αυτά τα NPC παρέχουν αποστολές για τον παίκτη, λειτουργώντας με προκαθορισμένα πρότυπα συμπεριφοράς. Τα NPC αλληλοεπιδρούν με τον παίκτη μέσω διαλόγων, όπου ο παίκτης ηχογραφεί τις απαντήσεις του και αυτές ελέγχονται με την βάση δεδομένων AESDD. Στο παιχνίδι υπάρχουν στοιχεία καθοδήγησης, όπως τα αστέρια που οδηγούν τον παίκτη και κινούμενες πλατφόρμες που προσθέτουν στοιχεία παζλ. Οι ακίδες προσθέτουν δυσκολία, προκαλώντας ζημιά στον παίκτη.

Η τεχνητή νοημοσύνη των NPC βασίζεται σε δέντρα συμπεριφοράς (behavior trees) που περιλαμβάνουν κόμβους εργασίας, όπως η τυχαία κίνηση και η επίθεση του «ακοντιστή». Ο «ακοντιστής» κινείται τυχαία εντός μια καθορισμένης περιοχής και όταν ο παίκτης πλησιάσει, ενεργοποιείται η επίθεση του, με σφαίρα ανίχνευσης που προκαλεί ζημιά αν έρθει σε επαφή με τον παίκτη. Το σύστημα δέντρου συμπεριφοράς επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων και ευέλικτων συμπεριφορών για τους χαρακτήρες τεχνητής νοημοσύνης, διευκολύνοντας τη διαδικασία ανάπτυξης του παιχνιδιού.

2.3 Σχεδιασμός Job Interview Simulator

Το “Job Interview Simulator” είναι ένα τρισδιάστατο παιχνίδι προσομοίωσης πρώτου προσώπου, σχεδιασμένο να καταγράφει και να αναλύει τη φωνητική χροιά του παίκτη. Ο παίκτης εισέρχεται σε μια εταιρεία όπου συναντά την γραμματέα, η οποία τον ενημερώνει για τον σκοπό της επίσκεψης: να συμμετάσχει σε μια συνέντευξη για εύρεση εργασίας.

Καθώς διασχίζει τον χώρο της εταιρείας, ο παίκτης ακούει τους υπαλλήλους να εργάζονται και να μιλούν με αμφιωτική ακοή, προσθέτοντας ρεαλισμό στην εμπειρία. Στη συνέχεια, επικοινωνεί με τον διευθυντή της εταιρείας, και η συνέντευξη ξεκινά με μια σειρά ερωτήσεων που έχουν ως στόχο την εκφορά συναισθημάτων του παίκτη. Οι απαντήσεις του παίκτη αξιολογούνται με κρυφό σκορ με βάση την σωστή ή λανθασμένη εκφορά των συναισθημάτων. Στο σχήμα (2.3) βλέπουμε την εμπειρία του παίκτη.



Σχήμα 2.3 Εμπειρία του παίκτη (User Experience – UX) στο Job Interview Simulator

2.4 Υλοποίηση Job Interview Simulator

Η δημιουργία των χαρακτήρων έγινε με τρισδιάστατα μοντέλα που προέρχονται από την κοινότητα της Unreal Engine, εξασφαλίζοντας ρεαλισμό και αποδοτικότητα στην χρήση των διαθέσιμων πόρων του υπολογιστή. Στον προγραμματισμό του παιχνιδιού, δεν υπάρχει τεχνητή νοημοσύνη, με αποτέλεσμα οι αυτόματες εκκινήσεις γεγονότων να ενεργοποιούνται μέσω αυτοματισμών και “trigger boxes”, επιτρέποντας στους διαλόγους και τις αλληλεπιδράσεις να προχωρούν χωρίς άμεσες

ενέργειες από τον παίκτη. Ο παίκτης έχει την ελευθερία να εκφράσει ό,τι επιθυμεί κατά τη διάρκεια της συνέντευξης, χωρίς το παιχνίδι να ζητά συγκεκριμένα συναισθήματα ή απαντήσεις, γεγονός που προσφέρει μια πιο αυθεντική και φυσική εμπειρία αλληλεπίδρασης.

Όσο αφορά την εφαρμογή της αμφιωτικής ακοής, η Unreal Engine 5 ενσωματώνει προηγμένες λειτουργίες αμφιωτικής ακοής, που επιτρέπουν στους προγραμματιστές να δημιουργούν ρεαλιστικά ηχητικά τοπία που αναπαράγουν τον ήχο όπως θα ακουγόταν από ανθρώπινα αυτιά. Μέσω της συλλογής συναρτήσεων HRTF (Head Related Transfer Function), η Unreal Engine 5 προσομοιώνει τις ακουστικές παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στους χρήστες μια ακριβή αναπαράσταση του ηχητικού περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι οι ήχοι δεν χρειάζεται να έχουν ηχογραφηθεί με την τεχνική αμφιωτικής ηχογράφησης, καθώς η Unreal Engine μπορεί να προσαρμόσει τον ήχο δυναμικά, ανάλογα με τη θέση και τις κινήσεις του παίκτη. Επιπλέον, η Unreal Engine παρέχει ένα ισχυρό σύστημα διαχείρισης ήχου που περιλαμβάνει καμπύλες εξασθένησης, ρυθμίσεις αντήχησης και εφέ ηχοαπορρόφησης, διευκολύνοντας τη δημιουργία ρεαλιστικών ηχητικών αποτελεσμάτων, όπως βλέπουμε στο σχήμα (2.4)[5].



Σχήμα 2.4 Ρύθμιση καμπύλης εξασθένησης και τοποθέτησης του ήχου στον χώρο

3. Αποτελέσματα αξιολόγησης

Η συμμετοχή στα ερωτηματολόγια ήταν προαιρετική και ανώνυμη, με συνολικά 11 συμμετέχοντες και στα δύο παιχνίδια. Τα γραφήματα παρουσίασαν την ηλικιακή κατανομή των συμμετεχόντων, όπου οι περισσότεροι ήταν 26–30 ετών, με συμμετοχή από 18–25 ετών μόνο στο Silent Kingdom. Το μεγαλύτερο ποσοστό των χρηστών είχε τριτοβάθμια εκπαίδευση, ενώ δεν υπήρχε συμμετοχή από τα χαμηλότερα επίπεδα εκπαίδευσης.

Περισσότεροι από τους συμμετέχοντες ήταν ήδη έμπειροι με τα ηλεκτρονικά παιχνίδια, γεγονός που επηρεάζει τα ποσοστά δυσκολίας. Ο χρόνος παιχνιδιού ήταν μεγαλύτερος στο Silent Kingdom σε σύγκριση με το Job Interview Simulator, ενώ οι χρήστες δεν εντυπωσιάστηκαν με τα γραφικά του Silent Kingdom, τα οποία ήταν λιγότερο ρεαλιστικά. Σε γενικές γραμμές, κανένα από τα δύο παιχνίδια δεν ήταν πολύ δύσκολο, με 90.9% των συμμετεχόντων να τερματίζουν και τα δύο παιχνίδια.

Το Silent Kingdom είχε αυξημένα ποσοστά δυσκολίας όσον αφορά το χειρισμό, ενώ στο Job Interview Simulator παρατηρήθηκε απλοποίηση. Όσον αφορά την προτεινόμενη εμπειρία, το 100% των χρηστών του Silent Kingdom θα το πρότεινε, σε αντίθεση με το 90.9% του Job Interview Simulator. Και τα δύο παιχνίδια κατέγραψαν 100% ευχάριστης εμπειρίας, ενώ το Silent Kingdom θεωρήθηκε πολύ καλή εμπειρία από 18.2% των χρηστών, ενώ στο Job Interview Simulator το 27.3% το αξιολόγησε ως πάρα πολύ καλή.

Τέλος, υπήρξαν σχόλια που ανέφεραν ότι το Silent Kingdom ήταν διασκεδαστικό αλλά εύκολο, ενώ στο Job Interview Simulator προτάθηκε η προσθήκη επιλογών θεμάτων συνέντευξης.

4. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις

Η εργασία έχει ως σκοπό την ενσωμάτωση της αναγνώρισης συναισθημάτων ομιλίας σε πραγματικό χρόνο σε βιντεοπαιχνίδια. Αυτή η ενσωμάτωση ανοίγει νέες δυνατότητες για τη δημιουργία καθηλωτικών παιχνιδιών, συλλέγοντας δεδομένα φωνητικής χροιάς, που συμβάλλουν στη βελτίωση των μοντέλων αναγνώρισης συναισθημάτων. Τα βιντεοπαιχνίδια αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο συλλογής δεδομένων, καθώς προσφέρουν ψυχαγωγία ενώ διευκολύνουν τη συμμετοχή στην έρευνα.

Η εργασία είναι διαθεματική, με πολλές περιοχές που μπορούν να βελτιωθούν. Μία από τις προκλήσεις είναι η καθυστέρηση 16 δευτερολέπτων κατά την ηχογράφηση, η οποία οφείλεται στις τρέχουσες ταχύτητες διαδικτύου. Για το Silent Kingdom, προτείνεται η προσθήκη περισσότερων επιπέδων, αποστολών και κινδύνων, καθώς και η εμπλουτισμένη ιστορία για μεγαλύτερη συλλογή ηχητικών δεδομένων. Στο Job Interview Simulator, θα μπορούσαν να προστεθούν εξειδικευμένα θέματα με δυνατότητα επιλογής επαγγέλματος και περισσότερες ερωτήσεις και χαρακτήρες για τη συλλογή ηχητικών δεδομένων.

Τέλος, η δυνατότητα επισημείωσης δειγμάτων ομιλίας και η ανάπτυξη της βάσης δεδομένων (Acted Emotional Speech Dynamic Database – AESDD) θα μπορούσαν να βελτιώσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων όπως και δεδομένου ότι πολλά στοιχεία του λόγου λειτουργούν ανεξάρτητα από τη σημασιολογία ή το πολιτισμικό πλαίσιο, αυτή η τεχνική θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα[6].

5. Αναφορές

- [1] Ayadi, M. M. H. E., Kamel, M. S., & Karray, F. (2011). Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases. *Pattern Recognition*, 44(3), 572–587. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.09.020>
- [2] Li, W., Zhang, Y., & Fu, Y. (2007). Speech Emotion Recognition in E-learning System Based on Affective Computing. <https://doi.org/10.1109/icnc.2007.677>
- [3] Vryzas, N., Kotsakis, R., Liatsou, A., Dimoulas, C., & Kalliris, G. (2018). Speech Emotion Recognition for Performance Interaction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 66(6), 457–467. <https://doi.org/10.17743/jaes.2018.0036>
- [4] Scharping, N. (2022, August 15). *Gaming for Science: How Video Games Are Making Research Fun*. Discover Magazine. <https://www.discovermagazine.com/technology/gaming-for-science-how-video-games-are-making-research-fun>
- [5] Xu, X., Zhou, H., Liu, Z., Dai, B., Wang, X., & Lin, D. (2021). *Visually Informed Binaural Audio Generation without Binaural Audios*. <https://doi.org/10.1109/cvpr46437.2021.01523>
- [6] Hudlicka, E. (2003). To feel or not to feel: The role of affect in human–computer interaction. In *International journal of human-computer studies* (Vol. 59, Issues 1–2, pp. 1–32). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s1071-5819\(03\)00047-8](https://doi.org/10.1016/s1071-5819(03)00047-8)



Η Επίδραση της Οπτικής Επαφής στη Δικτυακή Μουσική Εκτέλεση

Κωνσταντίνος Τσιούτας*, Κωνσταντίνος Τσάμης, Χρυσούλα Αλεξανδράκη
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής,
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Ε. Δασκαλάκη Περιβόλια
741 33, Ρέθυμνο
*ktsioutas@hmu.gr (υπεύθυνου)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη Δικτυακή Μουσική Εκτέλεση (ΔΜΕ), δηλαδή την εκτέλεση μουσικής μέσω δικτύου υπολογιστών, το κυρίαρχο μέσο επικοινωνίας είναι ο ήχος, ενώ η ηχητική καθυστέρηση είναι το βασικότερο θέμα στην έρευνα κι ανάπτυξη γύρω από το θέμα αυτό. Ωστόσο υπάρχουν ερευνητικές πρωτοβουλίες, αν και ελάχιστες, που εξετάζουν το ρόλο της οπτικής επαφής κατά τη ΔΜΕ. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην αναγκαιότητα και την επίδραση της οπτικής επαφής στο μουσικό που συμμετέχει σε μια συνεδρία ΔΜΕ. Οκτώ μουσικοί αλληλοεπίδρασαν μέσω τοπικού δικτύου, με ελεγχόμενες συνθήκες καθυστέρησης και οπτικής επαφής. Οι μουσικοί απάντησαν ερωτηματολόγια σχετικά με την εμπειρία τους, ενώ έγινε και καταγραφή με βίντεο με σκοπό την εξαγωγή συναισθηματικής πληροφορίας από τις εκφράσεις τους. Από την ανάλυση των ερωτηματολογίων προέκυψαν ευρήματα που δείχνουν ότι η οπτική επαφή είναι χρήσιμη στη ΔΜΕ αλλά μπορεί να δημιουργήσει και φαινόμενα σύγχυσης στους μουσικούς. Επιπλέον η ανάλυση των καταγραφών βίντεο δεν ανέδειξε στοιχεία που να οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οπτική επαφή βελτιώνει την εμπειρία των μουσικών.

The Influence of Visual Contact in Network Music Performance

ABSTRACT

In Network Music Performance (NMP), that is when two or more musicians perform via computer networks, the most important communication channel is the auditory one. Audio latency and how to compensate it is a fundamental issue of research in this domain. Nevertheless, a small number of research initiatives investigate the role of visual contact in NMP. The present study focuses on assessing whether visual contact is necessary and how it influences the experience of musicians during NMP. Eight musicians interacted over a Local Area Network, using simulated amounts of latency to compare the experience of musicians between two conditions,

i.e. with and without visual contact. The musicians answered questionnaires about their experience, while their faces were video recorded to extract emotional information about their experience. The analysis of the questionnaires revealed that visual contact is useful in NMP, but may also create confusion for musicians. Furthermore, the analysis of the video recordings does not provide any evidence proving that visual contact improves the experience of musicians.

Εισαγωγή

Ως Δικτυακή Μουσική Εκτέλεση (ΔΜΕ) θεωρείται η διαδικασία κατά την οποία δύο ή περισσότεροι μουσικοί συνεργάζονται μέσω Διαδικτύου, ο καθένας από το χώρο του, κάνοντας χρήση του υπολογιστή του και κατάλληλης εφαρμογής για τη ηχητική επικοινωνία [1]. Καθοριστικός παράγοντας στην επίτευξη της αποτελεσματικής επικοινωνίας κατά τη ΔΜΕ είναι η καθυστέρηση του δικτύου η οποία επηρεάζει έντονα το συγχρονισμό των μουσικών, καθώς όσο η καθυστέρηση αυξάνεται οι μουσικοί επιβραδύνουν το τέμπο της μουσικής τους εκτέλεσης, σε μια προσπάθεια να συγχρονιστούν. Σχετικές μελέτες καταδεικνύουν ότι όταν η καθυστέρηση στην ηχητική επικοινωνία ξεπερνά το όριο των 30ms από τον ένα μουσικό στον άλλο, ο συγχρονισμός καθίσταται είναι αδύνατος [2] [3] [4].

Πολυάριθμες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο της ΔΜΕ με υλοποιήσεις λογισμικών, αλλά και έρευνες μελέτης των παραγόντων επηρεάζουν τόσο την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) [5] [6], όσο και την ποιότητα της εμπειρίας (QoE) των μουσικών [7]. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος των ερευνών εστιάζουν στη μελέτη της επίδρασης της καθυστέρησης του ήχου στο μουσικό τέμπο.

Εντούτοις, υπάρχουν ερευνητικές πρωτοβουλίες, αν και ελάχιστες που εστιάζουν στην αναγκαιότητα και την επίδραση της οπτικής επαφής κατά τη διεξαγωγή μιας συνεδρίας ΔΜΕ. Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει ένα κύκλο πειραμάτων που είχαν ως στόχο να διερευνήσουν την αναγκαιότητα της οπτικής επαφής στη ΔΜΕ καθώς και στην επίδραση της στην εμπειρία του μουσικού.

1. Σχετικές μελέτες

Η οπτική επαφή μεταξύ των μουσικών κατά τη συνεργατική μουσική εκτέλεση διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο συγχρονισμό των μουσικών. Παρόλο που υπάρχουν ενδείξεις ότι μουσικοί βασίζονται κατά κύριο λόγο στο ακουστικό κανάλι προκειμένου να συγχρονιστούν [8] [9] το οπτικό κανάλι αποτελεί σημαντικό δίαυλο επικοινωνίας ειδικά όταν η απόσταση μεταξύ των μουσικών ξεπερνά κάποια όρια. Έτσι στη περίπτωση ενός ακουστικού ντουέτου μουσικών που συν-εκτελούν ευρισκόμενοι στον ίδιο χώρο και σε μικρή απόσταση μεταξύ τους της τάξεως των 2 έως 3 μέτρων, η καθυστέρηση στη μετάδοση του ήχου υπολογίζεται στα $2\mu/343\mu/\text{sec} = 5,8 \text{ ms}$ και δεν γίνεται αντιληπτή από την/τον μέσο μουσικό. Στην περίπτωση όμως μιας ορχήστρας η οπτική επαφή με τον μαέστρο είναι καθοριστική για τον συγχρονισμό των μουσικών [10].

Πολλές έρευνες εξετάζουν το ρόλο της οπτικής επαφής αλλά και των οπτικών ενδείξεων (visual cues) στη μουσική εκτέλεση που διεξάγεται με το συμβατικό τρόπο, δηλαδή στον ίδιο φυσικό χώρο. Έχει βρεθεί ότι συγχρονισμός μεταξύ δύο μουσικών

βελτιώνεται σημαντικά όταν αυτοί έχουν οπτική επαφή [11][12]. Επιπλέον παρουσία κοινού, η προσθήκη οπτικών στοιχείων όπως οι χειρονομίες και οι εκφράσεις του προσώπου επηρεάζουν θετικά την αντίληψη των ακροατών και τη συναισθηματική τους σύνδεση με τους μουσικούς [13][14] [15]. Ερευνητές, [16] βρήκαν σημαντικές ενδείξεις ότι η απόδοση των μουσικών ενός συγκροτήματος βελτιώνεται λόγω της οπτικής επαφής και ότι η ύπαρξη μαέστρου βελτιώνει τη μουσική ερμηνεία. Σε αντίθεση με τις παραπάνω έρευνες, έχουν βρεθεί ενδείξεις ότι η οπτική επαφή μπορεί να αποσταθεροποιήσει τη ρυθμική αλληλοεπίδραση δύο ανθρώπων [17].

2. Μεθοδολογία

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση της οπτικής επαφής (εφεξής *OE*) στην εμπειρία του μουσικού (*QoE*) κατά τη ΔΜΕ, χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων καθώς και τις μεθόδους *between subjects* και *within subjects* [18]. Για τη συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν αφενός ερωτηματολόγια για την υποκειμενική αξιολόγηση αλλά και μέθοδοι εξαγωγής συναισθηματικής πληροφορίας με χρήση εργαλείων μηχανικής μάθησης, μέσω ανάλυσης των εκφράσεων των προσώπων των μουσικών για την αντικειμενική αξιολόγηση.

Οκτώ μουσικοί συμμετείχαν στα πειράματα ανά δύο, δηλαδή το πείραμα αφορούσε σε τέσσερα ντουέτα. Οι μουσικοί κλήθηκαν να παίζουν μέσω τοπικού δικτύου με και χωρίς *OE*, με χρήση συνδεδεμένων καμερών και οθονών. Για την αποφυγή παρερμηνειών στα αποτελέσματα του πειράματος, υιοθετήθηκε η μέθοδος *between subjects*. Πιο συγκεκριμένα, τα μισά ντουέτα μουσικών έπαιζαν πρώτα χωρίς *OE* και έπειτα με *OE* και τα άλλα μισά με τον αντίθετο τρόπο.

Πίνακας 1: Τιμές καθυστέρησης από άκρο σε άκρο (*M2E*) ανά επανάληψη και ανά συνθήκη *OE*

<i>OE</i>	Επανάληψη	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η
Όχι	Καθ/ση (ms)	22	32	12	42	62	72	52
Ναι	Καθ/ση (ms)	32	42	12	72	52	62	22

Για κάθε συνθήκη (με *OE* και χωρίς *OE*), οι μουσικοί εκτέλεσαν επτά επαναλήψεις διάρκειας ενός περίπου λεπτού, και με τις τιμές τεχνητής δικτυακής καθυστέρησης που παρατίθενται στον Πίνακα 1. Για αποφυγή φαινομένων *bias* η καθυστέρηση δεν τέθηκε αυξητικά ανά επανάληψη αλλά με τυχαία σειρά όπως φαίνεται στον πίνακα. Έπειτα από κάθε επανάληψη οι μουσικοί απάντησαν το ερωτηματολόγιο που τους δόθηκε το οποίο περιλάμβανε πέντε ερωτήσεις, ώστε να ελαχιστοποιηθούν φαινόμενα κόπωσης που αναμένονταν λόγω επαναλαμβανόμενων πειραμάτων [22].

Οι απαντήσεις δόθηκαν στη κλίμακα Likert (1 = Καθόλου, 5 = Πάρα πολύ), ενώ οι ερωτήσεις που τέθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

1. Αξιολογήστε κατά πόσο σας άρεσε αυτή η επανάληψη;
2. Αξιολογήστε σε ποιο βαθμό αντιληφθήκατε καθυστέρηση στον ήχο;
3. Αξιολογήστε σε ποιο βαθμό είχατε συγχρονισμό με τον άλλο μουσικό;

4. Αξιολογήστε κατά πόσο προσπαθήσατε να ακολουθήσετε τον συνάδελφό σας στον ρυθμό;
5. Που επικεντρωθήκατε πιο πολύ στην εικόνα ή στον ήχο; (1 = Εικόνα, 5 = Ήχο) (Η ερώτηση τέθηκε για την συνθήκη με ΟΕ)

Κατόπιν της ολοκλήρωσης των πειραμάτων, ζητήθηκε από τους μουσικούς να απαντήσουν σε μια τελευταία ερώτηση:

6. Στη Διαδικτυακή Μουσική Εκτέλεση η οπτική επαφή βοηθάει πάρα πολύ» (1 = Διαφωνώ απόλυτα, 5 = Συμφωνώ απόλυτα).

3. Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, στην πόλη του Ρεθύμνου, σε δύο διαφορετικούς εργαστηριακούς χώρους.

Σε κάθε εργαστήριο βρισκόταν ο ένας από τους δύο μουσικούς μαζί με τους χειριστές των υπολογιστών και τους μηχανικούς ήχου. Επιπλέον οι υπολογιστές των δύο εργαστηρίων ήταν συνδεδεμένοι με το τοπικό δίκτυο του πανεπιστημίου που διαθέτει σύνδεση Gigabit Ethernet και επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιωτικές/εσωτερικές διευθύνσεις IP.

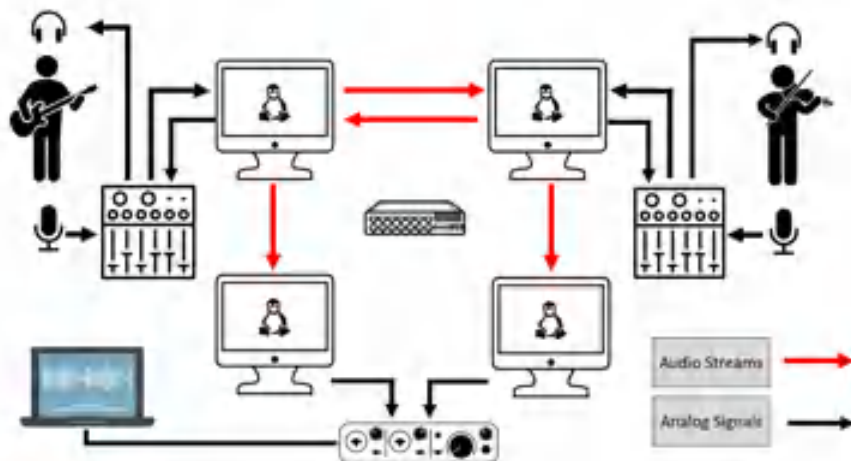
3.1 Μετάδοση και καταγραφή Ήχου

Οι δρομολογήσεις και οι μίξεις ήχου σε κάθε εργαστήριο έγιναν με τη χρήση των μικροφωνικών μикτων οκτώ καναλιών. Για τη σύλληψη του ήχου χρησιμοποιήθηκαν δυναμικά μικρόφωνα και για την ακρόαση ακουστικά κλειστού τύπου. Ο κάθε μουσικός άκουγε τον προσωπικό του ήχο, όχι απευθείας από τον μίκτη, αλλά μέσω της λειτουργίας *monitoring* του λογισμικού Jacktrip¹. Συνεπώς ο κάθε μουσικός είχε μια μικρή καθυστέρηση (μικρότερη των 10 ms) για να ακούσει τον δικό του ήχο.

Η μετάδοση του ήχου από μουσικό σε μουσικό έγινε μέσω του Jacktrip με χρήση εντολών στο λειτουργικό σύστημα Linux. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις υπολογιστές, δύο για την αμφίδρομη ανταλλαγή ηχητικών ροών μεταξύ των δύο μουσικών και άλλοι δύο για τη λήψη της ροής του κάθε μουσικού ξεχωριστά (Εικόνα 1). Οι υπολογιστές λήψης με τη σειρά τους δρομολογούσαν τις μονοφωνικές ηχητικές ροές του κάθε μουσικού στα δύο κανάλια της κάρτας ήχου (Εικόνα 2) η οποία ήταν συνδεδεμένη με φορητό υπολογιστή όπου γινόταν καταγραφή των ροών με το λογισμικό Cubase² σε δύο ξεχωριστά μονοφωνικά κανάλια.

¹ <https://ccrma.stanford.edu/software/jacktrip/>

² <https://www.steinberg.net/cubase/>



Εικόνα 1 Πειραματική διάταξη μετάδοσης και καταγραφής ήχου. Με τα κόκκινα βέλη απεικονίζονται οι δικτυακές ροές ήχου ενώ με τα μαύρα βέλη τα αναλογικά σήματα ήχου. Στο κέντρο υπάρχει ένας μεταγωγέας ο οποίος υποδηλώνει το δίκτυο Gigabit Ethernet του πανεπιστημίου. Οι δικτυακές συνδέσεις έχουν παραλειφθεί

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικές κάρτες ήχου παρά μόνο οι ενσωματωμένες κάρτες του κάθε υπολογιστικού συστήματος. Το λογισμικό Jacktrip παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της δειγματοληψίας της κάρτας ήχου η οποία τέθηκε στα 44100 δείγματα / sec με βάθος λέξης τα 16 bit. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης του μεγέθους της προσωρινής ηχητικής μνήμης το οποίο τέθηκε στα 128 πλαίσια/περίοδο. Η ελάχιστη καθυστέρηση του συστήματος από άκρο σε άκρο μετρήθηκε στα 12 ms ενώ η αμφίδρομη καθυστέρηση στα 24ms. Για τη παραμετροποίηση της πρόσθετης καθυστέρησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό tc-netem³ με χρήση εντολών στο λειτουργικό Linux.

3.2 Μετάδοση και καταγραφή Εικόνας

Για τη μετάδοση της εικόνας χρησιμοποιήθηκαν κάμερες χαμηλής ανάλυσης με σκοπό τη ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης από τη κάμερα προς την οθόνη προβολής, η οποία μετρήθηκε στα 62ms. Οι κάμερες ήταν συνδεδεμένες με τις αντίστοιχες οθόνες μέσω καλωδίων UTP και τερματικών υποδοχών Ethernet οι οποίες είχαν μικτονομηθεί μέσω των κατανομών έτσι ώστε να έχουν άμεση φυσική σύνδεση από άκρο σε άκρο χωρίς παρεμβολή ενδιάμεσου δικτυακού εξοπλισμού. Οι οθόνες είχαν διάσταση 32 ιντσών για να αποδίδουν σε όσο το δυνατόν πιο φυσικό μέγεθος τους μουσικούς. Για τη καταγραφή των προσώπων των μουσικών, χρησιμοποιήθηκαν κάμερες καταγραφής υψηλής ευκρίνειας.

³ <https://www.linux.org/docs/man8/tc-netem.html>

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η μεθοδολογία της ανάλυσης βασίστηκε στη στατιστική μελέτη των απαντήσεων των μουσικών καθώς και στην εξαγωγή συναισθηματικής πληροφορίας από τα καταγεγραμμένα βίντεο.

4.1 Ανάλυση των απαντήσεων των μουσικών

Στο γράφημα 1.a απεικονίζονται οι βαθμολογίες των μουσικών σχετικά με το πόσο τους άρεσε η κάθε επανάληψη. Όπως παρατηρείται καθώς αυξάνεται η καθυστέρηση, υπάρχει τάση μείωσης της βαθμολογίας και για τις δύο συνθήκες, κάτι το οποίο αναμενόταν. Για τη συνθήκη χωρίς *OE*, παρατηρείται μικρότερη διασπορά στις βαθμολογίες (θηκογράμματα με ανοιχτό γκρι), ένδειξη ότι οι μουσικοί είχαν πιο ξεκάθαρη γνώμη χωρίς *OE*. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι οι ενδιάμεσες τιμές είναι μεγαλύτερες για τη συνθήκη με *OE*, ένδειξη ότι η χρήση της βελτιώνει την εμπειρία του μουσικού. Η στατιστική ανάλυση ANOVA για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις έδειξε ότι η καθυστέρηση επηρέασε σημαντικά τις βαθμολογίες ($p = 0.002 < 0.05$) ενώ η συνθήκη της *OE* δεν είχε σημαντική επίδραση ($p = 0.56 > 0.05$).

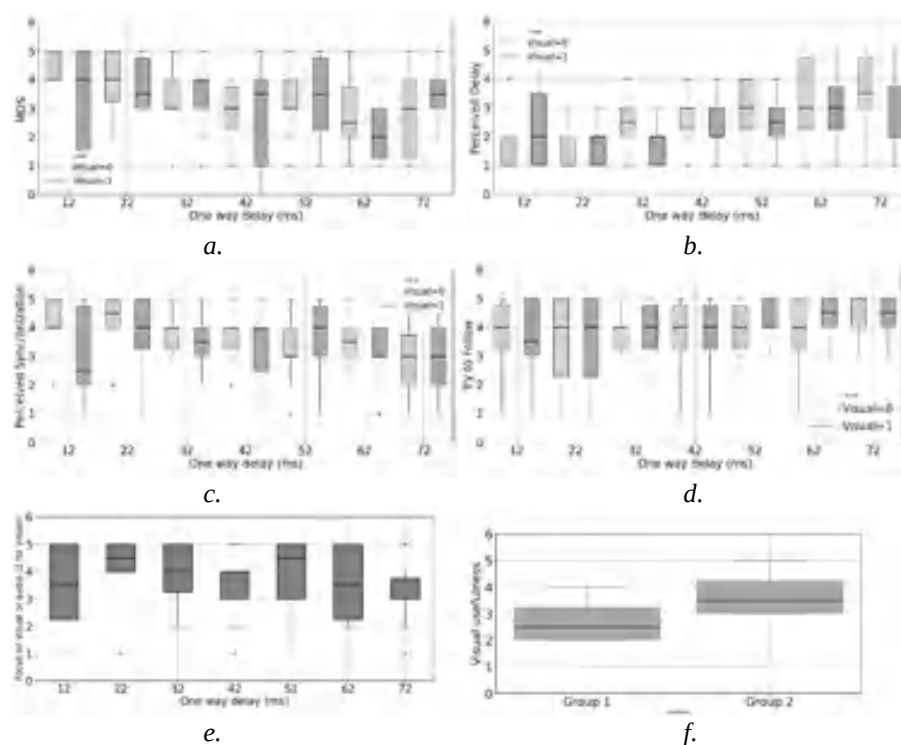
Σχετικά με το ερώτημα περί αντίληψης της καθυστέρησης, οι βαθμολογίες, γράφημα 1.b, παρατηρείται διακριτή τάση αύξησης των βαθμολογιών με αύξηση της καθυστέρησης και για τις δύο συνθήκες, κάτι το οποίο αναμενόταν. Οι ενδιάμεσες τιμές των βαθμολογιών είναι μεγαλύτερες για τη συνθήκη χωρίς *OE*, πιθανή ένδειξη ότι η *OE* επιδρά στην αντίληψή τους σχετικά με τη καθυστέρηση του ήχου. Η διασπορά όμως παρατηρείται μικρότερη για τη συνθήκη με *OE*, ένδειξη ότι οι μουσικοί είχαν πιο ξεκάθαρη γνώμη κατά τη συνθήκη αυτή. Η ανάλυση ANOVA έδειξε σημαντική επίδραση της καθυστέρησης στις αξιολογήσεις ($p = 0.00017$), σε αντίθεση με την επίδραση της οπτικής επαφής ($p = 0.14$).

Στην ερώτηση περί συγχρονισμού, από το γράφημα 1.c παρατηρείται ότι οι βαθμολογίες είναι υψηλότερες για χαμηλή καθυστέρηση και μειώνονται όσο η καθυστέρηση αυξάνεται. Παρατηρείται επιπλέον μεγαλύτερη διασπορά απαντήσεων για τη συνθήκη με *OE* κάτι που επιβεβαιώνει ότι η αυτή πιθανόν να επιφέρει σύγχυση στην αντίληψη των μουσικών. Η ανάλυση ANOVA δεν εξήγαγε σημαντικά αποτελέσματα.

Για το ερώτημα του κατά πόσο ο κάθε μουσικός προσπαθούσε να ακολουθήσει τον συν-μουσικό του στο ρυθμό οι βαθμολογίες απεικονίζονται γράφημα 1.d. Οι βαθμολογίες έχουν σταθερή σχεδόν ενδιάμεση τιμή, ανεξάρτητη της καθυστέρησης και της οπτικής επαφής. Η διασπορά μειώνεται όσο η καθυστέρηση αυξάνεται, ένδειξη του ότι οι μουσικοί προσπαθούσαν πιο έντονα να ακολουθήσουν ρυθμικά τον συν-μουσικό τους. Η ανάλυση ANOVA δεν εξήγαγε σημαντικά αποτελέσματα.

Σχετικά με ερώτημα για το που επικεντρώθηκαν οι μουσικοί περισσότερο, επιβεβαιώνεται η προτίμησή τους στην ηχητική επικοινωνία για τις περισσότερες τιμές της καθυστέρησης όπως φαίνεται στο γράφημα 1.e. Για τη μέγιστη τιμή της καθυστέρησης όμως παρατηρείται τάση μείωσης της βαθμολογίας, ένδειξη ότι οι μουσικοί τείνουν να στρέψουν τη προσοχή τους προς το οπτικό κανάλι με σκοπό να βρουν μηχανισμούς αντιμετώπισης της καθυστέρησης. Η ανάλυση ANOVA δεν έδειξε σημαντική επίδραση της καθυστέρησης στην αξιολόγηση της ερώτησης.

Η τελευταία ερώτηση που τέθηκε στους μουσικούς μετά το πέρας όλων των επαναλήψεων ζητούσε την αξιολόγηση της χρησιμότητας της *OE* στη ΔΜΕ. Όπως προαναφέρθηκε, οι μισοί μουσικοί έπαιξαν πρώτα χωρίς *OE* και μετά με *OE* (γκρουπ 1) και οι άλλοι μισοί το αντίθετο (γκρουπ 2). Από το γράφημα 1.f παρατηρείται ότι το γκρουπ 2 βαθμολόγησε τη χρησιμότητα της *OE* με πιο μεγάλη τιμή (3.5/5) σε σχέση με το γκρουπ 1 (2.5/5). Το γκρουπ 2 έπαιξε αρχικά με *OE* ενώ το γκρουπ 1 έπαιξε αρχικά χωρίς *OE*. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί μια ακόμα ένδειξη της σημαντικότητας της *OE* στη ΔΜΕ.

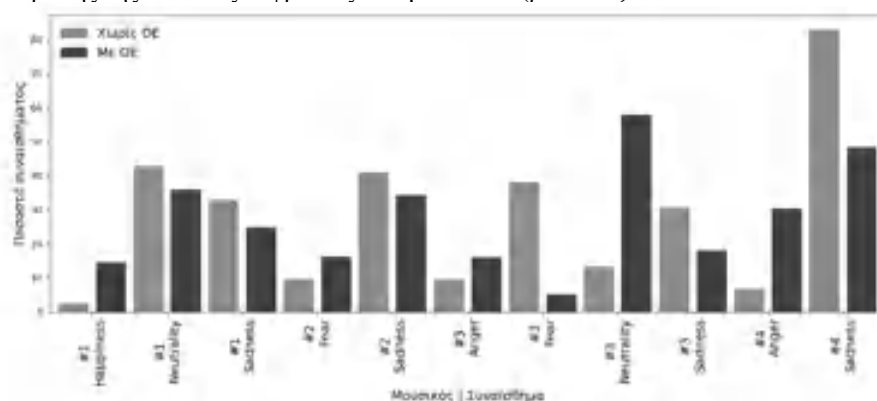


Εικόνα 2: Αξιολογήσεις των μουσικών σχετικά με την εμπειρία τους. Τα γραφήματα αντιστοιχούν στις απαντήσεις των μουσικών στην κλίμακα Likert για τις ερωτήσεις που τους τέθηκαν και οι οποίες παρατίθενται στην ενότητα 2.

4.2 Επίδραση της οπτικής επαφής στις εκφράσεις των προσώπων των μουσικών

Βασιζόμενοι στην έρευνα [20], χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο DeepFace [21] για την ανάλυση των καταγεγραμμένων βίντεο των μουσικών που συμμετείχαν. Ο αλγόριθμος υπολογίζει μια εκτίμηση για κάθε ένα από τα επτά συναισθήματα τα οποία είναι ο θυμός, η απέχθεια, ο φόβος, η χαρά, η θλίψη, η έκπληξη και η ουδετερότητα, για κάθε στιγμιότυπο των βίντεο όπου απεικονιζόταν ο μουσικός κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Υπολογίσαμε τους μέσους όρους για πέντε μουσικούς, για κάθε συναίσθημα, για το σύνολο των επαναλήψεων και για κάθε συνθήκη, με και χωρίς *OE*. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κάθε μουσικός έχει μια επικρατούσα έκφραση στο πρόσωπο του η οποία μπορεί να εκφράζει ένα από τα επτά συναισθήματα [20]. Ως επικρατούσα έκφραση θεωρείται η συναισθηματική έκφραση του προσώπου που έχει ένας άνθρωπος κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μιας παρατήρησης ανεξαρτήτως ερεθίσματος. Επιπλέον παρατηρήθηκαν αισθητές μεταβολές στις εκφράσεις των μουσικών σε σχέση με τη συνθήκη με και χωρίς *OE* όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3*. Με ανοιχτές γκρι μπάρες απεικονίζονται τα ποσοστά των συναισθημάτων για τη συνθήκη χωρίς *OE* ενώ με σκούρο γκρι οι τιμές για την αντίθετη συνθήκη. Αισθητές μεταβολές παρατηρούνται στον μουσικό 1 για το συναίσθημα της χαράς (αύξηση), στον μουσικό 3 σχετικά με τον θυμό (αύξηση), τον φόβο (μείωση) και την ουδετερότητα (αύξηση) και στον μουσικό 4 για τον θυμό (αύξηση), και τη θλίψη (μείωση). Η ανάλυση ANOVA δεν έδειξε σημαντικότητα της επίδρασης της *OE* στις εκφράσεις των μουσικών ($p > 0.05$).



*Εικόνα 3. Απεικόνιση συναισθημάτων / μουσικό που παρουσίασαν αισθητή μεταβολή (μεγαλύτερη του 15%) για τη συνθήκη με *OE* σε σχέση με τη συνθήκη χωρίς.*

5. Συμπεράσματα

Πραγματοποιήσαμε μια σειρά πειραμάτων δικτυακής μουσικής εκτέλεσης με οκτώ μουσικούς μεταβάλλοντας τις συνθήκες της καθυστέρησης και της οπτικής επαφής μεταξύ τους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ανέδειξε στοιχεία που υποδεικνύουν ότι η οπτική επαφή είναι χρήσιμη και βελτιώνει την εμπειρία των μουσικών. Συγχρόνως όμως υπάρχουν και ευρήματα που υποδεικνύουν ότι η *OE* επιφέρει φαινόμενα σύγχυσης στους μουσικούς ειδικά όταν αυτή περιλαμβάνει καθυστέρηση. Διακριτά ευρήματα φανερώνουν ότι σε συνθήκες αυξημένης καθυστέρησης οι μουσικοί τείνουν να στρέφουν την προσοχή τους περισσότερο στο οπτικό κανάλι επικοινωνίας προκειμένου να αλληλοεπιδράσουν. Η ανάλυση των καταγεγραμμένων βίντεο ανέδειξε αισθητές μεταβολές στις εκφράσεις των μουσικών σε σχέση με τις δύο συνθήκες, με και χωρίς οπτική επαφή, σε διαφορετικά όμως συναισθήματα για κάθε μουσικό. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η *OE* επιδρά, προκαλώντας όμως ποικίλες μεταβολές στην εμπειρία τους. Αν και το δείγμα είναι

στατιστικά μικρό, υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις που αναδεικνύουν τη σημαντικότητα της οπτικής επαφής στη δικτυακή μουσική εκτέλεση.

Σαν επόμενα βήματα θα πραγματοποιηθούν αναλύσεις σε μεγαλύτερο δείγμα μουσικών και θα χρησιμοποιηθούν επιπλέον αλγόριθμοι για την εξαγωγή συναισθηματικής πληροφορίας.

6. Αναφορές

- [1] J. Lazzaro και J. Wawrzynek, «A Case for Network Musical Performance,» 6 2001.
- [2] C. Bartlette, D. Headlam, M. Bocko και G. Velikic, «Effect of Network Latency on Interactive Musical Performance,» *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, τόμ. 24, p. 49–62, 2006.
- [3] Á. Barbosa και J. Cordeiro, «The Influence of Perceptual Attack Times in Networked Music Performance,» σε *Audio Engineering Society Conference: 44th International Conference: Audio Networking*, 2011.
- [4] C. Chafe, J.-P. Cáceres και M. Gurevich, «Effect of temporal separation on synchronization in rhythmic performance,» *Perception*, τόμ. 39, pp. 982-92, 1 2010.
- [5] D. Akoumianakis, C. Alexandraki, V. Alexiou, C. Anagnostopoulou, A. Eleftheriadis, V. Lalioti, Y. Mastorakis, A. Modas, A. Mouchtaris, D. Pavlidi, G. C. Polyzos, P. Tsakalides, G. Xylomenos και P. Zervas, «The MusiNet project: Addressing the challenges in Networked Music Performance systems,» σε *2015 6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*, 2015.
- [6] C. Alexandraki, P. Koutlemanis, P. Gasteratos, G. Milolidakis, G. Vellis και D. Kotsalis, «DIAMOUSES - An Experimental Platform for Network-based Collaborative Musical Interactions,» 2008.
- [7] K. Tsioutas, G. Xylomenos, I. Doumanis και C. Angelou, «Quality of musicians' experience in network music performance: A subjective evaluation,» σε *Audio Engineering Society Convention 148*, 2020.
- [8] P. R. Kantan, R. S. Alecu και S. Dahl, «3. The Effect of Auditory Pulse Clarity on Sensorimotor Synchronization,» 2019.
- [9] J. MacLean, J. Stirn και G. M. Bidelman, «1. Auditory-motor entrainment and listening experience shape the perceptual learning of concurrent speech,» 2024.
- [10] K. Ono, A. Nakamura και B. Maess, «Keeping an eye on the conductor: neural correlates of visuo-motor synchronization and musical experience,» *Frontiers in Human Neuroscience*, τόμ. 9, p. 154, 4 2015.
- [11] S. D'Amario, H. Daffern και F. Bailes, «(2) Synchronization in Singing Duo Performances: The Roles of Visual Contact and Leadership Instruction,» *Frontiers in Psychology*, 2018.

- [12] L. Bishop, C. Cancino-Chacón και W. Goebel, «(3) Moving to Communicate, Moving to Interact: Patterns of Body Motion in Musical Duo Performance,» *arXiv: Sound*, 2019.
- [13] J. J. S. Kim και N. J. Pellegrino, «(7) The Effect of Audio-Visual Cues in Understanding Musical Performance,» *Journal of Student Research*, 2023.
- [14] A. Antonietti, D. Cocomazzi και P. Iannello, «(6) Looking at the Audience Improves Music Appreciation,» *Journal of Nonverbal Behavior*, 2009.
- [15] J. Braasch, P. Oliveros και D. V. Nort, «(8) Telehaptic interfaces for interpersonal communication within a music ensemble,» *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013.
- [16] W. E. Fredrickson, «(12) Band Musicians' Performance and Eye Contact as Influenced by Loss of a Visual and/or Aural Stimulus,» *Journal of Research in Music Education*, 1994.
- [17] K. Miyata, M. Varlet, A. Miura, K. Kudo και P. E. Keller, «(1) Vocal interaction during rhythmic joint action stabilizes interpersonal coordination and individual movement timing.,» *Journal of Experimental Psychology: General*, 2021.
- [18] G. Charness, U. Gneezy και M. A. Kuhn, «Experimental methods: Between-subject and within-subject design,» *Journal of economic behavior & organization*, τόμ. 81, p. 1–8, 2012.
- [19] K. Tsioutas, G. Xylomenos και Doumanis, «aretousa: a competitive audio streaming software for network music performance,» *journal of the audio engineering society*, 3 2019.
- [20] K. Tsioutas, K. Ratzos, G. Xylomenos και I. Doumanis, «Multimodal Assessment of Network Music Performance,» σε *Companion Publication of the 2021 International Conference on Multimodal Interaction*, New York, NY, USA, 2021.
- [21] Y. Taigman, M. Yang, M. Ranzato και L. Wolf, «DeepFace: Closing the Gap to Human-Level Performance in Face Verification,» σε *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014.
- [22] P. D. Werner, A. J. Swope και F. J. Heide, «The Music Experience Questionnaire: development and correlates.,» *The Journal of Psychology*, τόμ. 140, pp. 329-345, 2006.
- [23] J. Brooke, «SUS: A quick and dirty usability scale,» *Usability Eval. Ind.*, τόμ. 189, 11 1995.
- [24] C. Rottondi, M. Buccoli, M. Zanoni, D. Garao, G. Verticale και A. Sarti, «Feature-Based Analysis of the Effects of Packet Delay on Networked Musical Interactions,» *Journal of the Audio Engineering Society*, τόμ. 63, pp. 864-875, 11 2015.
- [25] M. Schrepp, *User Experience Questionnaire Handbook*, 2015.
- [26] F. Rheinberg, R. Vollmeyer, S. Engster και R. Sreeramaju, «FSS - Flow Short Scale (English Version),» 9 2023.

Πλατινένιος Χορηγός:



Χρυσοί Χορηγοί:

