

**9ο Πανελλήνιο Συνέδριο «ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2018»
ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ**



ΠΑΤΡΑ
8/10
9/10 2018

ΣΥΝΕΔΡΙΑΚΟ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
(ΕΛ.ΙΝ.Α.)**

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Εθνικό
Ινστιτούτο
Ακουστικής
Hellenic Institute
of Acoustics

ΧΟΡΗΓΟΙ


ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ





ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Πρόεδρος: Μουρτζόπουλος Ν. Ιωάννης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Αντιπρόεδρος: Μενούνου Πηνελόπη Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών

Γ. Γραμματέας: Σκαρλάτος Δημήτριος, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Ταμίας: Χατζηαντωνίου Παναγιώτης, Ε.ΔΙ.Π. Πανεπιστημίου Πατρών

Μέλη:

Νικολάου Πέτρος, Υποψήφιος Διδάκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

Παπαδάκος Χαράλαμπος, Υποψήφιος Διδάκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

Ζακυνθινός Τηλέμαχος, Δρ Τμ. Μηχ. & Αερ/πηγων Μηχ., Πανεπιστημίου Πατρών

Καμάρης Γαβριήλ, Υποψήφιος Διδάκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

Καλέρης Κωνσταντίνος, Υποψήφιος Διδάκτορας Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δημούλας Χαράλαμπος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ζαρούχας Θωμάς, Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

Ζέρβας Παναγιώτης, Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

Καλλίρης Γιώργος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Κοντομίχος Φώτης, Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Κουζούπης Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών

Μουρτζόπουλος Ν. Ιωάννης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Μπάμνιος Γεώργιος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης

Μπάρκας Νίκος, Καθηγητής ΔΠΘ

Παπαδάκης Παναγιώτης, Ερευνητής ΙΤΕ

Παπαδέλης Γιώργος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Παπαδογιάννης Νεκτάριος, Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

Παπανικολάου Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Παστιάδης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ποτηράκης Στέλιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ραγκούση Μαρία, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Σεβαστιάδης Χρήστος, 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

Σωτηροπούλου Αλεξάνδρα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Ταρουδάκης Μιχάλης, Καθηγητής Πανεπιστήμιο Κρήτης, πρόεδρος ICA

Τάτλας Νικόλαος-Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Τροχίδης Αθανάσιος, τ. Καθηγητής ΑΠΘ

Τσινίκας Νίκος, ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φλώρος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Χατζηαντωνίου Παναγιώτης, Ε.ΔΙ.Π Πανεπιστημίου Πατρών
Χουρμουζιάδου Καλλιόπη, δρ Αρχιτέκτων Μηχανικός, ΣΕΠ ΕΑΠ

ΚΕΝΤΡΙΚΟΣ ΟΜΙΛΗΤΗΣ

Δημήτρης Σκαρλάτος, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ

Jens Blauert, Prof. (em.), Acoustics and EE, Ruhr-Universität Bochum, Prof. (adj.),
Architectural Acoustics, RPI, TROY NY

Elias Kokkinis, Co-Founder & CTO, Accusonus

Georgios Flamis, Member of Technical Staff, SW & HW systems, Corporate
Engineering, Dialog Semiconductor

ΧΟΡΗΓΟΙ

Πανεπιστήμιο Πατρών <http://www.upatras.gr/>

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, <https://www.eap.gr/>

Dialog Semiconductor, <https://www.dialog-semiconductor.com/>

Accusonus, <https://accusonus.com/>

Παπαδόπουλος και ΣΙΑ ΟΕ - Εταιρεία Μελετών Ακουστικής ΕΜΑ ΟΕ,
<https://web2.norsonic.com/>

ΧΟΡΗΓΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

avmentor, d.stamatakos@avmentor.gr

ΚΤΙΡΙΟ εκδόσεις, ktirio@ktirio.gr

alive, feedback@alive.gr

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το Πανελλήνιο Συνέδριο «ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2018» που διοργάνωσε το Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής πραγματοποιήθηκε στις 8 και 9 Οκτωβρίου 2018 στο Συνεδριακό και Πολιτιστικό Κέντρο του Πανεπιστημίου Πατρών.

Το Συνέδριο παρακαλούθησαν πάνω από 120 συμμετέχοντες από όλη την Ελλάδα συμπεριλαμβανομένων και φοιτητών του ΜΠΣ «Ακουστικός Σχεδιασμός με Πολυμέσα» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Αυτός ο τόμος των πρακτικών αποτελείται από 66 (από συνολικά 67 που παρουσιάστηκαν) ανακοινώσεις των οποίων το πλήρες κείμενο κατατέθηκε εγκαίρως από τους συγγραφείς/εισηγητές. Οι θεματικές ενότητες κάλυψαν ένα ευρύ φάσμα της ακουστικής και ταξινομήθηκαν σε 12 συνεδρίες ως εξής:

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1: Γενική Ακουστική / Υποβρύχια Ακουστική

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2: Ακουστική και Εκπαίδευση

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3: Έλεγχος Θορύβου και Δονήσεων

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4: Επεξεργασία ομιλίας και λόγου

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5: Ακουστικές μετρήσεις, εκπομπές και υλικά

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6 Μουσική Ακουστική

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 7: Περιβαλλοντική Ακουστική

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 8: Αρχαιολογική Ακουστική

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 9: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου I

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 10: Κτιριακή Ακουστική I

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 11: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου II

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 12: Κτιριακή Ακουστική II

Κατά τη διάρκεια της τελετής έναρξης χαιρετισμό απεύθυναν ο Αντιπρύτανης του Πανεπιστημίου Πατρών καθηγητής κ. Μπούρας, ο Πρόεδρος του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής καθηγητής Δημοκρίτιου Πανεπιστημίου Θράκης κ. Μάρκας, ο Πρόεδρος της Διεθνούς Επιτροπής Ακουστικής καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Ταρουδάκης και ο Πρόεδρος της Οργανωτικής Επιτροπής του Συνεδρίου καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών κ. Μουρτζόπουλος.

Ο Πρόεδρος του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής παρέδωσε αναμνηστικό βραβείο στον ομότιμο καθηγητή του Πανεπιστημίου Ruhr-Universitaet Bochum Jens Blauert, ο οποίος επίσης ανακηρύχθηκε επίτιμο μέλος του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής.

Ο καθηγητής κ. Σκαρλάτος ήταν ο κεντρικός ομιλητής (keynote speaker) του Συνεδρίου με θέμα «Άγνωστες πτυχές στην ιστορία της ακουστικής», ενώ το Συνέδριο έκλεισε με ειδική συνεδρία στις «Εξελίξεις στην τεχνολογία του ήχου» με προσκεκλημένο ομιλητή τον καθηγητή κ. Jens Blauert και τεχνικές παρουσιάσεις από μηχανικούς ήχου εταιριών (Elias Kokkinis, Co-Founder & CTO, Accusonus, Georgios Flamis., Member of Technical Staff, SW & HW systems, Corporate Engineering, Dialog Semiconductor) που δραστηριοποιούνται τοπικά στην τεχνολογία του ήχου.

Πίνακας Περιεχομένων

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1: Γενική Ακουστική / Υποβρύχια Ακουστική	5
Generator curve for the study of diffraction by a spherical signal around a half-plane	5
Piecewise convolution for the closed form solution of diffraction by arbitrary incident signals around half-planes.....	13
Ημι-εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηχομείωσης πίσω από ακουστικά σκληρή σφήνα.....	21
Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τον υποθαλάσσιο θόρυβο και το πρόγραμμα QUIETMED.....	29
An experiment for recording ambient noise in deep sea.....	37
Μετρήσεις ομοιότητας ακουστικών και σεισμικών σημάτων με χρήση Κρυπτομαρκοβιανών μοντέλων.....	45
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2: Ακουστική και Εκπαίδευση	51
Εκπαίδευση που αφορά τον ήχο και την ακουστική για προπτυχιακούς αρχιτέκτονες και εκπαιδευτικούς.....	51
Το προαύλιο σχολείου ως πηγή θορύβου:	57
Ο Τελευταίος Παγκόσμιος Κοινός Πρόγονος: μια εργο-κεντρική προσέγγιση στη διδασκαλία Ψηφιακής Επεξεργασίας Ήχου.....	63
Ηχητικός Σχεδιασμός για τον Κινηματογράφο.....	71
Ο ρόλος του ήχου και του χώρου σε σκηνές δράσης και μαχών μέσα από τρεις ταινίες Ευρωπαϊκού, Ιαπωνικού, Αμερικάνικου και Κινέζικου κινηματογράφου	80
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3: Έλεγχος Θορύβου και Δονήσεων	86
Μελέτη και κατασκευή συστήματος εξαγωγής καυσαερίων κινητήρα αγωνιστικού οχήματος για τη μείωση του θορύβου	86
Φωνονικός απορροφητής κραδασμών διάταξης επάλληλων επιπέδων	93
Εφαρμογές Φωνονικών Υλικών στην απορρόφηση κραδασμών	99
Μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς στερεομεταφερόμενου θορύβου, κατά την μελέτη μετεγκατάστασης Εργαστηρίου του Κ.Ε.Κ. Ο.Σ.Ε., με πρότυπο διεγέρτη δονήσεων BD-05.....	105
The Patraikos Gulf Ambient and Seismic Noise Monitoring Project.....	111
Ειδικός ακουστικός σχεδιασμός για την αντιμετώπιση κραδασμών από μετασχηματιστές σε υπόγειο κτιρίου γραφείων.....	120

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4: Επεξεργασία ομιλίας και λόγου.....	128
Διερεύνηση Τεχνικών Διπλής Συμπίεσης για την Ανίχνευση Παρουσίας Πολλαπλών Καταγραφών σε Αρχείο Ήχου.....	128
Speech enhancement on the cloud by means of adaptive Wavelet-domain Wiener filtering.....	137
Σωματοαισθητική Εκπαίδευση της Λυρικής Φωνής μέσω Ακουστικής Ανάλυσης σε Διαδραστικό Περιβάλλον	144
Ερμηνευτικές διαστάσεις της προσωδιακής εκφοράς της Αττικής τραγικής ποίησης: Ακουστική και φωνολογική ανάλυση.....	152
Πλήρως Διαδικαστικό - Προσβάσιμο Ηλεκτρονικό Παιχνίδι Βασισμένο σε Φωνητική Ανάδραση	160
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5: Ακουστικές μετρήσεις, εκπομπές και υλικά	168
Μετρητική διάταξη εξαγωγής κρουστικής απόκρισης χώρου, με χρήση τεχνικών εκθετικής σάρωσης διπλού καναλιού, ισοστάθμισης των αποκρίσεων και ενεργού διαχωρισμού συχνοτήτων.....	168
Αυτοματοποίηση βέλτιστων πρακτικών ηχογράφησης σε φορητές συσκευές	176
Ταυτόχρονη χρήση των μεθόδων ‘Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνων’ και ‘Ακουστική Εκπομπή’ για τον προσδιορισμό της κατανομής των παραμορφώσεων και του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση σπογγώδους οστού.....	184
Το γραφένιο στην ηλεκτροακουστική.	192
Ακουστική Συμπεριφορά συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες λιναριού	205
Αναπαραγωγή ήχου από οπτικά οδηγούμενες ηχητικές πηγές (Laser Audio)	211
Μεθοδολογίες για το νανοσκοπικό δυναμικό χαρακτηρισμό υλικών, με τη χρήση επιφανειακών ακουστικών κυμάτων παραγόμενων από υπερβραχείς παλμούς laser	222
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6 Μουσική Ακουστική	230
Ακουστική Συμπεριφορά Ανακαινισμένων Παλαιών Κιθαρών και Αντιγράφων τους. Συγκρίσεις.....	230
Ηχητική Σύνθεση Βασισμένη σε Κοινωνική Συμπεριφορά στο Ακουστικό Πεδίο	236
Εφαρμογή συμβολομετρικών μεθόδων laser στη μελέτη των παραδοσιακών και αρχαίων Ελληνικών μουσικών οργάνων	244

Μουσικός Διαδραστικός Αυτοσχεδιασμός Πραγματικού Χρόνου με Χρήση Δεδομένων Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος του Εκτελεστή	252
Θεωρητική μελέτη της χρήσης ράβδων σαν ιδιόφωνα μουσικά όργανα....	260
Ακουστικώς Επαυξημένα Ηχητικά Παιχνίδια: μια Πρώτη Προσέγγιση	268
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 7: Περιβαλλοντική Ακουστική	276
Συσχέτιση οικονομίας και όχλησης από περιβαλλοντικό θόρυβο	276
Σχεδίαση και Ανάπτυξη Πειραματικού Διαδικτυακού Κατανεμημένου Συστήματος Μέτρησης Περιβαλλοντικού Θορύβου	283
Διερεύνηση βιοκλιματικών παραμέτρων σε υπαίθριους δημόσιους χώρους : ακουστική άνεση στους κήπους της Έδεσσας.....	289
All day bar στο κέντρο της Θεσσαλονίκης : ηχομονωτικές ανεπάρκειες 10 χρόνια μετά	298
Μελέτη χρήσης πρότυπου ακουστικού αισθητήρα χαμηλού κόστους σε εφαρμογές έξυπνων περιβαλλόντων	305
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 8: Αρχαιολογική Ακουστική	313
Ο Στεντοροφωνικός σωλήνας.....	313
Ομηρικοί ήχοι. Καταγραφή, ταξινόμηση και σύγκριση των ηχητικών φαινομένων που περιγράφονται στην Ιλιάδα και την Οδύσσεια	323
Αρχαιοακουστική έρευνα σπηλαίων αφιερωμένων στη λατρεία του Πάνα και των Νυμφών στην Αττική.....	331
Ακουστική μοντελοποίηση του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου.....	343
Ασύρματο Δίκτυο Ακουστικών Αισθητήρων στο Ερευνητικό Πρόγραμμα STORM για Επιστασία Αρχαιολογικών Χώρων και Χώρων Πολιτιστικής Κληρονομιάς.....	351
Κατηγοριοποίηση Ήχων στο Ερευνητικό Πρόγραμμα STORM για Επιστασία Αρχαιολογικών Χώρων και Χώρων Πολιτιστικής Κληρονομιάς	360
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 9: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου I	368
Στατιστική ανάλυση του χρωματισμού σε ηχητικά σήματα	368
Χάρτες εντοπισμού ηχητικού ειδώλου για στερεοφωνική αναπαραγωγή σε δωμάτια.....	378
Διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ ακουστικών προκλητών δυναμικών και ηχητικής στάθμης διέγερσης με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.....	388
A Comprehensive Review of the Factors Affecting Inter-Subject Interaural Time Difference (ITD) Variability	396

Μέθοδος μετατροπής στερεοφωνικών ηχητικών σημάτων δύο καναλιών για πολυκαναλική αναπαραγωγή.....	403
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 10: Κτιριακή Ακουστική Ι	413
Χώροι αναπαράστασης στον Βόλο : διερεύνηση της ακουστικής συμπεριφοράς και παρεμβάσεις βελτίωσης.....	413
Ακουστική διόρθωση σε συζευγμένους χώρους, μεγάλου όγκου : το στεγασμένο αίθριο στο νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης.....	420
Σύγχρονη αρχιτεκτονική και υπαίθρια ακουστικά κελύφη.....	428
Το φαινόμενο Lombard σε χώρους συνάθροισης κοινού: βιβλιογραφική επισκόπηση και τρόποι αντιμετώπισής του.....	435
Θεατρικές σκηνές στην μεταπολεμική Ελλάδα του μοντερνισμού: Φυσικές ακουστικές μετρήσεις.....	441
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 11 Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου II	451
Διαδικτυακή Μουσική Εκτέλεση: Διεπαφή πελάτη για τον έλεγχο ηχητικών ροών με χρήση των βιβλιοθηκών gstreamer και gtk.....	451
Αυτοματισμοί διαδικτυακού ραδιοφώνου και «μεγάλα δεδομένα» ηχητικής (και οπτικοακουστικής) σημασιολογικής επισημείωσης.....	459
Μελέτη και εφαρμογή της μεθόδου φασματικής τοποθέτησης πόλων στην ισοστάθμιση ακουστικών.....	467
Ανοιχτή οπτικό-ηλεκτρονική πλατφόρμα δημιουργίας και αναπαραγωγής ήχων μέσω χειρονομιών.....	477
Real-Time detection, classification and DOA estimation of Unmanned Aerial Vehicle.....	485
ΣΥΝΕΔΡΙΑ 12 Κτιριακή Ακουστική II	494
Η ακουστική της Αίθουσας Άρη Γαρουφαλή στο Ωδείο Αθηνών.....	494
Μετατροπή κτιριακού κελύφους του βιομηχανικού συγκροτήματος «Αλλατίνη» στη Θεσσαλονίκη σε αίθουσα μεταβλητής ακουστικής.....	506
Ακουστική Βελτίωση Βιβλιοθήκης: Εφαρμογή για το Πολυτεχνείο Κρήτης.....	514
Ο ρόλος του συμβούλου ακουστικής - Προβληματισμοί και εμπειρίες από την ακουστική μελέτη και την κατασκευή του Κέντρου Πολιτιστικού του Ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος.....	520
Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς κλειστών χώρων με όρους στατιστικής ανάλυσης ακουστικών μετρήσεων.....	528

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1: Γενική Ακουστική / Υποβρύχια Ακουστική**Generator curve for the study of diffraction by a spherical signal around a half-plane**

Petros Nikolaou
University of Patras

Penelope Menounou
University of Patras

ABSTRACT

In recent work of the authors a solution has been proposed for diffraction by a half-plane in a unified form for all types of incident signals - being exact for plane and approximate for cylindrical and spherical signals. Based on this solution a generator curve for the diffraction has been introduced as a function of a single variable, namely the diffraction number. The diffraction number is a universal diffraction parameter, which translates the generator curve into diffracted signal at all times and all source-receiver locations, according to a condition termed the similarity condition. In the present work, these observations are expanded to the exact solution for the spherical incident signals. The generator curve is the same for the exact solution with a change in the diffraction number. The behavior of the new diffraction number in space and time is investigated and a new similarity condition is introduced. Finally, based on this behavior the diffracted signal is separated in time stages, each one with distinct characteristics.

Γενέτειρα καμπύλη για την περίθλαση σφαιρικού σήματος γύρω από ημι-επίπεδο**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σε πρόσφατη δουλειά των συγγραφέων έχει προταθεί λύση για την περίθλαση από ημι- επίπεδο σε ενοποιημένη μορφή για όλους τους τύπους προσπίπτοντων σημάτων, η οποία είναι ακριβής για επίπεδα και προσεγγιστική για κυλινδρικά και σφαιρικά σήματα. Με βάση αυτή τη λύση, μια γενέτειρα καμπύλη της περίθλασης έχει προταθεί ως συνάρτηση μιας μεταβλητής, του αριθμού περίθλασης. Ο αριθμός περίθλασης είναι μια καθολική παράμετρος για την περίθλαση, η οποία μεταφράζει τη γενέτειρα καμπύλη σε σήμα περίθλασης σε όλους τους χρόνους και για κάθε θέση πηγής-δεκτη, σύμφωνα με μια συνθήκη που ονομάζεται συνθήκη ομοιότητας. Αυτές οι παρατηρήσεις επεκτείνονται στην παρούσα εργασία και στην περίπτωση της ακριβούς λύσης για τα σφαιρικά προσπίπτοντα σήματα. Η γενέτειρα καμπύλη είναι η ίδια για την ακριβή λύση με διαφορετικό όμως αριθμό περίθλασης. Η συμπεριφορά του νέου αριθμού περίθλασης ως προς το χώρο και το χρόνο αναλύεται και εισάγεται μια νέα συνθήκη ομοιότητας. Τέλος με βάση αυτή τη συμπεριφορά, το σήμα περίθλασης διαχωρίζεται σε χρονικά στάδια, το κάθε ένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Introduction

The typical geometry for the diffraction of a spherically spreading incident signal by a half plane is shown in Figure 0.1. According to geometrical acoustics the sound field is separated into the three regions [see Figure 0.1(b)] by the depicted dividing lines *SBI* and *SBR*, namely the *shadow boundaries*. The subject of the present study is the diffracted signal, which is present in all three regions.

Analytical solutions for the diffraction by a half-plane in the time domain have been published by Friedlander, who presented rigorous formulations solving the boundary value problem for plane[1], and cylindrical incident signals[2]. An exact Fourier transform expression was also derived by Wait for the spherical incident signal[3]. Another solution has been latter developed by Biot and Tolstoy[4], who used the normal coordinates method rather than the Fourier transform. The Biot-Tolstoy solution has been studied and further modified by Svensson et al.[5].

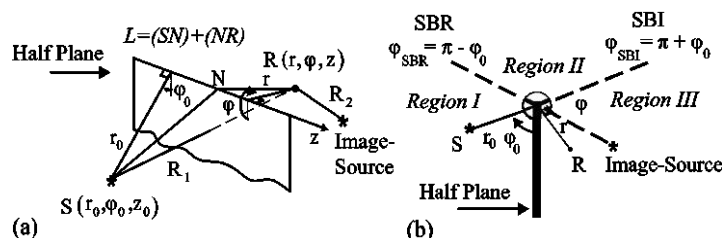


Figure 0.1. Geometry of the half-plane diffraction problem: perspective view [(a)] and side view [(b)].

The authors have also presented a Fourier transform based solution for diffraction in the time domain. The solution has a unified form for all types of incident signals [6]. It is exact for plane incident signals, while approximate for cylindrical and spherical - being invalid when both source and receiver are within one spatial extent of the incident signal from the edge of the half-plane. The present paper is focused on spherical incident signals, where the solution is available both as impulse response and as unit step response. Specifically, the unit step response is given by

$$p_{us}^d = p_{us}^{di} + p_{us}^{dr} = \pm \frac{\sqrt{2} \arctan \left[\frac{\sqrt{c\tau / (L - R_1)}}{\pi \sqrt{L(L + R_1)}} \right]}{\pi \sqrt{L(L + R_1)}} \pm \frac{\sqrt{2} \arctan \left[\frac{\sqrt{c\tau / (L - R_2)}}{\pi \sqrt{L(L + R_2)}} \right]}{\pi \sqrt{L(L + R_2)}}, \quad (0.1)$$

where L , R_1 and R_2 are the distances depicted in Figure 0.1, c the speed of sound, and $\tau = t - L/c$ the *diffraction time*, i.e. the retarded time that starts the moment the diffracted signal arrives at the receiver. The first term p_{us}^{di} is associated with the incident signal and keeps the negative sign in regions I and II, while the second term, p_{us}^{dr} , is associated with the reflected from the surface of the half plane signal and keeps the negative sign in region I only (see Figure 0.1). In the present work observations are made only for p_{us}^{di} , as they are similar for p_{us}^{dr} .

The solution has allowed the derivation of a universal dimensionless diffraction parameter that describes how diffraction evolves through space and time. This parameter is called *diffraction number* and is given by

$$\Pi^i = \frac{c\tau}{L - R_1}. \quad (0.2)$$

The diffraction number describes time so normalized as to be independent of source and receiver position. In that regard, two diffracted signals can be different in the time domain, but identical in the Π^i domain. A generator curve can be derived for both impulse and unit step response. A detailed presentation of the generator curve of the impulse response and its properties can be found in the work of ref. [6]. In summary, the generator curve is a function of a single variable, the diffraction number Π^i , and embodies/generates the diffracted signal at all source-receiver configurations and all diffraction times. The generator curve is translated into *scaled diffraction signal* (a dimensionless time signal) by stretching the Π^i axis of the generator curve according to a mathematical condition called *the similarity condition*. The scaled diffraction signal is then translated into the final diffraction signal by scaling its amplitude by the so-called *scaling factor*. Based on the properties of the generator curve the diffracted signal and the diffracted field can be separated into time stages and regions, respectively, each time stage and region having distinct characteristics. Furthermore, it has been shown that employing the generator curve to calculate the diffracted signals at a large grid of receiver locations requires a fraction of the computational cost involved in direct computations[7].

In the case of spherical incident signals the validity and any benefit of the generator curve is limited by the region of validity of the approximate solution [being valid for $\tau < L/c$ (see ref. [6])]. Thus, an essential question is whether the generator curve theory can be expanded to diffraction times and source-receiver configurations, for which $\tau > L/c$. To investigate this hypothesis the exact formulation of Wait[3], which is given in terms of unit step response, is employed

$$\bar{p}_{us}^d = \bar{p}_{us}^{di} + \bar{p}_{us}^{dr} = \pm \frac{\arctan \left[\frac{R_1^2 (c\tau)^2 + 2c\tau L}{\sqrt{L^2 - R_1^2} (c\tau + L)^2} \right]}{\pi R_1} \pm \frac{\arctan \left[\frac{R_2^2 (c\tau)^2 + 2c\tau L}{\sqrt{L^2 - R_2^2} (c\tau + L)^2} \right]}{\pi R_2}. \quad (0.3)$$

Similarly to the approximate solution [Eq. (0.1)], the term \bar{p}_{us}^{di} is associated with the incident signal, \bar{p}_{us}^{dr} with the reflected, while the signs change exactly the same way as in Eq. (0.1). In correspondence to Eq. (0.1) results will only be presented for \bar{p}_{us}^{di} , as they are similar for \bar{p}_{us}^{dr} .

It will be shown that the exact solution can be embodied in the very same generator curve as the approximate solution using, however, a different diffraction number. This new diffraction number and its role in translating the generator curve into scaled diffraction signal is investigated and compared against the approximate diffraction number Π^i [Eq. (0.2)]. A new similarity condition is introduced and a separation of the scaled diffraction signal into time stages is presented.

1. Generator curves: exact ($\bar{g}^{us,i}$) and approximate ($g^{us,i}$)

In previous work of the authors it has been shown that the approximate unit step response of diffraction[6][7] can be generated (within its region of validity) for every source-receiver configuration and any diffraction time by a single curve, namely *the*

generator curve for the approximate unit step response or simply called hereinafter approximate generator curve

$$g^{us,i}(\Pi^i) = \arctan(\sqrt{\Pi^i}) . \quad (1.1)$$

It can be proven that the exact unit step response [Eq. (0.3)] can also be regenerated by the same generator curve, but with a different argument

$$\bar{g}^{us,i}(\bar{\Pi}^i) = \arctan(\sqrt{\bar{\Pi}^i}) , \quad (1.2)$$

$$\bar{\Pi}^i = \frac{R_1^2}{L^2 - R_1^2} \frac{(c\tau)^2 + 2c\tau L}{(c\tau + L)^2} . \quad (1.3)$$

$\bar{g}^{us,i}$ is termed generator curve for the exact unit step response or simply referred to as exact generator curve, while $\bar{\Pi}^i$ is termed exact diffraction number.

It is noted that the two generator curves have identical mathematical forms and therefore the same behavior with respect to their argument [see Figure 1.1]. The difference between the two generators lies on how they translate their respective arguments, the dimensionless diffraction numbers, into physical time or physical space.

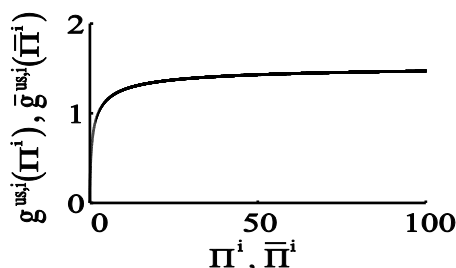


Figure 1.1. Exact $\bar{g}^{us,i}$ [Eq. (1.2)] and approximate $g^{us,i}$ [Eq. (1.1)] generator curves as functions of a single variable, the exact $\bar{\Pi}^i$ [Eq. (1.3)] and approximate Π^i [Eq. (0.2)] diffraction number, respectively.

2. Diffraction numbers: exact ($\bar{\Pi}^i$) and approximate (Π^i)

In the present section the dependence of the exact diffraction number $\bar{\Pi}^i$ on space and time is investigated and is compared to the corresponding dependences of Π^i .

A convenient approach is to reformulate each diffraction number as a product of two real and positive parameters, one describing the spatial behavior of the diffraction number and the other its time dependence. Specifically,

$$\Pi^i = S^i \cdot T, \quad S^i = \frac{L}{L - R_1}, \quad T = \frac{c\tau}{L}, \quad (2.1)$$

$$\bar{\Pi}^i = \bar{S}^i \cdot \bar{T}, \quad \bar{S}^i = \frac{R_1^2}{L^2 - R_1^2}, \quad \bar{T} = \left[1 - \frac{1}{(c\tau/L + 1)^2} \right], \quad (2.2)$$

where S^i and \bar{S}^i are the spatial parameters of Π^i and $\bar{\Pi}^i$, respectively, while T and \bar{T} are the corresponding time parameters. It is noted that the time parameters do not

depend solely on time. They are rather functions of $c\tau/L$, a parameter that also expresses edge proximity. This dependency can be seen as the time equivalent of the number kL (k being the wave number) in the frequency domain.

Both spatial parameters S^i and \bar{S}^i have a strong angular dependence, while their values range from their minima, $\bar{S}_{\min}^i = 1/L^2$, $S_{\min}^i = 1$, when source and receiver are located on opposite surfaces of the barrier, to ∞ as the receiver moves closer to the shadow boundary SBI . For a given source position Figure 2.1 shows contours of \bar{S}^i and contours of $\bar{\Pi}^i$ at two diffraction times. It is observed that $\bar{\Pi}^i$ has the same spatial distribution as \bar{S}^i , regardless of the diffraction time [see Figure 2.1(a)-(c)], with the higher values concentrated close to the shadow boundary. Unlike \bar{S}^i , which does not depend on time, the magnitude of the $\bar{\Pi}^i$ contours change over time. For small diffraction times [see Figure 2.1(b)] $\bar{\Pi}^i$ has smaller values compared to \bar{S}^i , while with the passage of time its magnitude values increase to become equal to the values of \bar{S}^i [Figure 2.1 (c)]. Π^i has largely (but not exactly) the same pattern as S^i [Figure 2.1(d)-(f)], with the higher values being concentrated close to the shadow boundary. S^i and \bar{S}^i have the same pattern, but differ in magnitude [see Figure 2.1(a) and (d)]. The pattern of the two diffraction numbers [Figure 2.1(b) and (e)] is largely the same for short diffraction times and their magnitudes comparable. At long diffraction times the difference in magnitude between Π^i and $\bar{\Pi}^i$ becomes significant [Figure 2.1(c) and (f)], with $\bar{\Pi}^i$ approaching a maximum finite value and Π^i increasing to infinity.

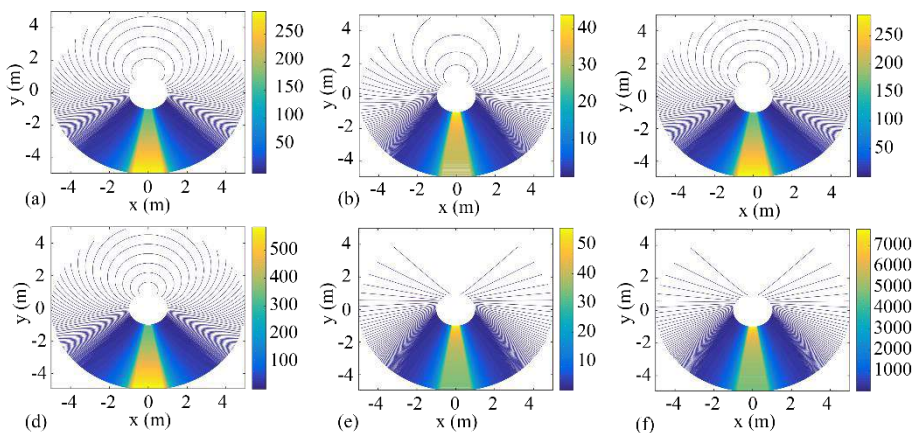


Figure 2.1 Contours of \bar{S}^i and $\bar{\Pi}^i$ (first row); contours of S^i and Π^i (second row); contours of \bar{S}^i and S^i (left column); contours of $\bar{\Pi}^i$ and Π^i at times $\tau = 1\text{ms}$ (middle column), $\tau = 140\text{ms}$ (right column); source at $(r_0, \phi_0, z_0) \equiv (1\text{m}, \pi/2, 0\text{m})$; receivers at $(r, \phi, 0\text{m})$.

Figure 2.2 depicts the dependency of the diffraction numbers $\bar{\Pi}^i$ and Π^i on $c\tau/L$. For a given source-receiver configuration (given S^i and \bar{S}^i), Π^i changes linearly with $c\tau/L$ [see Eq.(2.1)] and the rate of change is faster for receivers closer to SBI , where S obtains its largest values [see Figure 2.2(a)]. The exact diffraction

number $\bar{\Pi}^i$, on the other hand, has a linear dependence only at the starting times, $c\tau \ll L$, where $\bar{\Pi}^i \cong 2\bar{S}^i c\tau / L$ [see Figure 2.2(b) and Eq. (2.3)]. Similarly to Π^i , the rate of the linear change is larger as the receiver moves closer to the *SBI*, where \bar{S}^i , similarly to S^i , obtains its largest values. It should further be noted that, unlike Π^i , $\bar{\Pi}^i$ becomes independent of time for large values of $c\tau/L$. Thus, a steady state is reached, where $\bar{\Pi}^i \rightarrow \bar{S}^i$. The described asymptotics are given by

$$\bar{\Pi}^i = \bar{S}^i \cdot \bar{T} = \bar{S}^i \cdot \left[1 - \frac{1}{(c\tau/L + 1)^2} \right] = \begin{cases} \bar{S}^i \cdot 2c\tau/L, & c\tau/L < 0.1 \ll 1 \\ \bar{S}^i, & c\tau/L > 10 \gg 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

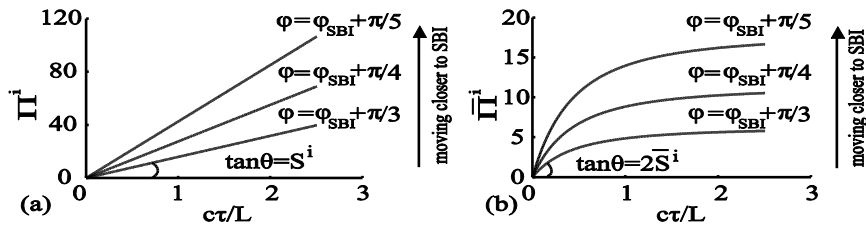


Figure 2.2. Dependence of Π^i [Eq.(2.1)] [(a)] and $\bar{\Pi}^i$ [Eqs.(2.2) and (2.3)] [(b)] on time; source at $(r_0, \phi_0, z_0) \equiv (1m, \pi/2, 0m)$; receiver at $(r, \phi, z) \equiv (5m, \phi, 0m)$.

3. Similarity conditions: nonlinear (exact) and linear (approximate)

As discussed in previous work of the authors[6][7] the generator curve, a function of a single dimensionless parameter, is translated into the scaled diffraction signal by stretching its $\bar{\Pi}^i$ axis according to the similarity condition. In other words, the similarity condition is the condition that must be satisfied so that two different source receiver configurations C_A and C_B at two different diffraction times τ_A and τ_B correspond to the same value of the generator curve $g_{C_A}^{us,i} = g_{C_B}^{us,i}$. In the case of the approximate generator curve, the similarity condition is a simple linear relation between τ_A and τ_B .

The similarity condition for the exact generator curve is more complex and represents a nonlinear relation between τ_A and τ_B :

$$\frac{R_{1,A}^2}{L_A^2 - R_{1,A}^2} \frac{(c\tau_A)^2 + 2c\tau_A L_A}{(c\tau_A + L_A)^2} = \frac{R_{1,B}^2}{L_B^2 - R_{1,B}^2} \frac{(c\tau_B)^2 + 2c\tau_B L_B}{(c\tau_B + L_B)^2} \quad (3.1)$$

It should be noted, however, that in the linear region of $\bar{\Pi}^i(\tau)$, i.e $c\tau/L \ll 1$ [see Eq. (2.3)], where the approximate generator curve is valid, a linear relation between τ_A and τ_B is recovered,

$$\frac{R_{1,A}^2}{L_A^2 - R_{1,A}^2} \frac{c\tau_A}{L_A} = \frac{R_{1,B}^2}{L_B^2 - R_{1,B}^2} \frac{c\tau_B}{L_B} \quad (3.2)$$

Equation (3.2) is very close to the linear similarity condition of the approximate generator curve[6].

4. Time stages of the generators curves

Both generator curves, $\bar{g}^{us,i}$ and $g^{us,i}$, have the same mathematical expression, which exhibits two asymptotics for small and large values of their corresponding argument, as shown below and in Figure 4.1(a)

$$\bar{g}^{us,i}(\bar{\Pi}^i) = \arctan\left(\sqrt{\bar{\Pi}^i}\right) = \begin{cases} \sqrt{\bar{\Pi}^i}, & \bar{\Pi}^i < 0.02 \\ \frac{\pi}{2}, & \bar{\Pi}^i > 4000 \end{cases}, \quad (4.1)$$

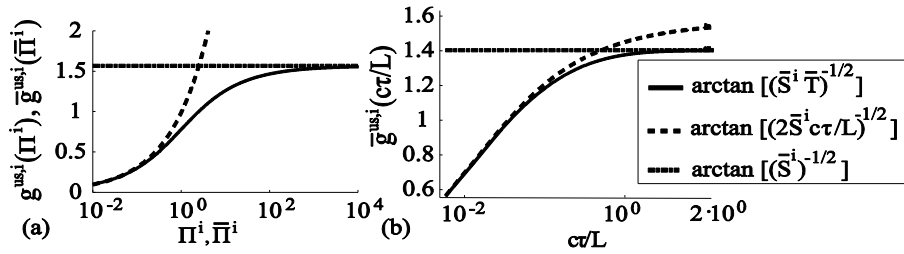


Figure 4.1. Stages of the generator curve [(a)] and stages of the scaled diffraction signal[(b)]; source at $(r_0, \phi_0, z_0) \equiv (1m, \pi / 2, 0m)$; receiver at $(r, \phi, z) \equiv (5m, \phi_{SBI} + \pi / 7, 0m)$.

The difference between the two generator functions is on how they translate their respective arguments, the dimensionless diffraction numbers, into physical time, in other words into the scaled diffraction signals $g^{us,i}(\tau)$ and $\bar{g}^{us,i}(\tau)$. Based on the analysis of the time dependence of the diffraction number $\bar{\Pi}^i$ and Eq. (2.3), the two limits $c\tau/L = 0.1$ and $c\tau/L = 10$ can be employed to separate the scaled diffraction signal $\bar{g}^{us,i}(\tau)$ in three distinct time stages: the young age, the middle and the old age as follows:

$$\bar{g}^{us,i}(\tau) = \arctan\left(\sqrt{\bar{S}^i \bar{T}}\right) = \begin{cases} \arctan\left(\sqrt{\bar{S}^i \frac{2c\tau}{L}}\right), & c\tau/L < 0.1 \\ \arctan\left(\sqrt{\bar{S}^i \bar{T}}\right), & 0.1 < c\tau/L < 10 \\ \arctan\left(\sqrt{\bar{S}^i}\right), & c\tau/L > 10 \end{cases}. \quad (4.2)$$

The young age corresponds to receiver locations away from the edge of the barrier and/or short diffraction times, the middle age to receivers close to the edge and/or long diffraction times, while the old stage is a steady-state solution that establishes everywhere around the barrier after a very long diffraction time and remains the same (it freezes) for all times thereafter [see Figure 4.1(b)].

It is now worth studying the two ends of the scaled diffraction signal $\bar{g}^{us,i}$. The young age can be subdivided further. If the argument of the arctan function $\sqrt{\bar{S}^i 2c\tau/L}$

is small, then $\bar{g}^{us,i}(\tau) \cong \sqrt{\bar{S}^i 2c\tau/L}$. This infant age starts at 0 and has an upper limit of $c\tau/L \ll (L^2 - R_1^2)/2R_1^2 = 1/2\bar{S}^i$. It is noted that for receivers very close to the shadow boundary this upper limit goes to 0 and thus no infant age can be distinguished. Thus, the infant stage exists for receivers that are both away from the shadow boundary (small values of \bar{S}^i) and away from the edge/or short diffraction times (small values of $c\tau/L$). The approximate generator curve translated into scaled diffraction signal $g^{us,i}(\tau)$ has a similar behavior in that time stage (for $S^i = 2\bar{S}^i$ they become identical), namely $g^{us,i}(\tau) \cong \sqrt{S^i c\tau/L}$, when $c\tau/L \ll (L - R_1)/L = 1/S^i$ (i.e. away from the shadow boundary and for short diffraction times). Consider now the old stage of the exact scaled diffraction signal (long diffraction times). If the receiver is close to the shadow boundary, then $\bar{S}^i \rightarrow \infty$ and thus $\bar{g}^{us,i}(\tau) \cong \arctan(\sqrt{\bar{S}^i}) \rightarrow \pi/2$. Translating this into actual diffraction signal, we obtain half the incident signal. The approximate generator curve translated into actual diffraction signal also approaches half the incident signal at long diffraction times and close to the shadow boundary.

5. References

- [1] F. G. Friedlander “The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane” Proc. R. Soc. London, Ser. A. **186**, pp 322–367 (1946).
- [2] F. G. Friedlander “On the half plane diffraction problem,” *Quar. J. Mech. and Appl. Math.* **4**, pp 344–357 (1951).
- [3] J. R. Wait, “Diffraction of a spherical wave pulse by a half-plane screen” J. Phys. Can. **35**, pp 693-696 (1957).
- [4] M. A. Biot and I. Tolstoy “Formulation of wave propagation in infinite media by normal coordinates with an application to diffraction” J. Acoust. Soc. Am. pp **29**, 381–391 (1957).
- [5] U. P. Svensson, R. I. Fred, and John Vanderkooy “An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses” J. Acoust. Soc. Am. pp **106**, 2331–2344 (1999).
- [6] P. Menounou and P. Nikolaou “Analytical model for predicting edge diffraction in the time domain.” J. Acoust. Soc. Am. **142**, pp 3580–3592 (2017).
- [7] P. Nikolaou and P. Menounou “Computationally efficient calculation of edge diffraction in time domain” *The Euronoise2018 Proceedings* pp 953-960 (2018).

Piecewise convolution for the closed form solution of diffraction by arbitrary incident signals around half-planes

Petros Nikolaou
University of Patras

Penelope Menounou
University of Patras

ABSTRACT

In the present study diffraction of spherically spreading signals by half-planes is considered. An analytical impulse response solution proposed previously by the authors is investigated. It is shown that its primitive functions exist, can be expressed in a compact form, and when employed instead of the impulse response itself can dramatically reduce the computational cost of the convolution. Furthermore, based on the primitive functions a closed form solution can be obtained for the diffraction signal produced by any continuous incident signal. Finally, the method is extended to handle discontinuous incident signals by employing the closed form solution to segments of the incident signal.

Συνέλιξη κατά τμήματα για τον υπολογισμό σε κλειστή μορφή της περίθλασης τυχαίου σήματος γύρω από ημι-επίπεδο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη αφορά την περίθλαση σφαιρικού κύματος γύρω από ημι-επίπεδο. Αφετηρία αποτελεί η συνάρτηση κρουστικής απόκρισης που έχει προταθεί στο παρελθόν από τους συγγραφείς. Αποδεικνύεται ότι οι αρχικές συναρτήσεις της κρουστικής απόκρισης υπάρχουν, μπορούν να εκφραστούν σε κλειστή μορφή και αν αντικαταστήσουν την κρουστική απόκριση στη διαδικασία της συνέλιξης μπορούν να οδηγήσουν σε δραματική μείωση του υπολογιστικού της κόστους. Οι αρχικές συναρτήσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αναλυτική πρόλεξη σε κλειστή μορφή του σήματος περίθλασης από οποιοδήποτε συνεχές προσπίπτον σήμα. Τέλος, η μέθοδος επεκτείνεται και σε μη-συνεχή προσπίπτοντα σήματα εφαρμόζοντας την κλειστή λύση σε τμήματα του προσπίπτοντος σήματος.

Introduction

The study of edge diffraction is important in many areas of acoustics such as, urban noise[1] and room acoustics[2]. Solutions for the problem have been developed

in both frequency and time domain and a detail review can be found, for example, in the work of Kim[3].

The subject of the present work is the diffracted signal produced around a noise barrier modeled as an infinitely thin half-plane by a spherically spreading signal incident on the barrier (see Figure 0.1). Specifically, an analytical time domain solution is employed, whose unique characteristics/properties allow: (i) a significant reduction in the computational cost of predicting the diffracted signal and (ii) the expression of the diffracted signal produced by an arbitrary incident signal as a closed form solution.

The authors have presented an analytical impulse response solution, p_{irf}^d , to predict the diffraction signal around a half-plane, which, unlike other time domain solutions, provides a unified form for every type of simple incident radiation, i.e. for plane, spherically, and cylindrically spreading incident signals[6]. In the present work results are presented for spherical incident signals,

$$p_{irf}^d = -\frac{1}{4\pi} A_i \cdot (I \cdot d) = p_{irf}^{di} + p_{irf}^{dr} = -\frac{1}{4\pi} A_i \cdot (I \cdot d^i) - \frac{1}{4\pi} A_i \cdot (I \cdot d^r), \quad (4.3)$$

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{rr_0}}, \quad I = \frac{2}{\sqrt{\tau(\tau + 2t_d)}} H(\tau), \quad \tau = t - t_d, \quad t_d = L/c, \quad d = d^i + d^r, \quad (4.4)$$

$$d^{i,r} = \frac{\bar{t}_{1,2} \Phi_{1,2} \sqrt{\frac{\tau}{t_d} + 2}}{\tau + \tau_{lag}^{i,r}}, \quad \bar{t}_{1,2} = \frac{rr_0 \pi}{c(L + R_{1,2})}, \quad \Phi_{1,2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\left(\frac{\phi \mp \phi_0}{2}\right), \quad \tau_{lag}^{i,r} = \frac{\pi}{2} \bar{t}_{1,2} \Phi_{1,2}^2, \quad (4.5)$$

where $H(\tau)$ is the Heaviside or unit step function, c is the speed of sound and all other parameters are as presented in Eqs. (4.3)-(4.5) and as depicted in Figure 0.1.

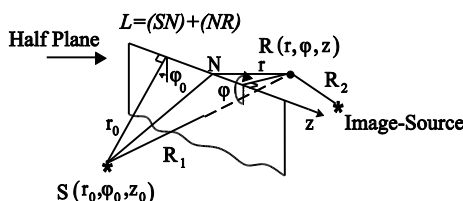


Figure 0.1. Geometry of the half-plane diffraction problem.

The impulse response solution is approximate for spherical incident signals, being valid for $L/cT_{inc} > 1$, where T_{inc} is the duration of the incident signal (i.e. invalid when both source and receiver are within one spatial extent of the incident signal from the edge).

The diffracted pulse p^d produced by an arbitrary signal f incident on the half-plane is calculated by convolving p_{irf}^d with the incident signal f :

$$p^d = p^{di} + p^{dr} = p_{irf}^{di} * f + p_{irf}^{dr} * f \quad (4.6)$$

where the first terms, p^{di} and p_{irf}^{di} , are associated with the incident signal, while p^{dr} and p_{irf}^{dr} with the signal reflected from the surface of the half-plane. The convolution computations can be time consuming as the number of time samples increases, especially if the computations are performed for a large number of receiver locations.

Firstly, it is noted that p_{irf}^d has a very steep slope at its start ($p_{irf}^d \rightarrow \infty$ as $\tau \rightarrow 0$), which in turn requires a very fine time sampling and thus a large number of time samples. A remedy of this issue is addressed in section 1. Furthermore, in some practical cases the incident signal itself can have features that require a very fine sampling or it might be simply too long. In section 2 a closed form solution is derived for the diffracted signal by any arbitrary continuous signal. Apart of the insight it offers, the closed form solution allows the computation of the diffracted signal at a single point in time, which can be of interest, without the necessity to perform the digital convolution of the entire, possibly very long, signal. In section 3 the method is extended to handle discontinuous incident signals (for example signals containing shocks) by employing the analytical solution derived in section 2 to segments of the incident signal.

1. Primitive functions of the impulse response solution

In the present section the impulse response solution p_{irf}^d (which has a very steep slope at its start and therefore requires a fine time sampling to yield an accurate convolution with the incident signal) is replaced by non-singular and continuous functions that require coarser time sampling and thus smaller calculation time. The analysis is presented for the first term of p_{irf}^d , p_{irf}^{di} and is similar for the second, p_{irf}^{dr} .

Consider a set of functions a_n^{di} , $n=1,2,\dots$ such that p_{irf}^{di} is the n -th order partial time derivative of a_n^{di} ,

$$\frac{\partial^n a_n^{di}}{\partial \tau^n} = p_{irf}^{di}. \quad (5.1)$$

The advantage of the impulse response solution p_{irf}^{di} in Eq. (4.3) is that its primitive functions a_n^{di} exist for all n and can be expressed in a closed form. For example, the first two orders are:

$$a_1^{di} = c_{us}^i \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}^i}}\right), \quad a_2^{di} = c_{us}^i \tau_{lag}^i \left[\left(\frac{\tau}{\tau_{lag}^i} + 1\right) \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}^i}}\right) - \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}^i}} \right], \quad (5.2)$$

where $c_{us}^{i,r} = -A_i \sqrt{t_d^{-1} t_{1,2}^{-1}} \Phi_{1,2} / (\pi \sqrt{\tau_{lag}^{i,r}})$. According to the differentiation property of the convolution, the impulse response can be replaced by its primitive function:

$$p^{di} = p_{irf}^{di} * f = \frac{\partial a_1^{di}}{\partial \tau} * f = a_1^{di} * \frac{\partial f}{\partial \tau}, \quad (5.3)$$

or generalized for any order n :

$$p^{di} = a_n^{di} * \frac{\partial^n f}{\partial \tau^n}, \quad p_{irf}^{di} \equiv a_0^{di}, \quad \frac{\partial^0 f}{\partial \tau^0} \equiv f. \quad (5.4)$$

The convolutions in Eq. (5.4) have been computed for several orders n and several time samplings $d\tau$ and were subsequently compared to the benchmark computation of convolving the impulse response ($n=0$) with an extra-fine time sampling $d\tau_0$, $(p_{irf}^{di} * f)_{d\tau_0}$, where $d\tau_0 \ll d\tau$. The maximum relative difference between any

computed convolution of order n and time sampling $d\tau$, $(X_n)_{d\tau}$, from the benchmark computation $(p_{irf}^{di} * f)_{d\tau_0}$,

$$err^n = \max \left(\frac{|(X_n)_{d\tau} - (p_{irf}^{di} * f)_{d\tau_0}|}{|(p_{irf}^{di} * f)_{d\tau_0}|} \right), \quad (X_n)_{d\tau} = \left(a_n^{di} * \frac{\partial^n f}{\partial \tau^n} \right)_{d\tau}, \quad (5.5)$$

can be considered as an assessment of both convergence and accuracy of the numerical convolution. The computations revealed the following: (i) orders $n \geq 3$ should not be employed due to numerical oscillations introduced in the computation of the time derivatives as $d\tau \rightarrow 0$, (ii) orders $n = 1, n = 2$ require much fewer time samples than $n = 0$ to achieve the same level of accuracy err^n , and (iii) employment of orders $n = 1, n = 2$ drastically reduces the CPU time compared to the traditional employment of the impulse response function ($n = 0$) for the same level of accuracy err^n .

Figure 1.1(b) presents an example of CPU time reduction in predicting the diffracted signal $p^d = p^{di} + p^{dr}$ on a 50×50 receiver grid [shown in Figure 1.1(a)]. Use of the primitive functions of orders $n = 1$ or $n = 2$, instead of the impulse response ($n = 0$), improves the computation speed by orders of magnitude, while it maintains the same accuracy ($err^n = 2\%$).

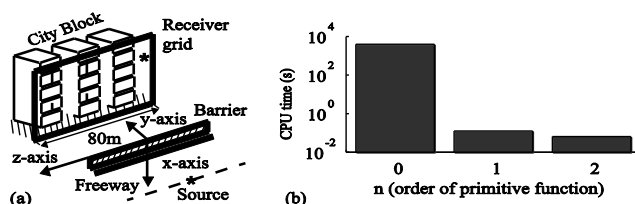


Figure 1.1. CPU time required to calculate the diffracted signal p^d with accuracy $err^n = 2\%$ [(b)] on a receiver grid of size 50×50 [geometry shown in (a)] for several orders n of Eq.(5.4); incident signal $f = \sin(2\pi\tau/T_{inc})$, $0 \leq \tau \leq T_{inc} = 0.01s$.

2. Polynomial diffraction response

The primitive functions employed in the previous section in order to reduce the computational cost of the convolution can also be used to derive a closed form solution of the diffracted signal. A closed form solution allows us to know the diffracted signal at a given time of interest without the necessity to compute the digital convolution over the entire, possibly very long, incident signal.

Consider a unitary monomial incident signal of order n ,

$$M_n(\tau) = \tau^n [H(\tau) - H(\tau - T_{inc})], \quad (6.1)$$

where H is the Heaviside function and T_{inc} the duration of the incident signal (either infinite or finite) The convolution of the impulse response [Eq. (4.3)] with the

monomial M_n can be computed analytically to yield the following closed form expression to be termed n -th *order monomial diffraction response* q_n ,

$$q_n = H(\tau)n!a_{n+1}(\tau) - H(\tau - T_{inc})S_{n,T_{inc}}, \quad (6.2)$$

$$S_{n,T_{inc}} = \sum_{j=0}^n \frac{n!}{(n-j)!} T_{inc}^{n-j} a_{j+1}(\tau - T_{inc}). \quad (6.3)$$

According to Eq. (6.2) q_n is proportional to the primitive function a_{n+1} up to time $\tau = T_{inc}$. For times, $\tau > T_{inc}$ q_n enters a period of asymptotic decay, where its behavior is determined by the superposition of $n!a_{n+1}(\tau)$ and the parameter $S_{n,T_{inc}}$, which depends on all primitive functions of the impulse response up to order n . For its role in describing this decay $S_{n,T_{inc}}$ is termed *decay parameter* of the monomial diffraction response.

Next consider the polynomial incident signal of order n ,

$$P_n(\tau) = [H(\tau) - H(\tau - T_{inc})](s_n \tau^n + s_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + s_1 \tau^1 + s_0), \quad (6.4)$$

where $s_n, s_{n-1}, \dots, s_1, s_0$ are constant polynomial coefficients. The polynomial incident signal P_n is the linear combination of the unitary monomial incident signals $M_n, M_{n-1}, \dots, M_1, M_0$,

$$P_n(\tau) = s_n M_n(\tau) + s_{n-1} M_{n-1}(\tau) + \dots + s_1 M_1(\tau) + s_0 M_0(\tau). \quad (6.5)$$

Thus, the diffraction response of P_n can be obtained analytically as linear combination of the diffraction responses of the unitary monomials q_n ,

$$u_n = s_n q_n + s_{n-1} q_{n-1} + \dots + s_1 q_1 + s_0 q_0, \quad (6.6)$$

which yields,

$$u_n = r_n H(\tau) - T_{n,T_{inc}} H(\tau - T_{inc}), \quad (6.7)$$

$$r_n = s_n n! a_{n+1} + s_{n-1} (n-1)! a_n + \dots + s_1 a_2 + s_0 a_1 = \sum_{j=0}^n s_j j! a_{j+1}(\tau), \quad (6.8)$$

$$T_{n,T_{inc}} = s_n S_{n,T_{inc}} + \dots + s_0 S_0 = \sum_{j=0}^n s_j \sum_{k=0}^j \frac{j!}{(j-k)!} T_{inc}^{j-k} a_{k+1}(\tau - T_{inc}). \quad (6.9)$$

In correspondence to the case of monomials, u_n is termed n -th order *polynomial diffraction response*. The quantity r_n describes the diffraction response up to $\tau = T_{inc}$, while the polynomial response enters a period of asymptotic decay thereafter. The diffracted pulse in that period is described by the superposition of r_n and the quantity $T_{n,T_{inc}}$. The quantity $T_{n,T_{inc}}$ is a linear combination of the diffraction decay parameters of the unitary monomial responses and it is termed *decay parameter of the polynomial diffraction response*.

According to the Stone–Weierstrass theorem any function f that is continuous in a domain $[a, b]$ can be fitted by a polynomial P_n with the desired accuracy, i.e. $|f - P_n| < \varepsilon$, for every $\varepsilon > 0$. As a result, it is possible to use polynomial fitting and thus apply the polynomial diffraction response for any continuous signal. The

accuracy of the method of predicting the diffraction response of an arbitrary signal based on fitting polynomials depends solely on the accuracy of fitting used to approximate the incident signal. The traditional measure to describe the accuracy of the fitting polynomial is called R-squared,

$$R_{squared} = 1 - \frac{\sum_{i=0}^N [f_i - (P_n)_i]^2}{\sum_{i=0}^N [(P_n)_i - \bar{f}]^2}, \quad (6.10)$$

where f_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) are N time samples of the incident signal f , $(P_n)_i$ the values of the fitting polynomial P_n at the same time samples, and \bar{f} is the mean value of the samples f_i . The closer $R_{squared}$ is to unity, the better f is approximated by P_n . The value of $R_{squared}$ depends on the order n and on the coefficients of P_n . One might select high order polynomials to achieve better accuracy. However, as described by the Runge phenomenon the accuracy of a fitting polynomial might decrease as its order n increases. To avoid such behavior the coefficients of P_n are calculated by the least squares method, an optimization procedure, which eliminates the Runge phenomenon.

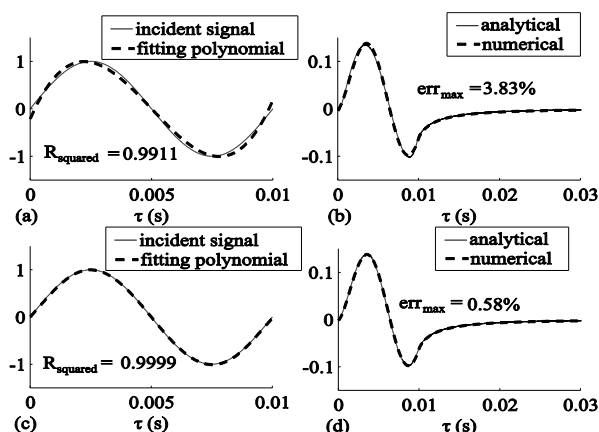


Figure 2.1. Incident signal of duration $T_{inc} = 0.01s$ fitted by polynomials of 3-rd [(a)], and 5-th order [(c)]. Diffraction responses predicted analytically by u_3 [(b)] and u_5 [(d)] [see Eq. (6.6)], each one compared with the benchmark numerical convolution of very fine time sampling.

Figure 2.1 shows the same incident signal fitted with a 3-rd order polynomial () and a 5-th order polynomial (). As in the previous section, the accuracy of the diffracted signal can be assessed by the maximum relative difference between the 3-rd (or 5-th order) polynomial response (or) and the benchmark solution of the traditional numerical convolution of the impulse response function with the incident signal at a very fine time sampling [i.e. Eq. (1.5) with]. As expected, the order polynomial

diffraction response provides better accuracy () than the order polynomial diffraction response (). It is noted that for a polynomial incident signal for all .

3. Piecewise polynomial diffraction response

In the present section the polynomial diffraction response presented previously is extended to handle discontinuous incident signals (a theoretical limitation of the method), as well as incident signals that require fitting polynomials of high order and thus increased complexity and computational cost. The idea is to separate the incident signal into segments, in each one of which the polynomial diffraction response is valid and/or fitting polynomials of small order n are sufficient.

Let us consider an incident signal f separated into M segments at the separation time points τ_m ($m = 1, 2, \dots, M$) so that every segment f_m can be fitted by a polynomial of order n , P_{n_m} , with good accuracy ($R_{squared} \rightarrow 1$). The index n_m indicates the order of the polynomial used to fit the m -th segment f_m of the incident signal. The incident signal can be written as,

$$f = \underbrace{[H(\tau) - H(\tau - \tau_1)]}_{P_{n_1} \cong f_1} f_1(\tau) + \underbrace{[H(\tau - \tau_1) - H(\tau - \tau_2)]}_{P_{n_2} \cong f_2} f_2(\tau) + \dots + \underbrace{[H(\tau - \tau_{m-1}) - H(\tau - \tau_m)]}_{P_{n_m} \cong f_m} f_m(\tau) + \dots + \underbrace{[H(\tau) - H(\tau - \tau_M)]}_{P_{n_M} \cong f_M} f_M(\tau) \quad (7.1)$$

and its diffraction response is proven to be,

$$pd = \underbrace{r_{n_1} - T_{n_1, \tau_1}}_{P_{n_1} \cong f_1} + \underbrace{T_{n_2, \tau_1} - T_{n_2, \tau_2}}_{P_{n_2} \cong f_2} + \dots + \underbrace{T_{n_m, \tau_{m-1}} - T_{n_m, \tau_m}}_{P_{n_m} \cong f_m} + \dots + \underbrace{T_{n_M, \tau_{M-1}} - T_{n_M, \tau_{inc}}}_{P_{n_M} \cong f_M}, \quad (7.2)$$

$$T_{n_m, \tau_m} = H(\tau - \tau_m) \sum_{j=0}^{n_m} s_j \sum_{k=0}^j \frac{j!}{(j-k)!} \tau_m^{j-k} a_{k+1}(\tau - \tau_m) \quad (7.3)$$

$$T_{n_m, \tau_{m-1}} = H(\tau - \tau_{m-1}) \sum_{j=0}^{n_m} s_j \sum_{k=0}^j \frac{j!}{(j-k)!} \tau_{m-1}^{j-k} a_{k+1}(\tau - \tau_{m-1})$$

where s_j ($j = 0, 1, 2, \dots, n_m$) are the coefficients of the fitting polynomial P_{n_m} . The diffraction response pd is termed *piecewise polynomial diffraction response*. The first two terms of pd come from the polynomial response of the first segment f_1 , while the other terms are diffraction contributions from the other segments of the incident signal with the segment f_m being associated with $T_{n_m, \tau_{m-1}}, T_{n_m, \tau_m}$. The diffracted signal is constructed piece wisely, by tearing (abstracting) the part T_{n_m, τ_m} to mark the end of the segment f_m and sewing (adding) the part T_{n_{m+1}, τ_m} to mark the start of the segment f_{m+1} . Based on this observation, the parameters T_{n_m, τ_m} and T_{n_{m+1}, τ_m} [see Eq.(7.3)] are termed *tearing* and *sewing parameters* of the piecewise diffraction response, respectively. It is noted that they have similar formulation to the diffraction decay of the polynomial response [see Eq.(6.9)]. In fact, the diffraction decay $T_{n_M, \tau_{inc}}$ is the

tearing parameter of the last segment f_M of the incident signal. After the end of f_M at $\tau = T_{inc}$ the incident signal can be thought of as having another segment f_{M+1} , that is equal to zero, and thus, its corresponding sewing parameter $T_{n_{M+1}, T_{inc}}$ is also zero marking the end of the tearing and sewing sequence.

The method and the exact criteria of the how the incident signal is separated are outside the scope of the present study. Figure 3.1 shows an example of the method for an incident signal that is discontinuous at τ_1 . The incident signal is separated at τ_1 and fitted with different polynomials on both sides of the shock.

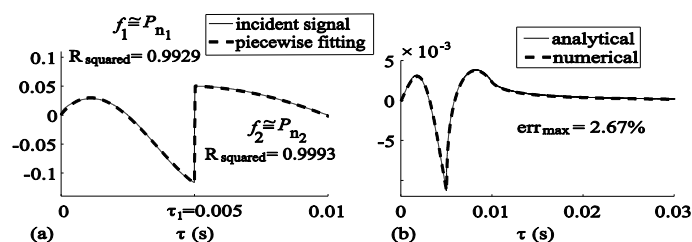


Figure 3.1. Separation of the incident signal and fitting of each segment by different polynomials [(a)]. The diffracted signal calculated analytically using piecewise diffraction [Eqs. (7.2) and (7.3)] and numerically over the entire incident signal with very fine time sampling [(b)].

4. Αναφορές

- [1] M. Baulac, J. Defrance “P. Jean, and F. Minard: Efficiency of noise protections in urban areas: Predictions and scale model measurements.” Acta Acustica united with Acustica **92**, pp 530–539 (2006).
- [2] R. R. Torres, U. P. Svensson, and M. Kleiner, “Computation of edge diffraction for more accurate room acoustics auralization.” J. Acoust. Soc. Am. **109**, pp 600-610 (2001).
- [3] K. M. Li, H. Y. Wong “A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen.” Appl. Acoust. **66** pp 45–76 (2005).
- [4] P. Menounou and P. Nikolaou “Analytical model for predicting edge diffraction in the time domain.” J. Acoust. Soc. Am. **142**, pp 3580–3592 (2017).

Ημι-εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηχομείωσης πίσω από ακουστικά σκληρή σφήνα

Πηνελόπη Μενούνου
Πανεπιστήμιο Πατρών

Βασίλης Ασημακόπουλος
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό της περίθλασης από ακμή σφήνας είναι μαθηματικά πολύπλοκες. Με βάση μια υπάρχουσα προσεγγιστική αναλυτική λύση υπολογίζεται η ηχομείωση που παρέχει η σφήνα σε δέκτη στη ζώνη σκιάς της και προτείνεται για χρήση σε πρακτικές εφαρμογές που απαιτούν απλούς και γρήγορους υπολογισμούς: (i) μια προσεγγιστική σχέση ως συνάρτηση δύο παραμέτρων (και η αντίστοιχη βάση δεδομένων που μπορεί να δημιουργηθεί από αυτή), (ii) ένα νομογράφημα ως οικογένεια καμπυλών και (iii) μια ημι-εμπειρική σχέση που περιέχει απλούς μαθηματικούς τύπους. Οι προτάσεις ελέγχονται μέσω συγκρίσεων με την καθιερωμένη αναλυτική λύση Hadden και με υπάρχοντα ημι-εμπειρικά μοντέλα.

Semi-empirical methods for computing the insertion loss behind an acoustically rigid wedge

ABSTRACT

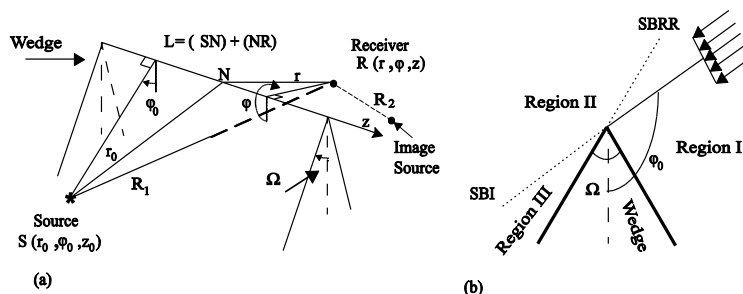
The analytical solutions for the diffraction field around a wedge are mathematically complex. Based on an existing approximate analytical solution the insertion loss in the shadow zone behind a wedge is investigated and the following are proposed for fast and easy calculations: (i) an approximate relation as a function of two parameters (and the corresponding database that can be generated), (ii) the corresponding family of curves, and (iii) a semi-empirical relation containing simple mathematical functions. The recommendations are compared against the established Hadden analytical solution, as well as with existing semi-empirical models.

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πρόβλημα του υπολογισμού της ηχομείωσης που παρέχεται από την παρεμβολή ενός ημι-άπειρου εμποδίου τύπου σφήνας ανάμεσα στην ακουστική πηγή και στον δέκτη. Η παρεμβολή της σφήνας τοποθετεί τον δέκτη σε μια ζώνη σκιάς. Εντούτοις, ο ήχος φτάνει στον δέκτη καθώς περιθλάται στην ακμή της σφήνας. Το Σχήμα 0.1 απεικονίζει τη γεωμετρία του προβλήματος. Το πρόβλημα του υπολογισμού του ακουστικού πεδίου περίθλασης στη ζώνη σκιάς της σφήνας έχει προσεγγιστεί με διάφορες μεθόδους (βλ. βιβλίο αναφοράς [1]). Οι αναλυτικές λύσεις ωστόσο είναι μαθηματικά πολύπλοκες και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές που απαιτούν απλούς και γρήγορους

υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφοροι απλοποιημένοι εμπειρικοί τύποι [2]-[5] ή νομογραφήματα [6],[7] που είτε χρησιμοποιούνται αυτόνομα για τη μελέτη του φαινομένου της περίθλασης είτε ως τμήματα ευρύτερων υπολογισμών της διάδοσης του ήχου στη ατμόσφαιρα [8].

Με βάση μια προσεγγιστική αναλυτική λύση για το πεδίο περίθλασης [9] εξετάζεται η ηχομείωση που παρέχει η σφήνα σε δέκτη στη ζώνη σκιάς της. Για τον υπολογισμό της ηχομείωσης προτείνεται (i) μια προσεγγιστική σχέση ως συνάρτηση δύο παραμέτρων (και η αντίστοιχη βάση δεδομένων που μπορεί να δημιουργηθεί από αυτή), (ii) το αντίστοιχο νομογράφημα ως οικογένεια καμπυλών και (iii) μια ημι-εμπειρική σχέση που περιέχει απλές μαθηματικές συναρτήσεις. Οι προτάσεις ελέγχονται μέσω συγκρίσεων με την καθιερωμένη αναλυτική λύση Hadden [10] καθώς και με υπάρχοντα νομογραφήματα και ημι-εμπειρικά μοντέλα.



Σχήμα 0.1 Γεωμετρία του προβλήματος της περίθλασης από ακμή σφήνας.

1. Υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις για το ακουστικό πεδίο περίθλασης και αριθμητικές συγκρίσεις

Αφετηρία της παρούσας εργασίας αποτελεί μια υπάρχουσα προσεγγιστική αναλυτική λύση [9] για το πεδίο περίθλασης γύρω από σφήνα, P_d , που ισχύει για επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα

$$P_d = -\frac{i}{4} A_f H_0^{(1)}(k\rho) D, \tag{1.1}$$

όπου $H_0^{(1)}(k\rho)$ είναι η συνάρτηση Hankel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης, i η φανταστική μονάδα, $k = 2\pi f / c$ ο κυματαριθμός (f η συχνότητα και c η ταχύτητα διάδοσης του ήχου), A_f ένας παράγοντας εύρους και ρ ένα χαρακτηριστικό γεωμετρικό μήκος του προβλήματος που εξαρτώνται από το είδος του προσπίπτοντος κύματος

$$A_f = \begin{cases} 1 & \text{επίπεδο κύμα,} \\ H_0^{(1)}(kr_0) & \text{κυλινδρικό κύμα,} \\ 1/\sqrt{rr_0} & \text{σφαιρικό κύμα,} \end{cases} \quad \rho = \begin{cases} r & \text{επίπεδο κύμα,} \\ r & \text{κυλινδρικό κύμα,} \\ L & \text{σφαιρικό κύμα,} \end{cases} \tag{1.2}$$

ενώ $D = D^1 + D^2$ είναι μια συνάρτηση κατευθυντικότητας ίδια και για τους τρεις τύπους προσπίπτοντος κύματος

$$D^{1,2} = \pm 2\sqrt{2}u_{1,2}e^{-i\frac{\pi}{2}u_{1,2}^2(\Phi_{1,2}^w)^2} \left(\overline{F(\infty)} + iF(u_{1,2}|\Phi_{1,2}^w|) \right), \quad (1.3)$$

όπου

$$u_1 = \sqrt{\frac{krr_0\pi}{L+R_1}}, \quad \Phi_1^w = \gamma\sqrt{2} \frac{\cos((\varphi-\varphi_0)/\gamma) - \cos(\pi/\gamma)}{\pi \sin(\pi/\gamma)}, \quad \gamma = (2\pi - 2\Omega)/\pi \quad (1.4)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{krr_0\pi}{L+R_2}}, \quad \Phi_2^w = -\gamma\sqrt{2} \frac{\cos((2\pi-\varphi-\varphi_0)/\gamma) + \cos(\pi/\gamma)}{\pi \sin(\pi/\gamma)} \quad (1.5)$$

και F είναι το ολοκλήρωμα Fresnel. Επειδή στην παρούσα εργασία εστιάζουμε σε δέκτες στη ζώνη σκιάς [region III στο Σχήμα 0.1(β)], η γωνία της σφήνας πρέπει να είναι $\Omega < \pi/2$, τα δε πρόσημα στην Εξ.(1.3) είναι πάντα θετικά. Τέλος, επισημαίνεται ότι η λύση δεν ισχύει όταν πηγή και δέκτης είναι πολύ κοντά στην ακμή της σφήνας ($kL \ll 1$).

Σε σύγκριση με την καθιερωμένη λύση Hadden για την περίθλαση γύρω από σφήνα [10], η οποία ομοίως δεν ισχύει κοντά στην ακμή της σφήνας ($krr_0/L \ll 1$) και ισχύει μόνο για σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα, ο υπολογισμός των Εξ. (1.1)-(1.5) είναι σημαντικά γρηγορότερος γιατί απαιτεί τον υπολογισμό δύο ολοκληρωμάτων Fresnel, αντί τεσσάρων.

Στη συνέχεια η αναλυτική σχέση των Εξ. (1.1)-(1.5), αλλά και κάθε άλλη προσεγγιστική ή ημι-εμπειρική λύση που είτε προτείνεται στα πλαίσια της εργασίας, είτε υπάρχει στη βιβλιογραφία, θα συγκρίνεται με τη καθιερωμένη λύση Hadden, η οποία θα αποκαλείται και θα λειτουργεί ως λύση αναφοράς. Ως πρώτο βήμα θα υπολογίζεται (όπου δεν παρέχεται απευθείας) η ηχομείωση, IL , σε δέκτη στη θέση Α στη ζώνη σκιάς

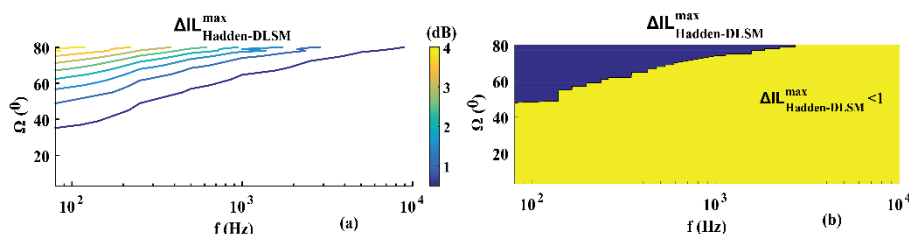
$$IL = -10 \log \left(\frac{P_d^{rms}(A)}{P_0^{rms}(A)} \right)^2, \quad (1.6)$$

όπου P_d^{rms} και P_0^{rms} η μέση τετραγωνική ρίζα της ακουστικής πίεσης στη θέση Α με και χωρίς την παρουσία της σφήνας, αντίστοιχα. Για την αριθμητική σύγκριση της εκάστοτε λύσης με την λύση Hadden υπολογίζουμε την ηχομείωση και με τις δύο λύσεις στη ζώνη σκιάς σε ένα επίπεδο κάθετο στην ακμή της σφήνας σε ένα πυκνό πλέγμα σημείων (r, φ) . Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά των ηχομειώσεων

$\Delta IL_{Hadden-X} = |IL_{Hadden} - IL_X|$ σε κάθε σημείο του πλέγματος και εντοπίζεται η μέγιστη τιμή της, $\Delta IL_{Hadden-X}^{max}$, και το σημείο του πλέγματος r_{max}, φ_{max} στο οποίο αυτή παρατηρείται. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται για διάφορες θέσεις πηγής r_0, φ_0 , γωνίες σφήνας Ω και συχνότητες f και για όλους τους συνδυασμούς των παραπάνω. Από την καταγραφή των μέγιστων διαφορών των ηχομειώσεων $\Delta IL_{Hadden-X}^{max}$ για πλήθος συνδυασμών παραμέτρων $r_0, \varphi_0, \Omega, f$ προέκυψε ότι η διαφορά των δυο ηχομειώσεων (της εξεταζόμενης λύσης και τη λύσης αναφοράς) εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη γωνία Ω και τη συχνότητα f .

Το Σχήμα 1.1 δείχνει την καλή συμφωνία της αναλυτικής λύσης [Εξ. (1.1)] με τη λύση αναφοράς για μεγάλο εύρος τιμών της γωνίας σφήνας Ω και της συχνότητας

f . Αποκλίσεις παρατηρούνται για τον συνδυασμό χαμηλών συχνοτήτων και μεγάλων γωνιών σφήνας.



Σχήμα 1.1 Απόκλιση της ηχομείωσης που υπολογίζεται από την Εξ. (1.1) σε σχέση με την ηχομείωση που υπολογίζεται από την λύση αναφοράς Hadden.

2. Προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό της ηχομείωσης

Μπορεί να αποδειχθεί ότι αντικαθιστώντας την Εξ.(1.1) στην Εξ.(1.6) και θεωρώντας $R_2 \approx R_1$, η ηχομείωση και για τα τρία είδη προσπίπτοντος κύματος μπορεί να γραφεί σε απλή προσεγγιστική μορφή ως

$$IL_{\text{appr}} = IL_c + IL_{sp} \quad (1.7)$$

$$IL_c = -10 \log \left[\left| F(\infty) - F(\sqrt{2N_1}) \right| + e^{i\pi(N_1 - N_2)} \left| F(\infty) - F(\sqrt{2N_2}) \right| \right]^2 \quad (1.8)$$

$$IL_{sp} = \begin{cases} -10 \log \frac{1}{(L/R_1) + 1} & \text{για κυλινδρικά κύματα,} \\ 3 \text{ dB} & \text{για επίπεδα κύματα,} \\ -10 \log \frac{1}{(L/R_1)^2 + (L/R_1)} & \text{για σφαιρικά κύματα} \end{cases} \quad (1.9)$$

όπου ο πρώτος όρος IL_c είναι κοινός για όλα τα είδη προσπίπτοντος κύματος και συνάρτηση των παραμέτρων

$$N_1 = \frac{u_1^2 |\Phi_1^w|^2}{2}, \quad N_2 = \frac{u_2^2 |\Phi_2^w|^2}{2}, \quad (1.10)$$

ενώ ο δεύτερος όρος IL_{sp} είναι διαφορετικός για κάθε είδος προσπίπτοντος κύματος και συνάρτηση του λόγου L/R_1 . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος IL_c είναι μαθηματικά πολύπλοκος και υπολογιστικά δαπανηρός καθώς απαιτεί υπολογισμούς ολοκληρωμάτων Fresnel, ενώ ο όρος IL_{sp} είναι εξαιρετικά απλός.

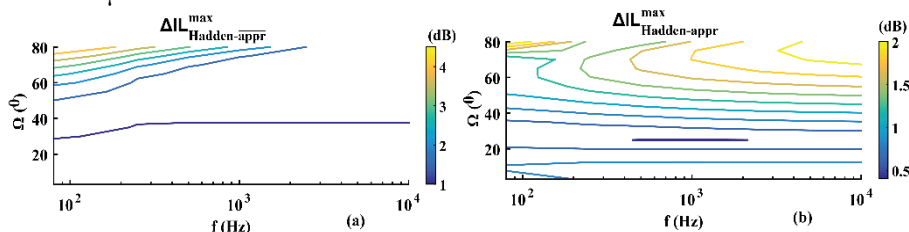
Το Σχήμα 2.1(α) απεικονίζει την απόκλιση της προτεινόμενης προσεγγιστικής σχέσης [Εξ.(1.7)] από τη λύση αναφοράς Hadden ως συνάρτηση της γωνίας σφήνας Ω και της συχνότητας f . Παρατηρούμε ότι, όπως και στο Σχήμα 1.1, η απόκλιση είναι υψηλότερη για μεγάλες γωνίες σφήνας σε χαμηλές συχνότητες.

Η πρόλεξη της λύσης βελτιώνεται αν προσθέσουμε τον όρο IL_w

$$IL_{\text{appr}} = IL_c + IL_{sp} + IL_w \quad (1.11)$$

$$IL_w = -2.5 \sin^2(\Omega). \tag{1.12}$$

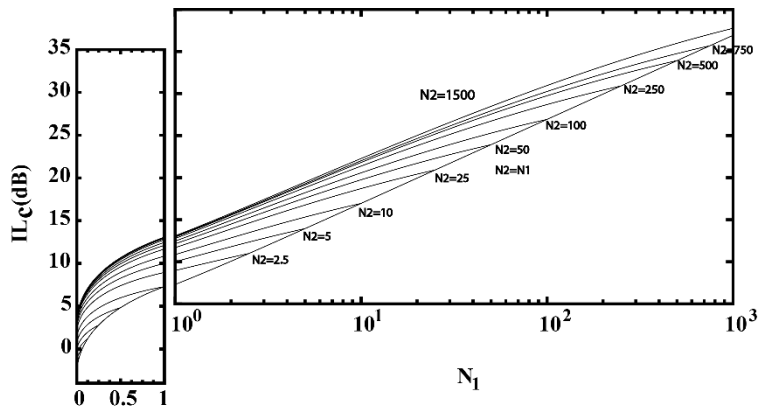
Η σαφώς καλύτερη συμφωνία με τη λύση αναφοράς απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1(β), όπου επίσης παρατηρείται ότι η συχνότητα δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.1 Σύγκριση της προσεγγιστικής σχέσης (1.7) [(α)] και της βελτιωμένης προσεγγιστικής σχέσης (1.11) [(β)] με τη λύση αναφοράς Hadden.

3. Νομογράφημα για τον υπολογισμό της ηχομείωσης

Ο μαθηματικά πολύπλοκος όρος της ηχομείωσης IL_c μπορεί να απεικονιστεί ως οικογένεια καμπυλών συναρτήσει δύο παραμέτρων N_1 και N_2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Επισημαίνεται ότι η ίδια οικογένεια καμπυλών έχει προταθεί για ηχοπετάσματα [11], αλλά με διαφορετικό ορισμό και ερμηνεία των παραμέτρων.



Σχήμα 3.1 Προτεινόμενο νομογράφημα για τον υπολογισμό της ηχομείωσης στη ζώνη σφίνας μιας σφίνας ως συνάρτηση των παραμέτρων N_1 και N_2 .

Σε αντίθεση με τα νομογραφήματα Maekawa (καμπύλη Maekawa [6] για σφίνα μηδενικής γωνίας και διόρθωση για τη μη-μηδενική γωνία από οικογένεια καμπυλών με παραμέτρους τη γωνία της σφίνας και την γωνία πρόσπτωσης του ήχου [7]), το προτεινόμενο νομογράφημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για σφαιρικά, αλλά και για κυλινδρικά και επίπεδα κύματα, ενώ ένα και μοναδικό νομογράφημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις γωνίες σφίνας και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης.

Τέλος, προτείνεται η αποθήκευση μιας βάσης δεδομένων των τιμών του IL_c από την Εξ.(1.8) ως συνάρτηση δύο παραμέτρων, που όχι μόνο θα αντικαθιστούσε το νομογράφημα, αλλά θα μπορούσε να προσφέρει γρήγορα αποτελέσματα αυξημένης ακρίβειας.

4. Ημι-εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της ηχομείωσης

Στη συνέχεια προτείνεται η ακόλουθη ημι-εμπειρική σχέση που περιέχει απλές μαθηματικές συναρτήσεις στη θέση των ολοκληρωμάτων Fresnel

$$IL_{emp} = IL_s + IL_b + IL_{sb} + IL_w + IL_{sp} = IL_c + IL_w + IL_{sp} \quad (2.1)$$

$$IL_s = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N_1}}{\tanh \sqrt{2\pi N_1}} - 1 \quad (2.2)$$

$$IL_b = 20 \log \left[1 + \tanh \left(0.6 \log \frac{N_2}{N_1} \right) \right], \quad (2.3)$$

$$IL_{sb} = (6 \tanh \sqrt{N_2} - 2 - IL_b)(1 - \tanh \sqrt{10N_1}), \quad (2.4)$$

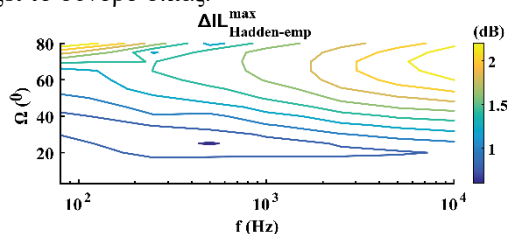
ενώ το IL_{sp} και IL_w δίνονται από τις Εξ. (1.9) και (1.12), αντίστοιχα. Ο πρώτος όρος, IL_s , είναι συνάρτηση της παραμέτρου N_1 , ο οποίος σχετίζεται με τη θέση του δέκτη ως προς το σύνορο της ζώνης σκιάς. Ο δεύτερος όρος, IL_b , είναι συνάρτηση του λόγου N_2/N_1 , ο οποίος σχετίζεται με την εγγύτητα είτε της πηγής είτε του δέκτη με την επιφάνεια του εμποδίου. Ο τρίτος όρος, IL_{sb} , γίνεται υπολογίσιμος μόνο όταν το N_1 είναι πολύ μικρό, το οποίο με τη σειρά του συμβαίνει όταν ο δέκτης είναι πολύ κοντά στο σύνορο σκιάς. Υπενθυμίζεται ότι ο όρος IL_w εξαρτάται από τη γωνία σφήνας Ω και είναι μηδενικός για ηχοπετάσματα, ενώ ο IL_{sp} είναι ο μοναδικός όρος που εξαρτάται από τον τύπο του προσπίπτοντος κύματος και είναι συνάρτηση του λόγου L/R_1 .

Το Σχήμα 4.1 δείχνει την σχετικά καλή συμφωνία της προτεινόμενης ημι-εμπειρικής σχέσης με τη λύση αναφοράς. Η μέγιστη απόκλιση δεν υπερβαίνει τα 2.5 dB για κανένα συνδυασμό των βασικών παραμέτρων Ω και f . Η ημι-εμπειρική σχέση παρέχει καλύτερες προβλέψεις για μικρότερες γωνίες Ω (σε σχέση με τις μεγαλύτερες), ενώ η συχνότητα f δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την συμφωνία των προλέξεων (σχεδόν καθόλου για μικρές γωνίες Ω).

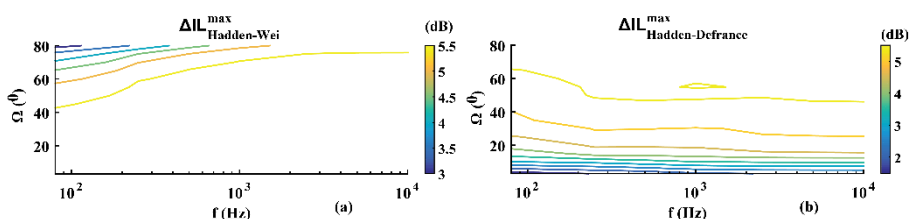
Στη συνέχεια εξετάζουμε υπάρχουσες ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ηχομείωσης στη ζώνη σκιάς μια σφήνας. Συγκεκριμένα, την πρόσφατη προσεγγιστική σχέση των Wei et. al [5], τη λύση Defrance-Gabillet [4] και το μοντέλο πρόλεξης Harmonoise [8].

Το μοντέλο του Wei [5] στηρίζεται στη λύση Hadden (και συγκεκριμένα στη μορφή της με δύο όρους) και χρησιμοποιεί απλοποιητικές σχέσεις για τον υπολογισμό των ολοκληρωμάτων Fresnel. Το Σχήμα 4.2(α) δείχνει τις υπολογιζόμενες ηχομείωσεις σε σχέση με τη λύση αναφοράς. Παρατηρείται ότι η προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση (βλ. Σχήμα 4.1) παρέχει καλύτερες προλέξεις (μικρότερες διαφορές από τη λύση αναφοράς) σε σχέση με τη λύση του Wei και σε μεγαλύτερο εύρος

παραμέτρων συχνότητας και γωνιών σφήνας. Τέλος, από τα αριθμητικά πειράματα προέκυψε ότι η λύση Wei αποκλίνει από την λύση αναφοράς όσο η γωνιακή θέση του δέκτη πλησιάζει το σύνορο σκιάς.



Σχήμα 4.1 Σύγκριση της ημι-εμπειρικής σχέσης [Εξ (2.1)] με τη λύση αναφοράς Hadden για διάφορες γωνίες Ω και συχνότητες f .



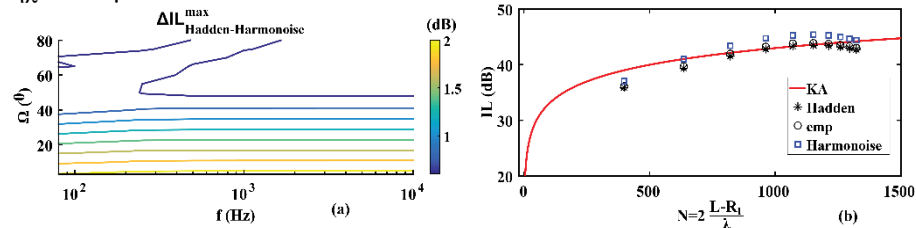
Σχήμα 4.2 Σύγκριση της λύσης των Wei et al. [5] [(α)] και της λύσης Defrance-Gabillet [4] [(β)] με τη λύση αναφοράς Hadden.

Οι μέθοδοι Defrance και Harmonoise βασίζονται πάνω στο μοντέλο Deygout[3]. Το μοντέλο Deygout παρέχει μια απλοποιητική σχέση για τον υπολογισμό της περίθλασης από απολύτως απορροφητικό ημι-επίπεδο (όπως η λύση Kirchhoff) και εφαρμόζεται τέσσερις φορές για τον υπολογισμό της περίθλασης από σφήνα όχι κατ'ανάγκη ηχο-απορροφητική. Στο μοντέλο Harmonoise τα φαινόμενα περίθλασης συνυπολογίζονται με τα φαινόμενα ανάκλασης σε επίπεδες επιφάνειες. Εδώ όμως η εφαρμογή γίνεται αυστηρά για την περίπτωση της μεμονωμένης ακουστικά σκληρής σφήνας.

Στο Σχήμα 4.2(β) φαίνονται οι διαφορές των προλέξεων της λύσης Defrance με τη λύση αναφοράς. Η προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση (βλ. Σχήμα 4.1) παρέχει καλύτερες προλέξεις (μικρότερες διαφορές από τη λύση αναφοράς) σε σχέση με τη λύση Defrance. Σε αντίθεση με την λύση Wei, παρατηρείται ότι οι διαφορές δεν επηρεάζονται από την συχνότητα και οι προλέξεις βελτιώνονται για μικρές (αντί για μεγάλες) γωνίες Ω . Τέλος, από τα αριθμητικά πειράματα προέκυψε ότι η λύση του Defrance αποκλίνει από τη λύση αναφοράς όσο η γωνιακή θέση του δέκτη πλησιάζει στην επιφάνεια της σφήνας.

Τέλος, στο Σχήμα 4.3(α) φαίνονται οι διαφορές των προλέξεων του μοντέλου Harmonoise με τη λύση αναφοράς. Οι αποκλίσεις από τη λύση αναφοράς είναι συγκρίσιμες με αυτές της προτεινόμενης ημι-εμπειρικής σχέσης (βλ. Σχήμα 4.1). Σε αντίθεση όμως με την ημι-εμπειρική σχέση, το μοντέλο Harmonoise παρέχει χειρότερες προβλέψεις για μικρές γωνίες Ω . Το Σχήμα 4.3(β) παρουσιάζει αυτές τις αποκλίσεις για την περίπτωση ηχοπετάσματος ($\Omega = 0$). Για λόγους αναφοράς, στο

Σχήμα 4.3(β) απεικονίζεται και η καθιερωμένη σχέση Kurze-Anderson [2] για ηχοπέτασμα.



Σχήμα 4.3 [(α)]: Σύγκριση του μοντέλου Harmonoise [8] με τη λύση αναφοράς Hadden για διάφορες γωνίες Ω και συχνότητες f . [(β)]: Σύγκριση των ηχομειώσεων από ηχοπέτασμα ($\Omega = 0$) για δέκτες με την ίδια γωνιακή θέση $\phi = 130^\circ$ (βαθιά στη ζώνη σκιάς) αλλά με διαφορετική ακτινική θέση βάσει διαφόρων μοντέλων.

5. Αναφορές

- [1] J. J. Bowman and T. B. A. Senior, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, edited by J. J. Bowman, T. B. A. Senior, and P. L. E. Uslenghi, North-Holland, Amsterdam, (1969).
- [2] U. J. Kurze and G. S. Anderson, «Sound attenuation by barriers» *Appl. Acoust.* **4**, pp 35-53 (1971).
- [3] J. Deygout, «Multiple knife-edge diffraction by microwaves» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **14**, pp 480-489 (1966)
- [4] J. Defrance and Y. Gabillet, «A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation» *Applied Acoustics* **57**, pp 109-127 (1999).
- [5] W. Wei, T. van Renterghem and D. Botteldooren «Fast evaluation of sound diffraction over complex and multiple rigid obstacles» in *Proceedings of Euronoise 2018*, European Acoustics Association (2018)
- [6] Z. Maekawa, «Noise reduction by screens» *Appl. Acoust.* **1**, pp 157 (1968).
- [7] Z. Maekawa and S. Osaki, «A simple Chart for the Estimation of the Attenuation by a Wedge Diffraction» *Appl. Acoust.* **18**, pp 355-368 (1985).
- [8] D. v. Maercke and J. Defrance, «Development of an Analytical Model for Outdoor Sound Propagation Within the Harmonoise Project» *Acta Acustica united with Acustica* **93**, pp 201-212 (2007)
- [9] P. Menounou and P. Nikolaou, «An extension to the directive line source model for diffraction by half planes and wedges» *Acust. Acta Acust.* **102**, pp 307–321 (2016).
- [10] W. J. Hadden and A. D. Pierce, «Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations» *J. Acoust. Soc. Am.* **69**, pp 1266-1276 (1981).
- [11] P. Menounou, «A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers» *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, pp 1828–1838 (2001).

Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τον υποθαλάσσιο θόρυβο και το πρόγραμμα QUIETMED.

Μιχαήλ Ταρουδάκης*, Εμμανουήλ Σκαρσουλής, Παναγιώτης Παπαδάκης,
Γεώργιος Πιπεράκης .
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, Ι.Τ.Ε.
Ν. Πλαστήρα 100 Βασιλικά Βουτών 70 013 Ηράκλειο Κρήτη,
*επίσης, Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμ. Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης
taroud@uoc.gr, eskars@iacm.forth.gr, panos@iacm.forth.gr,
piperak@iacm.forth.gr,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει συνοπτικά την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος ως προς τον υποθαλάσσιο θόρυβο, όπως αυτή αποτυπώνεται στην οδηγία 208/56/ΕΚ γνωστή ως Marine Strategy Framework Directive.

Σύμφωνα με την οδηγία αυτή τα εθνικά κράτη-μέλη θα πρέπει μέχρι το 2022 να εξασφαλίσουν με διάφορα μέσα μια καλή κατάσταση στις Ευρωπαϊκές θάλασσες (Good Environmental Status).

Το πρόγραμμα QUIETMED της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στο οποίο συμμετέχει το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, αποσκοπεί στη διατύπωση ενιαίας μεθοδολογίας ανάμεσα στα κράτη που βρέχονται από τη Μεσόγειο, ως προς την παρακολούθηση και την καταγραφή του υποβρύχιου θορύβου.

Στην εργασία περιγράφονται οι στόχοι του προγράμματος και η συμμετοχή του ΙΤΕ σε αυτό.

The policy of the European Union as regards the ambient noise in the sea and the QUIETMED project.

ABSTRACT

The paper summarizes the policy of the European Union to protect the marine environment from underwater noise as reflected in Directive 208/56 / EC known as the Marine Strategy Framework Directive.

According to this directive, the member States will have to ensure Good Environmental Status by 2022.

The European Commission's QUIETMED program, in which the Foundation for Research and Technology Hellas is participating, aims to develop a uniform methodology among the Mediterranean coastal states for the monitoring and recording of the underwater noise.

The paper describes the objectives of the program and the participation of FORTH in it.

Εισαγωγή

Το 2008 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο υιοθέτησε την οδηγία 2008/56/ΕΚ που εκφράζει τη θέση της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τη θαλάσσια στρατηγική, η οποία αφορά την προστασία και τη διατήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, με γενικούς στόχους την προαγωγή της αειφόρου χρήσης των θαλασσών και τη διατήρηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Σύμφωνα με αυτή, κάθε κράτος μέλος θα πρέπει να εκπονήσει μια θαλάσσια στρατηγική για τα θαλάσσια ύδατά του, η οποία, θα αντανakλά και τις συνολικές προοπτικές της αντίστοιχης θαλάσσιας περιφέρειας ή υποπεριφέρειας στην οποία ανήκει (στην περίπτωση της Ελλάδας τη Μεσόγειο Θάλασσα). Η οδηγία αυτή είναι γνωστή ως Marine Strategy Framework Directive (MSFD) [1]. Πρόσφατα εκδόθηκε και η απόφαση (ΕΕ) 2017/848 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής με την οποία εξειδικεύονται περισσότερο θέματα που αφορούν τους δείκτες παρακολούθησης της ποιότητας του περιβάλλοντος και η προτεινόμενη στα κράτη-μέλη μεθοδολογία.

Ανάμεσα στους δείκτες που καθορίζουν την ποιότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος είναι και ο υποθαλάσσιος θόρυβος, αναφερόμενος ως 11ος δείκτης στο παράρτημα 1 της οδηγίας ανάμεσα στα χαρακτηριστικά ποιοτικής περιγραφής για τον προσδιορισμό της καλής περιβαλλοντικής κατάστασης. Εκεί ορίζεται σαφώς ότι «Η εισαγωγή ενέργειας, καθώς και υποθαλάσσιου θορύβου θα πρέπει να βρίσκονται σε επίπεδα που δεν επηρεάζουν δυσμενώς το θαλάσσιο περιβάλλον». Τα Εθνικά Κράτη θα πρέπει να επιτύχουν μια καλή περιβαλλοντική κατάσταση (Good Environmental Status) και ως προς τον δείκτη αυτό μέχρι το 2022. Η Ευρωπαϊκή ένωση έχει διατυπώσει τις προτεραιότητές της ως προς τα είδη του υποθαλάσσιου θορύβου που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν από τα Κράτη προκειμένου να οργανώσουν άμεσα τα σχετικά συστήματα καταγραφής ταξινόμησης και παρακολούθησης του εν λόγω θορύβου.

Η ομάδα Υποβρύχιας Ακουστικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) συμμετέχει στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα "QUIETMED" που έχει ως στόχο την διατύπωση με τη μορφή οδηγίας κοινών εθνικών πρακτικών ως προς την παρακολούθηση του υποθαλάσσιου θορύβου στη Μεσόγειο Θάλασσα. Στην παρουσίαση εκτίθενται οι στόχοι του προγράμματος καθώς και η συμμετοχή του ΙΤΕ σε αυτό που εστιάζεται στην μελέτη και πιλοτική λειτουργία ευέλικτων κινητών διατάξεων ακρόασης και στη συνέχεια ανάλυσης του υποθαλάσσιου θορύβου καθώς και στην βαθμονόμηση των υδροφώνων που θα χρησιμοποιηθούν.

1. Η Ευρωπαϊκή οδηγία ως προς τον υποθαλάσσιο θόρυβο

1.1 Παλμικοί θόρυβοι

Παλμικοί θόρυβοι είναι ακουστικά σήματα μικρής διάρκειας ανθρωπογενούς προέλευσης που οφείλονται κυρίως σε δράσεις του ανθρώπου στη θάλασσα. Μεταξύ των άλλων, παλμικούς θορύβους παράγουν σκάφη που πραγματοποιούν υποθαλάσσιες σεισμικές και ακουστικές έρευνες, πλωτές δεξαμενές άντλησης πετρελαίου, σκάφη που πραγματοποιούν εργασίες αγκυρώσεων ή γενικότερα εργασιών που σχετίζονται με τον θαλάσσιο βυθό.

Τα κριτήρια για την επίτευξη ικανοποιητικών περιβαλλοντικών συνθηκών όπως αυτά ορίζονται στην οδηγία είναι η χωρική κατανομή, η χρονική έκταση και τα

επίπεδα παλμικών ήχων ανθρωπογενούς προέλευσης να μην υπερβαίνουν τα επίπεδα που επηρεάζουν δυσμενώς τους πληθυσμούς θαλάσσιων ζώων.

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να καθορίσουν οριακές τιμές για τα επίπεδα αυτά μέσω συνεργασίας σε επίπεδο Ένωσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιομορφίες κάθε περιοχής ή υποπεριοχής.

Ο παλμικός ήχος περιγράφεται ως μονοπολικό επίπεδο πηγής ενέργειας σε μονάδες $dB re 1\mu Pa^2/sec$ ή μηδενικό μέχρι ανώτατο μονοπολικό επίπεδο πηγής σε μονάδες $dB re 1\mu Pa^2/m$ για τις ζώνες συχνότητας 10 Hz έως 10 kHz. Τα κράτη μέλη δύνανται να εξετάζουν άλλες συγκεκριμένες πηγές με υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων εάν θεωρούνται σημαντικές οι επιπτώσεις σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Στην πραγματικότητα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αφήνει ανοικτό το θέμα του καθορισμού των ορίων εκπομπής παλμικών θορύβων αλλά ζητά τη δημιουργία ενός αρχείου σε κάθε κράτος-μέλος που θα καταγράφει τους θορύβους αυτούς σε ετήσιο επίπεδο. Έτσι ζητά καταγραφή της διάρκειας των παλμικών ήχων ανθρωπογενούς προέλευσης ανά ημερολογιακό έτος, η κατανομή τους εντός του έτους και χωρικά στην περιοχή αξιολόγησης, καθώς και το κατά πόσον έχουν επιτευχθεί οι καθορισμένες οριακές τιμές που έχουν ορίσει. Επομένως το πεδίο αυτό επιδέχεται περαιτέρω μελέτης.

1.2 Συνεχείς θόρυβοι

Συνεχής χαρακτηρίζεται ο θόρυβος που κυριαρχεί στο θαλάσσιο περιβάλλον και οφείλεται σε πηγές που δεν είναι αυστηρά παροδικές ενώ μπορεί να είναι ανθρωπογενείς ή φυσικές. Κυρίαρχες πηγές είναι η ναυσιπλοΐα σε συχνότητες κάτω από τα 1000 Hz (ανθρωπογενής πηγή) και ο επιφανειακός άνεμος που δημιουργεί την επιφανειακή αναταραχή των κυμάτων και κυριαρχεί σε υψηλότερες συχνότητες [2]. Σύμφωνα με την οδηγία, ο θόρυβος σε πρώτη φάση θα πρέπει να μετρηθεί σε επίπεδο περιοχής ή υποπεριοχής, σε μονάδες του τετραγώνου της ηχητικής πίεσης (έκφραση ενέργειας) σε καθεμιά από δυο «ζώνες του 1/3 της οκτάβας», με κέντρο τα 63 Hz η μία και με κέντρο τα 125 Hz, η άλλη, εκφρασμένος σε μονάδες $dB re 1\mu Pa^2$ σε κατάλληλη χωρική ανάλυση. Τα εν λόγω μεγέθη, σύμφωνα με την οδηγία, δύνανται είτε να υπολογιστούν απευθείας είτε να συναχθούν από ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για παρεμβολή ή παρεκβολή από τις μετρήσεις. Τα κράτη μέλη δύνανται επίσης να αποφασίσουν σε επίπεδο περιοχής ή υποπεριοχής να παρακολουθούν επιπλέον ζώνες συχνοτήτων.

Από την ανάγνωση της οδηγίας, προκύπτει ότι η Ευρωπαϊκή επιτροπή δίνει προτεραιότητα στο θόρυβο από τη ναυσιπλοΐα που είναι περισσότερο έντονος στις συχνότητες έως λίγες εκατοντάδες Hz. Ωστόσο εισαγάγει την έννοια της μοντελοποίησης του θαλάσσιου θορύβου που για τις συχνότητες ενδιαφέροντος προέρχεται από τη ναυσιπλοΐα. Το θέμα της μοντελοποίησης του θορύβου από τη ναυσιπλοΐα απασχολεί την επιστημονική κοινότητα πολλά χρόνια (ενδεικτική βιβλιογραφία [3-5]) ωστόσο δεν είναι ακόμη σε ώριμη μορφή για να αποτελέσει ασφαλή ποσοτικά μέθοδο παρακολούθησης της στάθμης του θορύβου ναυσιπλοΐας στο θαλάσσιο περιβάλλον. Προκαταρκτικές μελέτες πάντως έχουν δείξει ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα στο άμεσο μέλλον οι εκτιμήσεις που προέρχονται από τα μοντέλα να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να επιτευχθεί πιστοποίηση των μοντέλων πρόβλεψης, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή συστηματικών μετρήσεων υποθαλάσσιου θορύβου από μόνιμους ή κινητούς

σταθμούς μέτρησης, μια διαδικασία που ενθαρρύνεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και η ποσοτική και ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων μέτρησης με εκείνες της μοντελοποίησης.

2. Το πρόγραμμα QUIETMED

Το πρόγραμμα QUIETMED χρηματοδοτήθηκε από την Διεύθυνση Περιβάλλοντος (DG for Environment) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Ε.Ε.). Στόχος του είναι η ομογενοποίηση των πρακτικών υλοποίησης της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για το Περιβάλλον σε ό,τι αφορά στον υποθαλάσσιο θόρυβο ανάμεσα στα κράτη της Μεσογείου και η διάχυση των πρακτικών αυτών σε τρίτα κράτη που βρέχονται από τη Μεσόγειο. Η δομή των εταιρών του Προγράμματος εμφανίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Οι εταιρείες στο πρόγραμμα QUIETMED

Στα πλαίσια του έργου μελετήθηκαν οι διαδικασίες που είχαν αναληφθεί από τα κράτη-μέλη της Ε.Ε που βρέχονται από τη Μεσόγειο μέχρι το 2016, προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι θα επιτευχθούν οι επιθυμητοί δείκτες καλής περιβαλλοντικής κατάστασης μέχρι το 2022, και ξεκίνησε η αποτύπωση των διαφορών στην αντιμετώπιση των οδηγιών της Ε.Ε. Σημαντικός στόχος του έργου ήταν η άμβλυση των πιθανών διαφορών, η διατύπωση καλών πρακτικών για την καταγραφή και συστηματική καταχώρηση σε βάσεις δεδομένων των παλμικών θορύβων, καθώς και η μελέτη βέλτιστων λύσεων για την συστηματική καταγραφή, μοντελοποίηση και ανάλυση του υποθαλάσσιου θορύβου στις συχνότητες ενδιαφέροντος της Ε.Ε. Έτσι, θέματα βαθμονόμησης και ελέγχου της καλής λειτουργίας τυπικών συστημάτων ακρόασης καταγραφής και ανάλυσης του υποθαλάσσιου θορύβου περιελήφθησαν στις προτεραιότητες του προγράμματος με στόχο τη διατύπωση γενικών κανόνων ως προς την ορθή χρήση των διαθέσιμων οργάνων για την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής οδηγίας για την παρακολούθηση του συνεχούς θορύβου. Το πρόγραμμα βρίσκεται κοντά στη λήξη του, έχοντας ήδη υλοποιήσει με επιτυχία πιλοτικά πειράματα πόντισης βαθμονόμησης και λειτουργίας μετρητικών συστημάτων για την

παρακολούθηση του υποθαλάσσιου θορύβου. Στη συνέχεια αναφέρεται επιγραμματικά η συμμετοχή του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) σε αυτό.

3. Πιλοτικά προγράμματα μοντελοποίησης και μέτρησης του υποθαλάσσιου θορύβου

Το Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών του ΙΤΕ έχει αναλάβει δύο βασικές δράσεις στα πλαίσια του έργου. Η πρώτη αφορά στην αξιολόγηση των προγραμμάτων εκτίμησης σε πραγματικό χρόνο του θορύβου από τη ναυσιπλοΐα (traffic noise) που περιέχει στοιχεία μοντελοποίησης της παραγωγής και διάδοσης της ακουστικής ενέργειας που προέρχεται από πλοία στο νερό. Η δεύτερη αφορά στην διεξαγωγή πιλοτικών πειραμάτων μέτρησης του υποθαλάσσιου θορύβου.

3.1 Μοντελοποίηση υποθαλάσσιου θορύβου ναυσιπλοΐας

Το Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών του ΙΤΕ έχει ασχοληθεί από παλιά με το θέμα της εκτίμησης του θορύβου ναυσιπλοΐας. Η έρευνα αυτή πρόσφατα οδήγησε στην ανάπτυξη ενός συστήματος εκτίμησης του θορύβου ναυσιπλοΐας για την Ανατολική Μεσόγειο σε πραγματικό χρόνο, με χρήση δεδομένων ναυσιπλοΐας από το σύστημα AIS (Automatic Identification System). Τα χαρακτηριστικά των πηγών θορύβου ανάλογα με το είδος του κάθε πλοίου που συμμετέχει στον υπολογισμό του θορύβου, ελήφθησαν από τυπικές μοντελοποιήσεις της βιβλιογραφίας ενώ για τον υπολογισμό της διάδοσης του ήχου στη θάλασσα χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα αδιαβατικής προσέγγισης της θεωρίας κανονικών ιδιομορφών. Τα περιβαλλοντικά δεδομένα για κάθε χρονική περίοδο υπολογίστηκαν από ιστορικά στοιχεία και η βαθυμετρία και το ανάγλυφο της Μεσογειακής λεκάνης ελήφθησαν από ψηφιακούς χάρτες. Το μοντέλο περιγράφεται στην εργασία [5] και δίνει εξαιρετικά ποιοτικά αποτελέσματα για όλη την ανατολική λεκάνη της Μεσογείου.

Σε ό,τι αφορά στην Ευρωπαϊκή οδηγία και στο πρόγραμμα QUIETMED η ομάδα το ΙΤΕ μελέτησε θεωρητικά την αξιοπιστία των δεδομένων που υπάρχουν αυτή τη στιγμή διαθέσιμα προκειμένου να καταστεί δυνατή η ασφαλής πρόβλεψη του θορύβου ναυσιπλοΐας και ποσοτικά, δεδομένου ότι τα πραγματικά επίπεδα θορύβου θα πρέπει να αποτυπώνονται στο μέλλον. Εκτίμηση της ομάδας είναι ότι πρέπει να διευκρινιστούν ακόμη θέματα που αφορούν τα πραγματικά φάσματα εκπομπής θορύβου από τις διάφορες κατηγορίες των πλοίων καθώς και η θέση (βάθος) της πηγής εκπομπής.

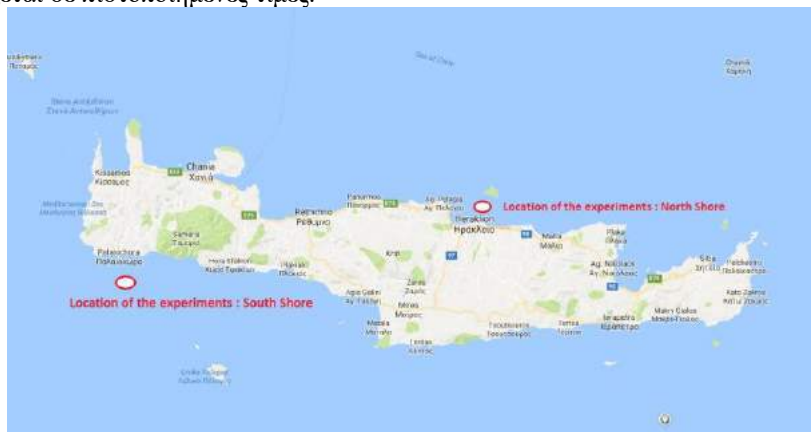
3.2 Πιλοτικά προγράμματα

Στο Εργαστήριο Υδροακουστικής του ΙΤΕ έχουν κατασκευαστεί αυτόνομες συσκευές παρακολούθησης και καταγραφής του ηχητικού πεδίου στη θάλασσα. Οι συσκευές αυτές έχουν πολλαπλές εφαρμογές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για ακρόαση ήχου που προκαλείται από θαλάσσιους οργανισμούς, (εφαρμογές βιοακουστικής) όσο και για την καταγραφή υποθαλάσσιου θορύβου. Κρίνονται συνεπώς ιδεώδεις για την χρήση τους με κατάλληλη αγκυροβόληση σε θαλάσσια παρατηρητήρια που πρέπει να εγκατασταθούν σε εφαρμογή της ευρωπαϊκής οδηγίας.

Οι κωδικοί των συσκευών αυτών είναι ULx με το UL να αντιστοιχεί στα αρχικά Underwater Listener.

Στα πλαίσια του προγράμματος QUIETMED οι συσκευές αυτές θα έπρεπε να βαθμονομηθούν με χρήση πιστοποιημένων τεχνικών βαθμονόμησης και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν σε βραχυχρόνια πιλοτικά προγράμματα μέτρησης του υποθαλάσσιου θορύβου. Στόχος είναι βέβαια να διαπιστωθεί η επιχειρησιακή ικανότητά τους να αναλάβουν τον ρόλο των συσκευών καταγραφής του θορύβου στις περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά των μετρητικών διατάξεων σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές. Οι συσκευές περιγράφονται στις εργασίες [5] και [6].

Η βαθμονόμησή τους πραγματοποιήθηκε στην δεξαμενή δοκιμών του εργαστηρίου, σε ημι-ανεχοϊκό θάλαμο του Ινστιτούτου Πληροφορικής του ΙΤΕ αλλά και στο πεδίο στα πλαίσια πιλοτικών προγραμμάτων που σχεδιάστηκαν να υλοποιηθούν σε επιλεγμένα σημεία στις ακτές της Κρήτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαδικασίες βαθμονόμησης οργάνων όπως αυτά που κατασκευάστηκαν στο ΙΤΕ αλλά και όσων πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για υποβρύχιες μετρήσεις αντίστοιχης κλίμακας, αποτελούν σημαντικό θέμα για το QUIETMED καθώς η ανάλυση δεδομένων που έχουν ληφθεί από διαφορετικές μετρητικές συσκευές πρέπει να βασίζεται σε πιστοποιημένες τιμές.



Σχήμα 3.2 Τα σημεία των πρώτων πειραμάτων του προγράμματος QUIETMED που υλοποίησε το ΙΤΕ.

Ήδη έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία τρία πειράματα μέτρησης του υποθαλάσσιου θορύβου με τα προαναφερθέντα όργανα (Σχήματα 3.1, 3.2). Τα δύο πρώτα από αυτά διεξήχθησαν στην ίδια θαλάσσια περιοχή βόρεια του λιμένος Ηρακλείου Κρήτης στο μισό περίπου της απόστασης του λιμένος από τη νήσο Ντία και ήταν διάρκειας μίας ημέρας το καθένα. Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της βαθμονόμησης αλλά και χρήσης τους σε μικρό σχετικά βάθος για την μέτρηση του θορύβου. Η πόντιση των οργάνων έγινε από ιστιοπλοϊκό σκάφος με κατάστρωμα ικανού μεγέθους για την αποθήκευση αλλά και τις προετοιμασίες πόντισης και ανέλκυσης των οργάνων. Τα όργανα ήταν υπο την επιτήρηση των μελών της ομάδας σε όλη τη διάρκεια του πειράματος Το τρίτο πείραμα περιγράφεται σε άλλη εργασία

του παρόντος συνεδρίου από τους ίδιους συγγραφείς και διεξήχθη στην θαλάσσια περιοχή νότια της Παλαιόχωρας (Λιβυκό πέλαγος) ήταν δε διάρκειας τριών ημερών και πρόσθετος στόχος ήταν να διαπιστωθεί η δυνατότητα πόντισης των οργάνων με τη μορφή θαλάσσιου παρατηρητηρίου με αγκύρωση στο βυθό. Έτσι δεν ήταν απαραίτητη η επιτήρηση των οργάνων τα οποία παρέμεναν στη θάλασσα μέχρι την ανέλκυσή τους.



Σχήμα 3.2 Οι δύο αυτόνομες συσκευές καταγραφής υποθαλάσσιου ήχου UL1 and UL4 που αναπτύχθηκαν στο ΙΤΕ, στο κατάστρωμα του σκάφους F/V Elena πριν την πόντισή τους στη νότια ακτή της Κρήτης.

Όλα τα πειράματα στέφθηκαν με επιτυχία καταδεικνύοντας τις δυνατότητες χρήσης φορητών συσκευών μέτρησης του υποθαλάσσιου θορύβου, με μικρό πρόβλημα να παρατηρείται μόνο στην αξιοπιστία των καταγραφών από μία μετρητική συσκευή στο πείραμα της Παλαιόχωρας. Το πρόβλημα βρίσκεται υπό διερεύνηση.

4. Σχολιασμός

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ορθώς κατά την άποψή μας έχει ευαισθητοποιηθεί σε θέματα προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ένα ευαίσθητο οικοσύστημα το οποίο επηρεάζει τη ζωή του ανθρώπινου γένους τόσο σε ό,τι αφορά το κλίμα σε πλανητικό ή τοπικό επίπεδο όσο και σε ό,τι αφορά τη διατροφική του αλυσίδα. Ο θόρυβος του θαλάσσιου περιβάλλοντος επηρεάζει σημαντικά τη ζωή στη θάλασσα η οποία θα πρέπει να προστατευθεί προκειμένου να διατηρηθεί η αναγκαία φυσική ισορροπία του θαλάσσιου περιβάλλοντος που έμμεσα επηρεάζει και τη ζωή του ανθρώπου. Επομένως η προσπάθεια ελέγχου του υποθαλάσσιου θορύβου σε μία ευρεία ζώνη συχνοτήτων είναι απαραίτητη για την επίτευξη μιας ικανοποιητικής περιβαλλοντικής κατάστασης.

Στα πλαίσια αυτά η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης κρίνεται ως απόλυτα συμβατή με τις περιβαλλοντικές ευαισθησίες και ανάγκες των πολιτών της και κάθε προσπάθεια ελέγχου (περιορισμού) του θορύβου που προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές παλμικής ή συνεχούς μορφής είναι εύλογη.

Οι επιστήμονες της Ευρώπης έχουν να αντιμετωπίσουν μια σειρά από προκλήσεις στο πεδίο αυτό και κάθε προσπάθεια μελέτης των συνθηκών δημιουργίας και των δυνατοτήτων ελάττωσης του υποθαλάσσιου θορύβου θα πρέπει να υποστηριχθεί.

5. Αναφορές

[1] Marine Strategy Framework Directive.
http://ec.europa.eu/environment/marine/eu-coast-and-marine-policy/marine-strategy-framework-directive/index_en.htm

[2] G. Wenz “Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources”, J. Acoust. Soc. Am. Vol 34, pp 1936-1956 (1962).

[2] M.I. Taroudakis and N.X Nikolaides “A simplified Model for the Estimation of the Traffic Noise in Shallow Water” Technika Chronika, Scientific Edition B, Vol 9, pp 47-72 (1989).

[3] M. Taroudakis, “A study of the influence of the environmental parameters on the traffic noise in the sea” Colloque De Physique, No 2, Supplement, Tome 51, pp C21001-C21004, (1990)

[4] E.K. Skarsoulis, G.S. Piperakis, E. Orfanakis, P. Papadakis and M. Taroudakis: «Modelling of Underwater Noise Due to Ship Traffic in the Eastern Mediterranean Sea», In *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE2017)*, pp. 889-896, (2017).

[5] P. Papadakis, G.S. Piperakis, E.K. Skarsoulis, E. Orfanakis and M. Taroudakis «Development and Testing of Low-Cost Autonomous Underwater Acoustic Recorders» In *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE2017)*, pp. 627-634, (2017).

[6] P. Papadakis, G. Piperakis, E. Skarsoulis, E. Orfanakis and M. Taroudakis «Pilot experiments for monitoring ambient noise in Northern Crete» in *Proceedings of Euronoise 2018*, M. Taroudakis (Ed.), Crete, May 27-31, pp 2811-2815, ISSN: 2226-5147 (2018)

An experiment for recording ambient noise in deep sea.

Παναγιώτης Παπαδάκης, Μιχαήλ Ταρουδάκης*, Εμμανουήλ Σκαρσουλής,
Γεώργιος Πιπεράκης
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, Ι.Τ.Ε.
Ν. Πλαστήρα 100 Βασιλικά Βουτών 70 013 Ηράκλειο Κρήτη,
*επίσης, Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμ. Μαθηματικών Πανεπιστήμιο Κρήτης
panos@iacm.forth.gr, taroud@uoc.gr,
eskars@iacm.forth.gr, piperak@iacm.forth.gr,

ABSTRACT

Under the QUIETMED project, the Underwater Acoustic Measurement Laboratory of the Institute of Applied and Computational Mathematics (IACM) conducts pilot experiments to record ambient noise in shallow and deep sea using self-made acoustic listener devices. Two experiments have been carried out so far for shallow sea in the bay of Heraklion, Crete. In April 2018, the first deep sea experiment was carried out in the Palaiochora area on the Southwest side of Crete at a sea site with depth of about 500 meters. Two autonomous loggers built in the IACM laboratory were used. The experiment had duration three days and, apart from the noise recordings, a calibration of the instruments was performed. In the present work, the experiment, the instruments used and their mode of operation are described, and the initial results are presented after analyzing the data collected.

Πείραμα καταγραφής υποθαλάσσιου θορύβου σε βαθιά θάλασσα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια του προγράμματος QUIETMED το εργαστήριο Υποβρύχιων Ακουστικών Μετρήσεων του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών (IYM) πραγματοποιεί πιλοτικά πειράματα καταγραφής υποθαλάσσιου θορύβου σε ρηχή και βαθιά θάλασσα. Ήδη έχουν πραγματοποιηθεί δύο πειράματα για ρηχή θάλασσα στον κόλπο του Ηρακλείου Κρήτης. Τον Απρίλιο του 2018 πραγματοποιήθηκε το πρώτο πείραμα σε βαθιά θάλασσα στην περιοχή της Παλαιόχωρας στη Νοτιοδυτική πλευρά της Κρήτης σε σημείο με βάθος περίπου 500 μέτρων. Το πείραμα είχε διάρκεια τριών ημερών και εκτός των καταγραφών του θορύβου πραγματοποιήθηκε και βαθμονόμηση των αυτοκαταγραφικών. Στην παρούσα εργασία θα περιγραφεί το πείραμα, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν και ο τρόπος λειτουργίας τους, και θα παρουσιαστούν τα αρχικά αποτελέσματα μετά την ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Introduction

The objectives of the QUIETMED project, funded by the E.C. are to establish common procedures for the monitoring of the ambient noise in the Mediterranean area under the directives of the *Marine Strategy Framework Directive* [1] of the European Union. FORTH tasks among the others in this project are to perform pilot experiments around Crete to assess the applicability of self-made mobile acoustic listeners as an alternative tool for measuring the ambient noise in the sea. Noise prediction models (such as [2]) can then use systematic and long term noise measurements to improve their accuracy. One of the pilot experiments scheduled within QUIETMED held during the period April 24-26 2018 on the south-west coast of Crete near the Palaiohora village. This experiment will be denoted as SOUTH 1 experiment

In addition to ambient noise recordings, calibration of the autonomous recorders took place at the beginning of the experiment. The instruments used were developed at the Laboratory of Underwater Acoustic Measurements of the Institute of Applied and Computational mathematics (IACM) [3]. Two previous experiments took place at the Iraklion Bay area at shallow waters (sea depth around 150 meters) and they had a short duration (up to 3 hours) [4]. The SOUTH 1 experiment was the first pilot experiment to held in relatively deep water. The duration of the experiment was three days and two autonomous recorders were used. In this work the experimental procedure is presented. In particular, the equipment used, the procedure followed and the results obtained are described

1. Description of the experiment

1.1 Equipment

The UL1 and UL4 autonomous underwater listeners (Fig.1.1) are programmable sound recording devices developed by IACM-FORTH. Each device is equipped with a hydrophone connected to a preamplifier, a 24bit sound card and a Raspberry Pi3 motherboard (Fig. 1.2). The UL1 unit carries an H2C low-noise hydrophone whereas the hydrophone installed in UL4 has been developed by IACM-FORTH



Figure 1.1 :The UL1 (left) and UL4 (right) units

A clock and power management card controls the operation of each system issuing activation and shutdown commands to the system using a software program. All electronics are accommodated in waterproof casings which can withstand pressures up to 20 bar.

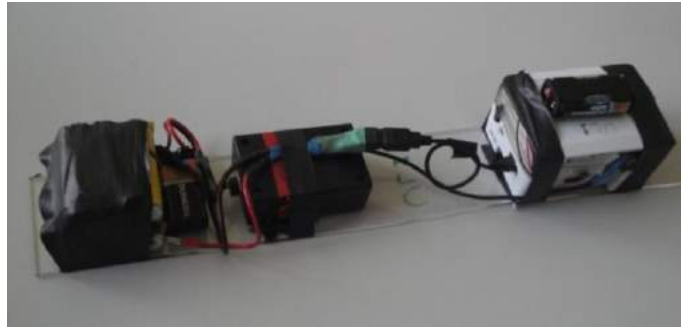


Figure 1.2: The electronics of UL1. From left to right the battery pack, the amplifier and the box with the Raspberry Pi3, the sound card and the power management card, can be seen.

For the calibration of the above sound recording devices a reference hydrophone (Reson TC4032) with 200 meters cable, connected to a voltage amplifier with band-pass filter (EC6081) and an 16bit acquisition card (USB 9215A, NI), as well as a broadband sound source (Lubell LL9162T) with an amplifier and a portable continuous signal generator (BK-PRESISION 3003) have been used. A temperature and depth recorder (RBRduo, RBR Ltd.), capable to be deployed up to 1000 meters depth, was used to obtain the sound speed profile in the area of the experiment. A float was used to hold the instruments in the water which was connected to an anchor with a 700 meters rope. On top of the float a flag and a light source was attached in order to make the float visible to passing vessels along with a GPS tracker which transmitted its position using the GSM network. Finally a GPS system (Garmin, ASTRO 320) was used to record the position of the boat. More details of the actual setting of the buoy are given on section 1.3.

For carrying the equipment to the location of the experiments, their deployment and their retrieval, the fishing vessel ELENA of 9.05 meters length has been used. The boat had an apple deck as well as standard equipment for the deployment of instruments in the sea.

1.2 Experimental area

The experiment took place on the South-west coast of Crete near the Palaiohora village. The water depth in that area can be as deep as 2000m near the coast. In Figure 1.3 the map of the area is shown. In this map the labels with red letters are:

- P0: The port of Palaiohora
- P1: The point where the sound speed profile was measured.
- P2: The point where the calibration of the UL1 and UL4 took place.
- P3: The point where the buoy with the instruments was anchored for three days.

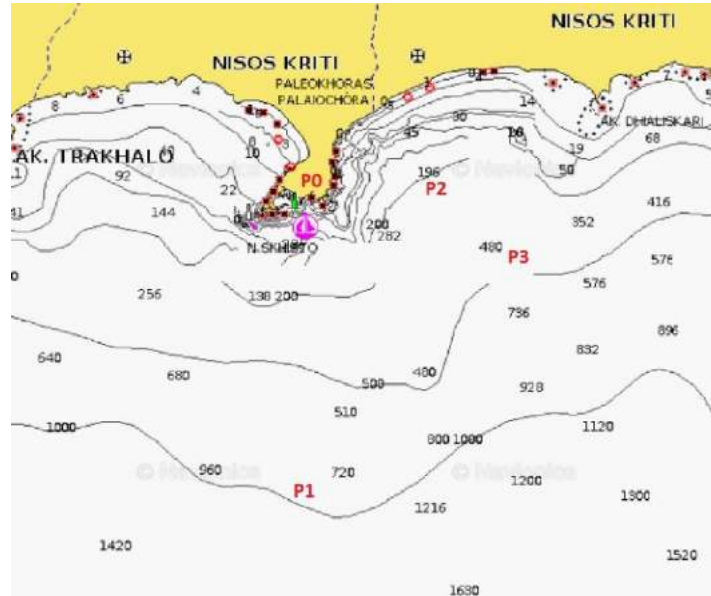


Figure 1.3: The site of the deep water pilot experiment.

1.3 Experimental procedure

This experiment was designed to have a 3 days duration. During day 1 the vessel departed from Palaiochora port (P0) in the morning. At the position P1 the RBRduo was deployed for SSP measurements. The depth of the sea at this point was about 1000 meters. The results of the measurement are shown in Figure 1.4. The SSP is considered to be typical for this area and particular season.

Then the vessel arrived at the point P2 for instrument calibration. The depth of the water was about 250 meters. The TC4032 reference hydrophone was attached next to UL4 and both were lowered to 150 meters. The Lubell source was deployed to a depth of 10 meters and tones corresponding to frequencies 1000, 750, 500, 250 and 125 Hz were emitted for about one minute for each frequency. Then the instruments were uploaded to the deck, the UL1 was attached next to UL4 and TC4032 and were deployed again to a depth of 70 meters. The Lubell source was once more used emitting the same frequencies as before. At the end of the

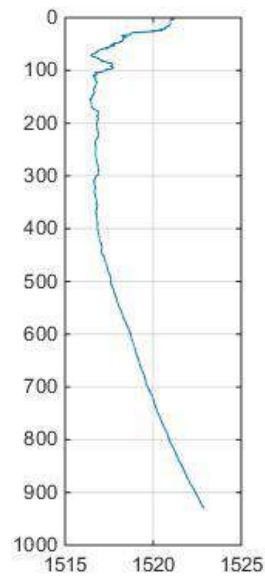


Figure 1.4: The sound speed profile measured at day 1.

calibration the vessel returned to Palaiochora port and the mooring was assembled on the vessels deck with the UL1 at 70 meters and the UL4 at 150 meters. Then the vessel moved to point P3 for mooring deployment. After mooring deployment, the anchor was released. The mooring configuration is depicted in Figure 1.5. A large float (Float A in figure 1.5) fitted with a mooring warning light, a GPS tracker, a red flag and a weight under it was deployed in the sea. A second smaller float (Float B) was put in the water connected with a 5 meter rubber rope to float A. The instruments were hanged after this float. The size of Float B was chosen so that the column with the instruments had almost neutral buoyancy. This construction did not allow movements of Float A due to waves to be transmitted to the instruments. Care was taken during deployment the instruments column to be away from the anchor rope. This was possible since the sea currents in the area did not change during the experiment.

Both UL1 and UL4 were programmed to record sound for 4 minutes every hour starting at 18:00, April 24. The systems were shut down during the rest of the hour thus saving battery life.

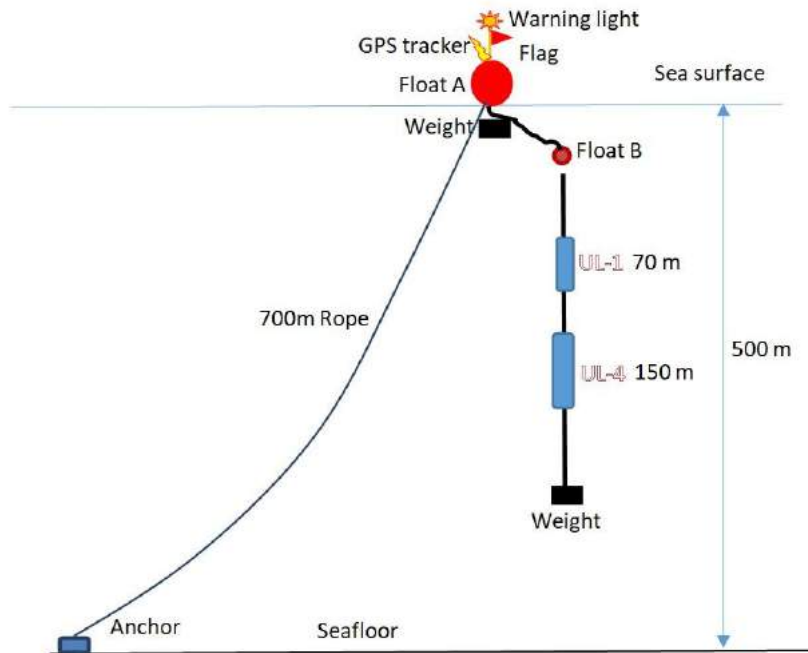


Figure 1.5: Mooring deployment

During the second day of the experiment noise measurements using the TC4032 hydrophone were performed near the buoy location and also at other positions nearby up to 5 NM away.

The instruments were uploaded the morning of the third day. They remained in the sea for about 40 hours.

2. Data analysis

An analysis of the data was performed in order to calculate the sensitivity of the ULs and to obtain spectral noise levels from the ambient noise measurements.

To estimate the sensitivity of UL1 and UL4, the signals picked up by them and the reference hydrophone during the calibration operation (point P2 in the map) were used. The method was the same as in the previous experiments [4]. The calculated sensitivity for UL1 was about -155dB re 1V/μPa and for UL4 was -183dB re 1V/μPa.

Using the acoustic data from the periods that the instruments were recording (4 minutes every hour) and taking into account the above sensitivity value, one-third octave band noise levels were estimated. Unfortunately data from the UL4 were not usable for calculation of noise levels at 63 and 125 Hz due to their bad quality.

There were a total of 40 four minute recordings from April 24 at 18:00 until April 26 10:00. Figure 2.1 shows the noise levels at the central frequency of each 1/3 octave band up to 1 kHz for UL1. The x-axis of this figure gives the date (24, 25 or 26) and the time. Every 4 minutes recording corresponds to a column in figure 7. It can be seen that the noise at 63 Hz is higher than the one at 125 Hz and that there are two periods (in the morning and about midnight of April 25) where the noise was higher at all frequencies. Two distinct peaks can be seen at around 06:00 on April 25 and 00:30 on April 26. Listening to the recorded signal vessel's engine can be heard in both cases. The signals can be attributed to a medium size vessel (first case) and a fishing boat (second case).

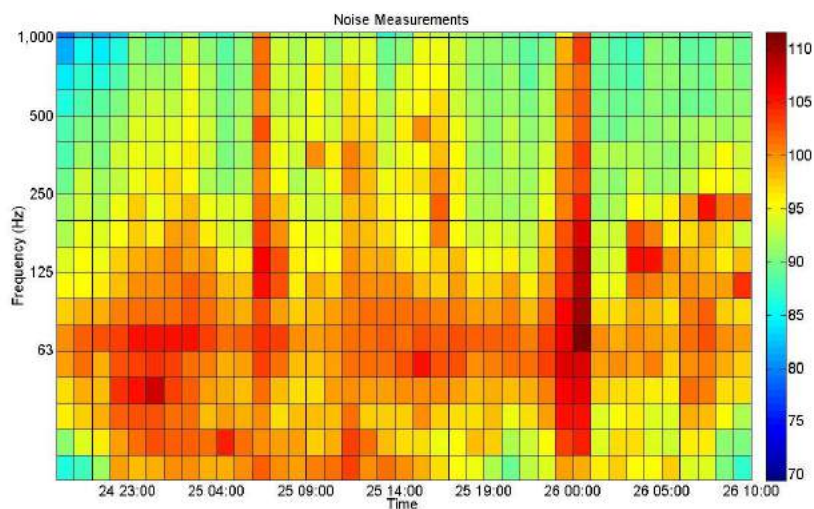


Figure 2.1: 1/3 Octave noise levels calculated using data recorded by the UL1.

In the following two figures (2.2 and 2.3) the noise levels at 63 and 125 Hz respectively calculated using data recorded by UL1 are shown as a blue line. In the figures the noise level calculated by the TC4032 at noon of April 25 are also shown as red diamonds and with green dots are noise levels calculated by the TC4032 using

other measurements done in the vicinity of the mooring (up to 5 NM) during the second day of experiments.

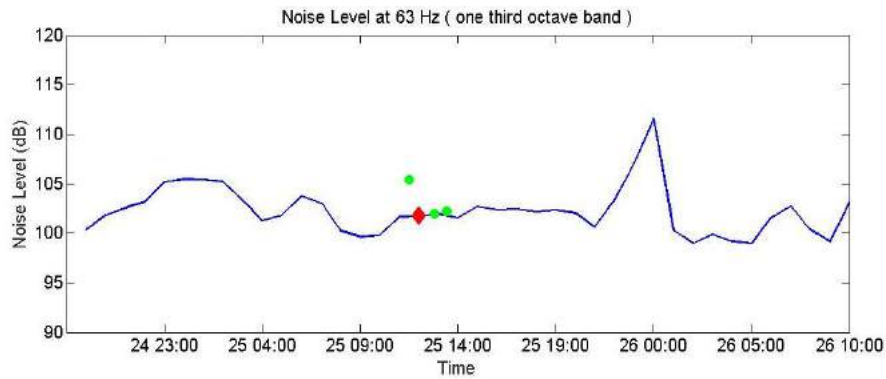


Figure 2.2: The noise level recorded by UL1 during the experiment at 63Hz (blue line). Noise levels calculated using TC4032 measurements done at April 25 near the mooring (red diamond) and in other positions in the area (green dots) are also shown.

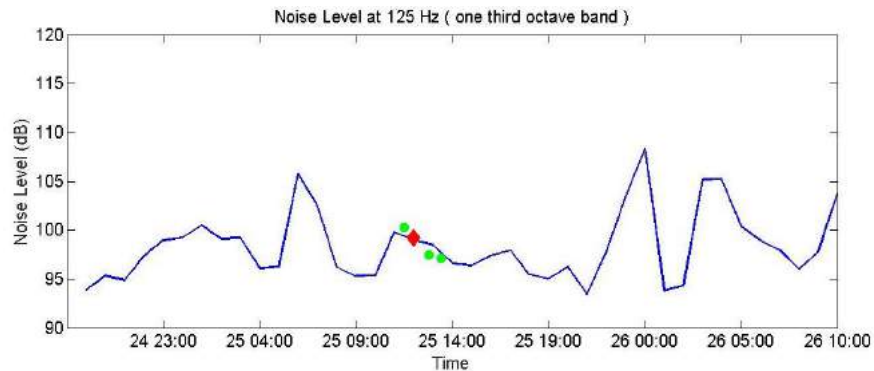


Figure 2.3: The noise level recorded by UL1 during the experiment at 125 Hz (blue line). Noise levels calculated using TC4032 measurements done at April 25 near the mooring (red diamond) and in other positions in the area (green dots) are also shown.

3. Conclusions

The first “deep” water pilot experiment (SOUTH 1 experiment) was completed successfully south of Palaiochora. The feasibility of using monitoring stations based on self-made underwater listeners for measuring ambient noise has been demonstrated. The only drawback was that data from UL4 were not of good quality. The reason of this malfunction is under investigation. A second deep water experiment in the same area is scheduled to take place this November.

4. Acknowledgement

This project has been funded in part by the QUIETMED project: *Joint programme on noise (D11) for the implementation of the Second Cycle of the MSFD in the MEDITERRANEAN SEA*

5. References

- [1] Marine Strategy Framework Directive. Available at: http://ec.europa.eu/environment/marine/eu-coast-and-marine-policy/marine-strategy-framework-directive/index_en.htm
- [2] E.K. Skarsoulis, G.S. Piperakis, E. Orfanakis, P. Papadakis and M. Taroudakis: «Modelling of Underwater Noise Due to Ship Traffic in the Eastern Mediterranean Sea», In *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE2017)*, pp. 889-896, (2017).
- [3] P. Papadakis, G.S Piperakis, E.K. Skarsoulis, E. Orfanakis and M. Taroudakis «Development and Testing of Low-Cost Autonomous Underwater Acoustic Recorders» In *Proceedings of the 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE2017)*, pp. 627-634, (2017).
- [4] P. Papadakis, G. Piperakis, E. Skarsoulis, E. Orfanakis and M. Taroudakis «Pilot experiments for monitoring ambient noise in Northern Crete» in *Proceedings of Euronoise 2018*, M. Taroudakis (Ed.), Crete, May 27-31, pp 2811-2815, ISSN: 2226-5147 (2018).

Μετρήσεις ομοιότητας ακουστικών και σεισμικών σημάτων με χρήση Κρυπτομαρκοβιανών μοντέλων

Κώστας Σμαραγδάκης
Υποψήφιος διδάκτορας, Πανεπιστήμιο
Κρήτης & ΙΤΕ/ΙΥΜ
Ν. Πλαστήρα 100, 70013,
Ηράκλειο Κρήτης
kesmarag @ tem.uoc.gr

Μιχάλης Ταρουδάκης
Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης
& ΙΤΕ/ΙΥΜ
Ν.Πλαστήρα 100, 70013,
Ηράκλειο Κρήτης
taroud @ uoc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει μετρήσεις ομοιότητας ακουστικών και σεισμικών σημάτων με χρήση μιας τεχνικής αναγνώρισης προτύπων βασισμένη σε Κρυπτομαρκοβιανά μοντέλα (Hidden Markov Models) εφαρμοσμένα στους συντελεστές κυματιδίων (wavelet coefficients) των σημάτων. Οι μετρήσεις γίνονται με χρήση υπολογιστικών τεχνικών οι οποίες εκτιμούν την σχετική εντροπία μεταξύ αντιπροσωπευτικών μοντέλων των σημάτων. Το προτεινόμενο μοντέλο αρχικά χρησιμοποιεί μετασχηματισμό Stationary Wavelet Packet για εξαγωγή χρονικά αναλλοίωτων χαρακτηριστικών ενός σήματος και στη συνέχεια ταξινόμηση των χαρακτηριστικών με ένα κατάλληλο κρυπτομαρκοβιανό μοντέλο, προσαρμοσμένο μέσα από μια διαδικασία εκπαίδευσης, προκειμένου στο τέλος να χαρακτηριστεί το σήμα από ένα σύνολο πιθανοθεωρητικών μεγεθών που καθορίζονται από το μοντέλο. Με τη μοντελοποίηση αυτή, τα διαδοχικά μοτίβα των σημάτων στο πεδίο του χρόνου λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να ληφθεί ένας πιο εύρωστος και ανεκτικός στο θόρυβο χαρακτηρισμός των σημάτων.

Similarity measurements of acoustical and seismic signals using Hidden Markov Models

ABSTRACT

This work presents similarity measurements of acoustic and seismic signals using a machine learning approach based on a Hidden Markov Models representation of the wavelet coefficients of the signals. The measurements obtained by considering computational approaches for the estimation of the relative entropy between the corresponding models of the signals. The proposed scheme initially performs a time-invariant feature extraction of the signal using the Stationary Wavelet Packet transform followed by a classification of these features by an appropriate Hidden Markov Model adapted after a training procedure, in order the signal to be characterized by a set of probabilistic parameters which are determined by the model. Using this scheme, the sequential patterns of the signals are taken into account in order to obtain a better and more noise tolerant signal characterization.

Εισαγωγή

Κάθε σήμα (ακουστικό ή σεισμικό) αντιστοιχίζεται με χρονο-συχνοτικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό κυματιδίων. Στη συνέχεια, για κάθε σήμα ένα Κρυπτο-Μαρκοβιανό μοντέλο δημιουργείται και εκπαιδεύεται ώστε να περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα τους εξαγόμενους συντελεστές κυματιδίων έτσι ώστε ο χαρακτηρισμός να γίνει με ένα μοναδικό σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν το μοντέλο.

Στη εργασία θα παρουσιάσουμε μια εφαρμογή ανάκτησης περιβαλλοντικών παραμέτρων που αντιστοιχούν σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον χρησιμοποιώντας συνθετικά δεδομένα. Σε συνέχεια της έρευνας θα γίνει και δοκιμή με πειραματικά δεδομένα. Επίσης, θα παραθέσουμε παραδείγματα σύγκρισης σεισμικών καταγραφών από ένα σεισμολογικό σταθμό (PKR στη Λέσβο). Οι καταγραφές θα ανήκουν είτε σε σχετιζόμενα σεισμικά γεγονότα είτε σε γεγονότα που δεν έχουν κάποιο γνωστό συσχετισμό μεταξύ τους.

1. Εξαγωγή χαρακτηριστικών των σημάτων

Ένα σήμα, είτε ακουστικό είτε σεισμικό, καταγράφεται έχοντας αλλοιωθεί τόσο από το περιβάλλον όσο και από τα όργανα καταγραφής. Ενώ σε άλλα σχήματα χαρακτηρισμού οι αλλοιώσεις αυτές δεν έχουν μεγάλη επίδραση στα εξαγόμενα χαρακτηριστικά, έχει δειχθεί ότι αυτό δεν είναι ο κανόνας όταν προσπαθούμε να αντλήσουμε αντιπροσωπευτικά στατιστικά μεγέθη των σημάτων [1, 2]. Για να αντιμετωπίσουμε την ευαισθησία των πιθανοθεωρητικών μοντέλων στο θόρυβο πρέπει να προηγηθεί μια διαδικασία καθαρισμού των σημάτων. Σε αυτή την εργασία η αποθρονηβοποίηση πραγματοποιήθηκε με μια μέθοδο που έχουν προτείνει οι συγγραφείς [1] χρησιμοποιώντας μια αραιή αναπαράσταση του σήματος.

1.1 Χρόνο-συχνοτική εξαγωγή χαρακτηριστικών

Τα σήματα αναλύονται χρονο-συχνοτικά με χρήση του μετασχηματισμού κυματικών πακέτων (wavelet packet transform) [3]. Στη συνέχεια το σήμα χαρακτηρίζεται με τους συντελεστές του τελευταίου επιπέδου, οι οποίοι έχουν ενέργεια πάνω από ένα ορισμένο ενεργειακό σκαλοπάτι. Οι συντελεστές αυτοί περιγράφονται από έναν πίνακα Χόπου οι γραμμές εκφράζουν τις διάφορες μπάντες συχνότητας ενώ οι στήλες έχουν την έννοια του χρόνου. Επομένως, μπορούμε να εκφράσουμε τον πίνακα ως μια πολυδιάστατη χρονοσειρά, όπου το πλήθος το διαστάσεων ισούται με τις μπάντες συχνότητων.

1.2 Εξαγωγή των πιθανοθεωρητικών χαρακτηριστικών

Σύμφωνα με τους Elliot et al. και Bishop [4, 5] για κάθε χρονοσειρά X που περιέχει χρονοσυχνοτικά χαρακτηριστικά ενός σήματος s , μπορούμε να κατασκευάσουμε και εκπαιδεύουμε μια κρυπτομαρκοβιανή αλυσίδα με Γκαουσιανές κατανομές εκπομπής την οποία συμβολίζουμε λ . Η εκπαίδευση του μοντέλου γίνεται με εφαρμογή του αλγορίθμου Expectation-Maximization, προσδιορίζοντας τις παραμέτρους που ελέγχουν το μοντέλο μεγιστοποιώντας την εκ' των υστέρων πυκνότητα πιθανότητας του μοντέλου που περιγράφετε ως:

$$p(X, Z; \lambda) = p(z_1) \left(\prod_{n=2}^N p(z_n \vee z_{n-1}) \right) \prod_{n=1}^N p(x_n \vee z_n).$$

όπου με Z συμβολίζουμε τις κρυμμένες μεταβλητές που αντιστοιχούν στις παρατηρήσεις X .

Αυτές οι παράμετροι θα είναι και τα τελικά χαρακτηριστικά του σήματος και με βάση αυτά θα γίνουν οι μετρήσεις ομοιότητας. Συγκεκριμένα οι παράμετροι αποτελούνται από τις πιθανότητες μετάβασης (transition probabilities) που δηλώνουν τις συχνότητες αλλαγής από κάθε διακριτή κατάσταση σε οποιαδήποτε άλλη ή τις συχνότητες παραμονής στην ίδια κατάσταση, καθώς και οι παράμετροι που ελέγχουν τις λεγόμενες κατανομές διάδοσης του μοντέλου (emission distributions), που ακολουθούν Γκαουσιανές κατανομές (Gaussian distributions).

2. Μετρήσεις ομοιότητας

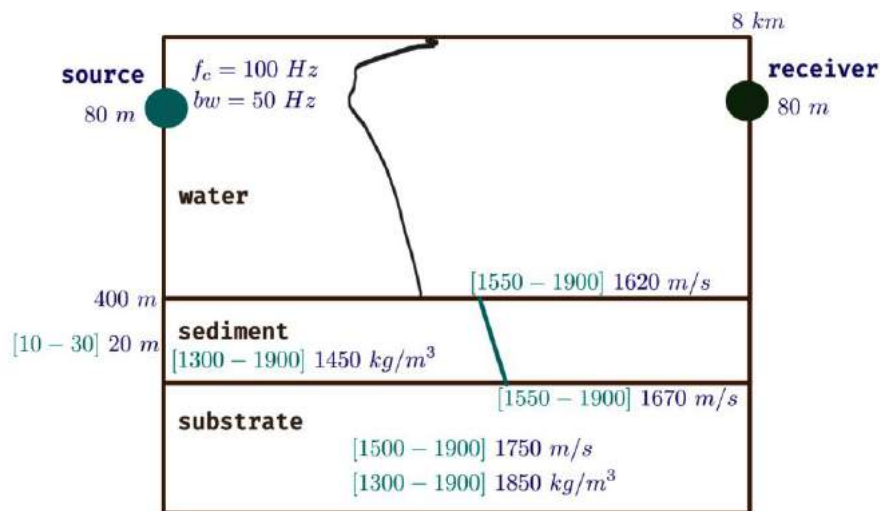
Συγκρίσεις μεταξύ των σημάτων πραγματοποιούνται με σύγκριση των αντιπροσωπευτικών τους κρυπτομαρκοβιανών μοντέλων. Για το σκοπό αυτό γίνεται εκτίμηση της σχετικής εντροπίας (Kulback Leibler divergence)[5] μεταξύ δυο μοντέλων με εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo υπολογίζοντας αριθμητικά το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$D(\lambda_1, \lambda_2) = \int p(X \vee \lambda_1) \log \frac{p(X \vee \lambda_1)}{p(X \vee \lambda_2)}$$

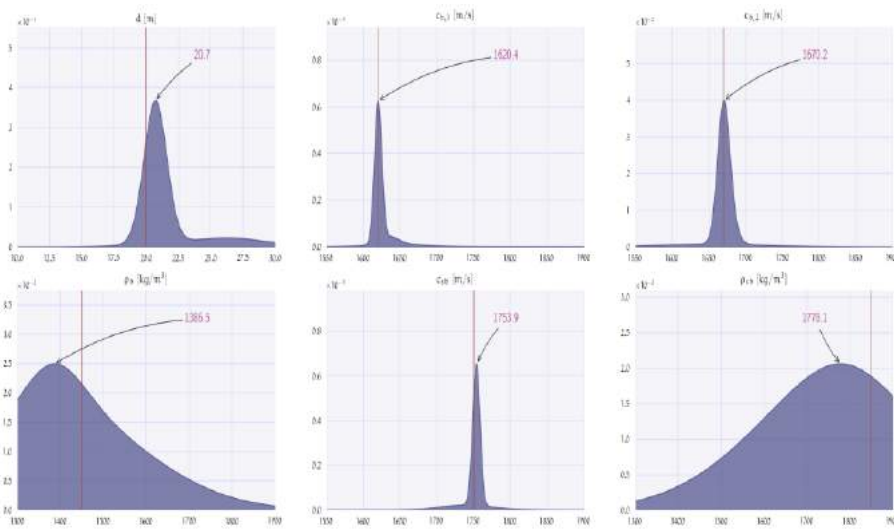
3. Παράδειγμα ανάκτησης του πυθμένα θαλάσσιου περιβάλλοντος

Ως πρώτη εφαρμογή θεωρούμε το θαλάσσιο περιβάλλον που περιγράφεται στο Σχήμα 3.1. Για την αντιστροφή θα χρησιμοποιήσουμε το συνθετικό σήμα που καταγράφετε στη θέση του δέκτη από γνωστή πηγή.

Για να προσομοιώσουμε καλύτερα ένα πραγματικό σενάριο πειραματικής εφαρμογής του μοντέλου, στο θεωρούμενο ως μετρούμενο σήμα προσθέτουμε θόρυβο (SNR 10dB) και στη συνέχεια εφαρμόζουμε τη τεχνική αποθορυβοποίησης. Η διαδικασία αντιστροφής ελέγχεται από ένα Γενετικό Αλγόριθμο και η τελική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων γίνεται με στατιστική ανάλυση επί του τελικού πληθυσμού προτεινόμενων λύσεων με χρήση ενός Gaussian Mixture Model. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι εκ' των υστέρων στατιστικές κατανομές των προς ανάκτηση παραμέτρων. Με τις κατακόρυφες γραμμές δείχνουμε τις πραγματικές τιμές που αντιπροσωπεύουν το πραγματικό περιβάλλον.



Σχήμα 3.1: Το θαλάσσιο περιβάλλον της πρώτης εφαρμογής.

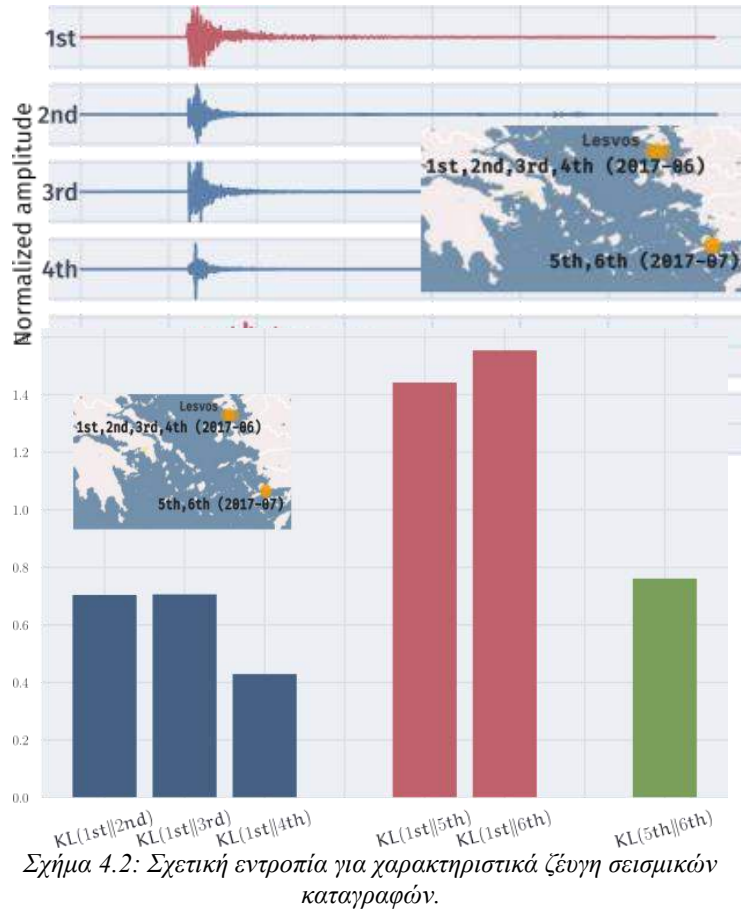


Σχήμα 3.2: Εκ' των υστέρων στατιστικές κατανομές των προς ανάκτηση παραμέτρων

4. Παράδειγμα ταξινόμησης σεισμικών καταγραφών

Στη δεύτερη εφαρμογή, έξι σεισμικές καταγραφές (κατακόρυφες μετατοπίσεις) εξετάζονται ως προς την ομοιότητα τους. Οι καταγραφές απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1. Με κόκκινο εμφανίζονται δυο καταγραφές που αντιστοιχούν σε ασυσχέτιστους κύριους σεισμούς με χρονική διαφορά περίπου ενός μηνός, ενώ με μπλε εμφανίζονται οι αντίστοιχες καταγραφές των μετασεισμών που ακολούθησαν τους κύριους

σεισμούς. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του μέτρου ομοιότητας για χαρακτηριστικά ζεύγη καταγραφών.



5. Σχολιασμός

Στην εργασία παρουσιάστηκε μια περιγραφή μιας νέας μεθόδου χαρακτηρισμού με χρήση κρυπτομαρκοβιανών μοντέλων εφαρμοσμένα σε χρονο-συχνοτικά χαρακτηριστικά ακουστικών και σεισμικών σημάτων. Οι δύο εφαρμογές που παρουσιάστηκαν έδωσαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για τη συνέχιση της έρευνας στη κατεύθυνση του πιθανοθεωρητικού χαρακτηρισμού ακουστικών και σεισμικών καταγραφών.

6. Ευχαριστίες

Η εργασία χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από το ίδρυμα ‘‘Σταύρος Νιάρχος’’ στα πλαίσια του προγράμματος ‘‘Advancing Young Researchers’ Human Capital in

Cutting Edge Technologies in the Preservation of Cultural Heritage and the Tackling of Societal Challenges – ARCHERS” καθώς και από τη δράση “ΠΕΡΑΝ ΟΠΣ 5002358” του προγράμματος “ΚΡΗΠΙΣ ΙΙ”.

7. Αναφορές

- [1] Taroudakis, Michael, Costas Smaragdakis, and Ross Chapman. “Denoising Underwater Acoustic Signals for Applications in Acoustical Oceanography.” *Journal of Computational Acoustics* **Vol. 25** <https://doi.org/10.1142/S0218396X17500151> (2017)
- [2] Smaragdakis C., Taroudakis M «Hidden Markov Models feature extraction for Inverting underwater acoustic signals using Wavelet Packet coefficients» Proceedings of EuroRegio 2016, Porto (Portugal), June 13-15 (2016).
- [3] Mallat S. F. A «Wavelet Tour of Signal Processing», Academic Press, San Diego (USA), 2nd edition (1999).
- [4] Elliot R, Aggoun L, Moore «J. Hidden Markov Models: Estimation and Control», Springer, New York (USA) (1995).
- [5] Bishop, C. «Pattern recognition and machine learning» Springer International Edition, New Delhi (India) (2006).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2: Ακουστική και Εκπαίδευση

Εκπαίδευση που αφορά τον ήχο και την ακουστική για προπτυχιακούς αρχιτέκτονες και εκπαιδευτικούς, δύο ολιγοήμερα εργαστήρια

Αιμιλία Καραποστόλη
Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
Λευκωσίας 18, Θεσ/νικη
emiliearch@gmail.com

Δήμητρα Σιδερίδου
Υπ. Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
/ Συνθέτρια
Σωκράτους 45, Θεσ/νικη
dsiderid@auth.gr

Δημήτρης Γιουζέπας
Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
Δελμούζου 9, Θεσ/νικη
dgiouzepas@gmail.com

Γιάννης Τσάρας
Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
giantsar@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του ήχου αποτελούν γνώση χρήσιμη τόσο για τους αρχιτέκτονες όσο και τους εκπαιδευτικούς. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο ολιγοήμερα εργαστήρια που πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές σχολές και αφορούσαν ένα μη ειδικό κοινό. Η αξιολόγηση των εργαστηρίων ανέδειξε την ανάγκη για την απλοποίηση της θεωρίας ώστε να επικοινωνήσουν οι βασικές έννοιες του ήχου και της ακουστικής και η διάδοση των εργαλείων και των λογισμικών που αφορούν το ηχητικό φαινόμενο, τόσο σε επίπεδο κατανόησης, όσο και σύνθεσης, σχεδιασμού και πειραματισμού.

Sound and acoustics training for undergraduate architects and teachers, two few-day workshops

ABSTRACT

Properties and behaviour of sound are required knowledge for both architects and educators. In this research we present two few-day workshops that were held in two different schools and concerned a non-special audience. The evaluation by the students highlighted the need to simplify the theory in order to communicate the basic concepts of sound and acoustics and to disseminate the tools and software related to the sound phenomenon, both in terms of understanding, synthesis, design and experimentation.

Εισαγωγή

Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά του ήχου αποτελούν γνώση χρήσιμη τόσο για τους ειδικούς του χώρου όσο και τους εκπαιδευτικούς. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο ολιγοήμερα εργαστήρια που πραγματοποιήθηκαν:

Το πρώτο στη Θερινή Ακαδημία Μουσικής Παιδαγωγικής, που διοργανώθηκε από τον Τομέα Μουσικής Παιδαγωγικής και Ψυχολογίας της Μουσικής και το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μουσική Παιδαγωγική» του Ιονίου Πανεπιστημίου, με θέμα «Ακουστική Οικολογία», στην Κέρκυρα, τον Ιούλιο του 2017, και τίτλο «Εφαρμογές για τη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς και ηχοπροστασίας των σχολικών χώρων. Μελέτη περίπτωσης η "σχολική αίθουσα"» που απευθυνόταν κυρίως σε προπτυχιακούς αλλά και πτυχιούχους εκπαιδευτικούς, και

Το δεύτερο στην Αρχιτεκτονική Σχολή της Ξάνθης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, με θέμα "New Daemons", στην Ξάνθη, τον Μάιο του 2018, με σκοπό τη δημιουργία ενός αρχείου κινούμενης εικόνας και ήχου που εξερευνά τα σύγχρονα χωρικά δεδομένα με τη χρήση των νέων μέσων.

1. Θεωρία

Η αρχιτεκτονική επεξεργάζεται, εξηγείται και προσδιορίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου μέσω των παραστάσεων. Πράγματι, αυτές οι αναπαραστάσεις αντιμετωπίζονται συχνά σαν να ήταν η ίδια η αρχιτεκτονική [1]. Η εξέλιξη των νέων τεχνολογικών μέσων καθιστούν αναγκαία τη διαρκή επικαιροποίηση της αρχιτεκτονικής σκέψης και πρακτικής, καθώς νέοι τρόποι σχεδιασμού και αναπαραστάσης του αρχιτεκτονικού έργου έρχονται να προστεθούν στους ήδη εφαρμοσμένους [2]. Στην περίπτωσή μας, οι νέες τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα της ηχογράφησης, επεξεργασίας και αναπαραγωγής του ήχου, διαμορφώνουν νέες συνθήκες που επηρεάζουν τον καθημερινό τρόπο ζωής και επομένως, και τις αντίστοιχες χωρικές ανάγκες και συνθήκες [3]. Αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η παρουσίαση και σύγκριση των δύο ολιγοήμερων εργαστηρίων που αφορούν τον ήχο και την ακουστική.

2. Στόχοι και μεθοδολογία προσέγγισης του εκάστοτε εργαστηρίου

2.1 Πρώτο εργαστήριο με θέμα «Εφαρμογές για τη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς και ηχοπροστασίας των σχολικών χώρων. Μελέτη περίπτωσης η "σχολική αίθουσα"»

Στο πρώτο εργαστήριο, που απευθυνόταν κυρίως σε εκπαιδευτικούς, διάρκειας δύο δίωρων παραδόσεων, δόθηκε έμφαση και διδάχτηκε η έννοια της ακουστικής, οι φυσικές ιδιότητες του ήχου, η έννοια της ηχομόνωσης, του ακουστικού σχεδιασμού και της ακουστικής άνεσης [4], [5]. Ειδικότερα, η πρώτη ενότητα του εργαστηρίου, η θεωρία, επικεντρώθηκε στην παρουσίαση των φυσικών ιδιοτήτων του ήχου, την ηχομόνωση, τον ακουστικό σχεδιασμό και την ακουστική άνεση [6].

Στη δεύτερη ενότητα, αναλύθηκαν συγκεκριμένες εφαρμογές όπως η περίπτωσης της αρχιτεκτονικής των σχολείων, αλλά και των μουσικών σχολείων, τα τυπικά ακουστικά προβλήματα στις σχολικές αίθουσες και οι τρόποι αντιμετώπισής τους με έξυπνα μέσα και τη συμμετοχή των μαθητών και μαθητριών με συγκεκριμένα υλικά

και δράσεις. Επιπλέον, εισήχθη η έννοια της ακουστικής οικολογίας και της περιβαλλοντικής ακουστικής και αναλύθηκαν τα παραδείγματα του ηχητικού κήπου και των ηχητικών γλυπτών [7].

Συγκεκριμένα στο δεύτερο τμήμα του εργαστηρίου παρουσιάστηκαν:

- Οι τάσεις στη σχολική αρχιτεκτονική
- ΥΛΙΚΑ - επιστρώσεις για ηχομόνωση, διαχυτές
- ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ - παιχνίδι με την ακουστική συμπεριφορά της τάξης, χρήση επίπλων και χωρισμάτων
- ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑ - ήσυχες και θορυβώδεις περιοχές στην τάξη, αιολικές άρπες
- ΕΠΙΠΛΑΕΟΝ ΜΕΛΕΤΗ podcasts, YouTube channels, forums, on line courses, sites, games, software, βιβλιογραφία

Οφείλουμε να σημειώσουμε πως το εργαστήριο δεν είχε σκοπό να αντικαταστήσει τις ολοκληρωμένες λύσεις σε ζητήματα ακουστικής και ήχου, αποτέλεσμα ακουστικών μελετών, αλλά να μεταδώσει στους συμμετέχοντες και συμμετέχουσες κάποιες βασικές κατευθυντήριες της αρχιτεκτονικής ακουστικής και της περιβαλλοντικής ηχοπροστασίας, καθώς και να παρουσιάσει ενδεικτικές εκπαιδευτικές δράσεις για την αξιοποίηση της θεωρίας που παρουσιάστηκε αρχικά (κατασκευές και υλικά).

Μετά την ολοκλήρωση του εργαστηρίου, οι συμμετέχοντες ήταν σε θέση να:

- προσεγγίσουν, μελετήσουν και να κατανοήσουν σε ένα αρχικό στάδιο την πολυπλοκότητα του ηχητικού φαινομένου και του ακουστικού σχεδιασμού,
- αντιληφθούν την έννοια της ακουστικής άνεσης, την ηχομόνωση και τα ακουστικά λάθη μέσα στις αίθουσες διδασκαλίας,
- ανατρέξουν, αξιολογήσουν και να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικά μέσα και δράσεις για την αλλαγή της ακουστικής και ηχητικής συμπεριφοράς της εκάστοτε σχολικής αίθουσας αλλά και ανοικτών χώρων,
- έχουν μια εισαγωγική εμπειρία πάνω στη χρήση σύγχρονων λογισμικών επεξεργασίας ήχου και ηχογράφησης (audacity, finale) αλλά και λογισμικών για τον σχεδιασμό ηχοδιαχυτών.

2.2 Δεύτερο εργαστήριο με θέμα “New Daemons”

Στο δεύτερο εργαστήριο, που απευθυνόταν σε αρχιτέκτονες, διάρκειας τριών ημερών, παρουσιάστηκε, θεωρητικά στην αρχή, η μελέτη του ηχητικού περιβάλλοντος, με τρόπο που αποφέρει πληθώρα στοιχείων για τον αρχιτεκτονικό χώρο. Δόθηκε έμφαση σε τρεις βασικούς τρόπους προσέγγισης του ήχου:

- ακουστική οικολογία [8], οικολογία των ηχοτοπίων, οικoaκουστική,
- φαινομενολογική ανάλυση αστικών ηχητικών περιβαλλόντων και ατμοσφαιρών του ινστιτούτου CRESSON [9],
- ηχητικός σχεδιασμός και περιβάλλοντα, τα όρια της ηχητικής τέχνης.

Στο πρακτικό κομμάτι του εργαστηρίου, έγινε μια εισαγωγή σε τρόπους ηχογράφησης, ανάλυσης και ηχητικής αναπαραστάσης και αναπαραγωγής με τα κατάλληλα εργαλεία και λογισμικά (όπως audacity και final cut pro). Οι φοιτητές και φοιτήτριες ηχογράφησαν και συνέθεσαν μια ηχητική σύνθεση με σκοπό να διερευνήσουν τα νέα χωρικά δεδομένα που προκύπτουν από τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις και σε επόμενο στάδιο προσέθεσαν αντιστικτικά την κινούμενη εικόνα. [10].

Το μάθημα συνδύασε διαλέξεις, με άμεση και έμμεση κατάρτιση (ασκήσεις στη σχολή, ακρόαση και μελέτη ηχητικών έργων και κινηματογράφου), πειραματική και διαδραστική μάθηση μέσω των λογισμικών και της αντίστοιχης πλατφόρμας διαμοίρασης αρχείων (vimeo, soundcloud). Η κάθε ομάδα παρέδωσε ένα αρχείο κινούμενης εικόνας και ήχου σε διαδικτυακή πλατφόρμα (soundcloud, vimeo, facebook κτλ), όπου αξιολογήθηκε από τους διδάσκοντες και τους άλλους συμμετέχοντες και συμμετέχουσες.

Ενδιαφέρον αποτέλεσε η άσκηση της ηχοδιαδρομής η οποία αναπτύχθηκε με βάση το μάθημα Introduction to Sound and Acoustic Sketching του Álvaro Barbosa στο University St. Joseph στο Macao της Κίνας, προσβάσιμο μέσα από την πλατφόρμα <https://www.kadenze.com/>. Σκοπός της άσκησης ήταν αρχικά η ακρόαση, μετά η ανάλυση και περιγραφή του ηχητικού περιβάλλοντος και, τέλος, η αναπαράσταση και εκ νέου σύνθεσή του. Η άσκηση περιελάμβανε τα εξής βήματα:

1. ηχοδιαδρομή (διάρκειας 1-2 λεπτών)
2. ηχογράφηση ηχοδιαδρομής (κινητό τηλέφωνο, app appstore, playstore)
3. εξαγωγή ηχητικού αποσπάσματος από το τηλέφωνο στον υπολογιστή (audacity <http://www.audacityteam.org/>)
4. ανάλυση ηχοδιαδρομής / sound script
5. βιβλιοθήκη ήχων από το freesound.org
6. ηχητικό σκιτσάρισμα/κολάζ
7. post - production (fade in, fade out, normalisation, effects)
8. Αξιολόγηση, σύγκριση ηχητικού αποσπάσματος και ηχητικού σκίτσου, ηχητική αναπαράσταση

Οι διδακτικοί στόχοι του μαθήματος είχαν κυρίως αρχιτεκτονικό προσανατολισμό και οι φοιτητές και φοιτήτριες, αφού ολοκλήρωναν το εργαστήριο, ήταν σε θέση να:

- Έχουν γνώση των σύγχρονων τεχνολογικών εξελίξεων και το πώς επηρεάζουν τη σύγχρονη αρχιτεκτονική πράξη.
- Είναι ικανοί/ές να προσεγγίσουν, μελετήσουν, κατανοήσουν και να δημιουργήσουν ένα ηχητικό έργο, αλλά και ένα έργο κινούμενης εικόνας και ήχου.
- Είναι ώριμοι/ες να ανατρέξουν, αξιολογήσουν και να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικά μέσα για την κατανόηση και την εμβάθυνση πάνω στη σύγχρονη αρχιτεκτονική σκέψη και πρόθεση.
- Έχουν εμπειρία πάνω στη χρήση σύγχρονων λογισμικών επεξεργασίας ήχου και ηχογράφησης (audacity, finale), αλλά και επεξεργασίας κινούμενης εικόνας (after effects, imovie, windows movie maker).

3. Αξιολόγηση εργαστηρίων και συμπεράσματα

Και τα δύο εργαστήρια είχαν επιτυχή έκβαση, η οποία κρίθηκε τόσο από το ενδιαφέρον των συμμετεχόντων και συμμετεχουσών όσο και από την ευκολία πραγματοποίησης και επικοινωνίας των εννοιών, της χρήσης του εξοπλισμού αλλά και των λογισμικών επεξεργασίας και αναπαραγωγής του ήχου και των ακουστικών φαινομένων.

Στο πρώτο εργαστήριο, απαντήθηκε ένα ερωτηματολόγιο από τους συμμετέχοντες και συμμετέχουσες το οποίο ανέδειξε την ανάγκη για επιπλέον απλοποίηση όσον αφορά την θεωρία που παρουσιάστηκε στο πρώτο μισό της

παράδοσης. Κρίθηκε αναγκαία η αφαίρεση της πληθώρας των πληροφοριών για την κατανόηση του ηχητικού φαινομένου, χωρίς να απλοποιηθεί το φαινόμενο, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχτεί σε μία μόνο παράδοση. Όσον αφορά τα παραδείγματα εφαρμογής, η διάλεξη είχε μια πιο επικοινωνιακή βάση και οι εφαρμογές έγιναν ευκολότερα αντιληπτές από το μη ειδικό κοινό.

Στο δεύτερο εργαστήριο, οι συμμετέχοντες και συμμετέχουσες έδωσαν περισσότερο βάρος στα εργαλεία ηχογράφησης και επεξεργασίας ήχου. Το καινοτόμο σε αυτήν την προσέγγιση ήταν η τριβή των φοιτητών και φοιτητριών μέσα από την απευθείας χρήση των νέων αυτών εργαλείων, η οποία στέφθηκε από επιτυχία. Οι φοιτητές και φοιτήτριες συνέθεσαν τη δική τους ηχητική σύνθεση, ανακαλύπτοντας τις ηχητικές και ακουστικές ποιότητες του χώρου, βιώνοντας την αρχιτεκτονική με ένα εναλλακτικό τρόπο και σχεδιάζοντας πιο ολοκληρωμένα σε σχέση με τις καθιερωμένες προσεγγίσεις που είχαν διδαχτεί στο παρελθόν. Θεωρήθηκε θεμιτή η μεγαλύτερη διάρκεια του εργαστηρίου και η επιμέρους εμβάθυνση σε ζητήματα ήχου χωρίς να εμπλέκεται η κινούμενη εικόνα.

Αυτό που έγινε κατανοητό μετά το πέρας των εργαστηρίων και την αξιολόγησή τους ήταν πως ο πειραματισμός, μέσα από την τριβή με τα λογισμικά και τον κατάλληλο εξοπλισμό, κρίθηκε σημαντικότερος σε σχέση με τη διδασκαλία της θεωρίας. Η φύση του ηχητικού φαινομένου και οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν επιφέρει μεγάλη ευκολία στην ανάλυση, διαχείριση αλλά και τον σχεδιασμό του, αναδεικνύοντας ένα πλήθος προσβάσιμων εργαλείων που είναι καίρια για τη διάδοση της εκπαίδευσης που αφορά τον ήχο και την ακουστική.

Τέλος, μέσα από τη λεπτομερή ανάλυση και σύγκριση των εργαστηρίων για τον ήχο και την ακουστική, αναδείχτηκε η άμεση ανάγκη για την επικοινωνία των ειδικών του κλάδου με μη ειδικούς, ώστε να γίνουν αντιληπτές βασικές έννοιες του ήχου και της ακουστικής, καθώς και των πιθανών τρόπων αντιμετώπισης των προβλημάτων της καθημερινότητας τόσο σε επίπεδο ηχορύπανσης και ηχομόνωσης όσο και σε καλλιτεχνικά και αρχιτεκτονικά θέματα.

4. Αναφορές

[1] P. Mantzou, G. Trovato «Arquitectura en la era de la maquina digital. Don't be my mirror», critic|all Ist International Conference on Architectural Design & Criticism, Μαδρίτη, Ισπανία, 12-14 Ιουνίου 2014.

[2] K. Rattenbury, ed., *This is not architecture: media constructions*. Psychology Press (2002).

[3] I. Meric, M. Caliskan «Acoustics education for architects: Developing a base of knowledge for professional experience», INTERNOISE, Innsbruck, Αυστρία, 15-18 Σεπτεμβρίου 2013.

[4] Α. Τροχίδης, *Ηχομόνωση. Βασικές Αρχές και Εφαρμογές*, FIBRAN, Θεσσαλονίκη, (2013).

[5] Ν. Τσινίκας, *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων ΘΕΑΤΡΑ - ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΑ - ΑΙΘΟΥΣΕΣ ΣΥΝΑΥΛΙΩΝ - ΧΩΡΟΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ*, UNIVERSITY STUDIO PRESS (2005).

[6] Α. Καραποστόλη, «Εργαστήριο: Εφαρμογές για την βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς και ηχοπροστασίας των σχολικών χώρων θεωρία για αρχιτεκτονική ακουστική και ηχομόνωση» 1/2

http://prezi.com/4qrfoht6ymho/?utm_campaign=share&utm_medium=copy (last access 21/9/2018)

[7] Α. Καραποστόλη, «Εφαρμογές για τη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς και ηχοπροστασίας των σχολικών χώρων μελέτη περίπτωσης η "σχολική αίθουσα"» 2/2 http://prezi.com/gcnxcfctvgiw/?utm_campaign=share&utm_medium=copy (last access 21/9/2018)

[8] S. - R. Murray, *The soundscape: Our sonic environment and the tuning of the world*. Simon and Schuster (1993).

[9] Ι. Εκμετσόγλου, *Βασική ορολογία ακουστικής οικολογίας για παιδιά και ενήλικες: το ηχοτοπίο και οι σημασίες των ήχων του*, Ελληνική Εταιρεία Ακουστικής Οικολογίας, Κέρκυρα, (2014).

[10] Α. Καραποστόλη, «Ηχος και Αριτεκτονική. Ηχοτοπία και Ηχοδιαδρομές» http://prezi.com/ka5yjvs6czy/?utm_campaign=share&utm_medium=copy (last access 21/9/2018)

Το προαύλιο σχολείου ως πηγή θορύβου: Βιβλιογραφική αναδρομή

Ν.Ηλιόπουλος, Ι.Καραγιάννης, Α.Σωτηροπούλου, Γ.Πουλάκος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί να εξετάσει το προαύλιο σχολείου ως πηγή θορύβου μέσα από ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας. Είναι γεγονός πως τα αποτελέσματα ποικίλουν ως προς τη χώρα, τη βαθμίδα εκπαίδευσης και το πλήθος των μαθητών που προαυλίζονται. Παρατηρούνται εν γένει υψηλές στάθμες θορύβου, που σημαίνει ότι είναι απαραίτητα μέτρα ηχοπροστασίας τόσο για το σχολείο, όσο και για τους περίοικους.

Schoolyard as a source of noise: Review of past work

ABSTRACT

This paper aims to examine schoolyard as a source of noise through a literature review. Measured noise levels vary according to country of origin, level of education and amount of students involved. High noise levels are observed; this leads to the conclusion that noise protection measures need to be considered for the school and neighboring buildings.

Εισαγωγή

Ο χώρος προαυλισμού των σχολείων αναντίρρητα αποτελεί σημαντική πηγή θορύβου ιδιαίτερα στο αστικό περιβάλλον. Με δεδομένη την σχετική αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού στα αστικά κέντρα, πολλά κτήρια ευαίσθητα στο θόρυβο όπως κατοικίες, νοσοκομεία κτλ., μπορεί να γειτνιάζουν με σχολεία, συνεπώς μπορεί να είναι άμεσα εκτεθειμένα σε αυτού του είδους την ηχορύπανση. Συστηματική καταγραφή αυτού του θορύβου είναι δυνατόν να παρέχει πολύτιμα δεδομένα, με βάση τα οποία ο μηχανικός μπορεί να προβαίνει στο σχεδιασμό ηχοπροστασίας κτηρίων που γειτνιάζουν με σχολεία, αλλά και στο σχεδιασμό σχολικών χώρων προαυλισμού και όχι μόνον. Είναι γεγονός ότι αίθουσες διδασκαλίας, ακόμα και εντός του ίδιου σχολείου, είναι δυνατόν να προσβάλλονται απ' την ηχορύπανση αυτού του είδους σε περιπτώσεις ετεροχρονισμού μεταξύ περιόδων μαθήματος και προαυλισμού.

1. Βιβλιογραφικές αναφορές

Από τις παλαιότερες μελέτες στο θέμα είναι εκείνη των Scannell and Harwood [1], που έγινε με αφορμή την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για κατασκευή παιδικών σταθμών στη Νέα Ζηλανδία και έλλειψη σχεδιασμού στη χωροθέτηση αυτών σε σχέση με τον παραγόμενο θόρυβο και την ενόχληση που μπορεί να προκληθεί.

Πίνακας 1.1 Πρόβλεψη της στάθμης θορύβου σε παιδικούς σταθμούς κατά Kryter [2]

Τύπος φωνής	Ηχητική στάθμη (dBA) στο 1 μέτρο	Εκτιμώμενος χρόνος κάθε τύπου φωνής (minutes σε 15)	Συνιστάμενος ήχος (dBA) σε 15 λεπτά
Τυπικός	53	2.8	46
Φυσιολογικός	58	5	53
Αυξημένος	65	5	60
Δυνατός	74	2	65
Κραυγή	82	0.2	63
	Για 1 παιδί στο 1 μέτρο		68
	Για 12 παιδιά στο 1 μέτρο (από 68 + 10log (12) dBA)		79
	Για 12 παιδιά στα 5 μέτρα (από 79-20log(5/1)dBA)		65

Ο παραπάνω πίνακας βασίζεται στα επίπεδα θορύβου από ένα παιδί σε ένα μέτρο για διάφορους τύπους φωνών, όπως εξετάστηκαν από τον Kryter [2]. Ο κατ' εκτίμηση χρόνος για κάθε τύπο φωνής χρησιμοποιήθηκε για να προβλεφθεί η μέση ηχοστάθμη για 15 λεπτά για ένα παιδί. Υπολογίζεται η μείωση για απόσταση 5 μέτρων και θεωρείται ότι το 20% με 35% των παιδιών του παιδικού σταθμού φωνάζουν σε οποιαδήποτε στιγμή. Έτσι, παραπάνω υπολογίζεται η ηχοστάθμη για ένα σταθμό 35 παιδιών στην περίπτωση που το 35% των παιδιών (12 δηλαδή παιδιά) φωνάζουν οποιαδήποτε στιγμή (το χειρότερο σενάριο) σε απόσταση 1 μέτρου και 5 μέτρων από το προαύλιο. Το παραπάνω μοντέλο του Kryter δοκιμάστηκε και επιβεβαιώθηκε με μετρήσεις που έγιναν σε παιδικό σταθμό της Αυστραλίας, όπου η ηχητική στάθμη 30 παιδιών δε ξεπέρασε τα 60 dbA για το συγκεκριμένο 15λεπτο.

Σημαντικά στοιχεία μας δίνει μια μελέτη [3] που αποτελεί μέρος μιας συνολικότερης έρευνας που σχετίζεται με την ανακατασκευή σχολείου, υλοποιείται από το School Construction Authority της Νέας Υόρκης και στόχος της είναι να αξιολογήσει τη χωροθέτησή του με κριτήριο το θόρυβο. Εκεί, επιχειρείται η πρόβλεψη των επιπτώσεων σε σχέση με το θόρυβο και της ενόχλησης που μπορεί να παράξει το συγκεκριμένο σχολείο στον περιβάλλοντα χώρο, αλλά και της ενόχλησης που μπορεί να δημιουργήσει ο περιβάλλοντας χώρος σε αυτοκίνηση οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη και το υφιστάμενο επίπεδο θορύβου. Για αυτό το σκοπό, αναζητήθηκαν μετρήσεις των τελευταίων 5 χρόνων, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 1.2

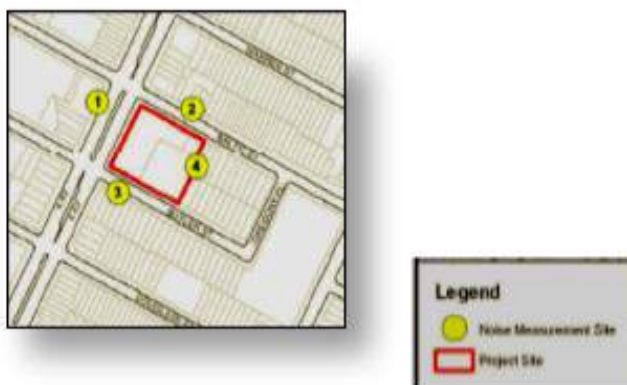
Πίνακας 1.2 Στάθμες θορύβου σε προαύλια δημοτικών σχολείων της Νέας Υόρκης

Έτος	L _{Aeq} (dBA)	L ₁₀ (dBA)
1987	75,0	-
1992	71,5	74,5

Συγκεκριμένα, από μετρήσεις που έγιναν σε 10 σχολικά προαύλια το 1987 το L_{eq} έφτανε έως 75 dbA, ενώ από αναλυτικές μετρήσεις του 1992 έως και 71,5 dbA αντίστοιχα. Με βάση αυτά, για την ανακατασκευή του σχολείου έγιναν μετρήσεις σε 4 σημεία του προαύλιου χώρου όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα και σχηματικά στο Σχήμα 1.1.

Πίνακας 1.3 Μετρήσεις σε υπό ανακατασκευή σχολείο της Νέας Υόρκης [3]

Σημείο μετρήσης	Περιγραφή χρήσης γης των σημείων μέτρησης	Ωριαίο L _{Aeq} (dBA)			Ωριαίο L ₁₀ (dBA)		
		π.μ.	Μεσημέρι	μ.μ.	π.μ.	Μεσημέρι	μ.μ.
1	Κατοικίες	70	68	68	73	70	71
2	Κατοικίες	64	62	60	66	64	63
3	Κατοικίες	64	56	61	65	59	63
4	Αυλές κατοικιών των οδών Baltic και Buttler	54	56	59	56	59	62



Σχήμα 1.1 Τοπογραφικό του υπό ανακατασκευή σχολείου (Πίνακας 1.3)

Είναι προφανές ότι τα παραπάνω στοιχεία από τη διεθνή βιβλιογραφία είναι ενδεικτικά μόνο και ούτως ή άλλως ανεπαρκή για να καλύψουν το θέμα συνολικά.

Πρόσφατα ,δηλαδή εδώ και πέντε χρόνια, προσπάθειες έχουν γίνει κ στον τόπο μας για να διαφωτίσουν το θέμα του θορύβου προαυλισμού σχολείων. Η πρώτη εξ αυτών προέρχεται από μια επί διπλώματι εργασία στο ΕΜΠ [4] και αφορά σχολεία από δημοτικά και λύκεια σε δύο διαφορετικές περιοχές της Αττικής. Η εργασία διερευνά τις στάθμες του θορύβου καθώς και τη συσχέτιση του θορύβου μεταξύ διαφορετικών βαθμίδων εκπαίδευσης και διαφορετικών περιοχών της πόλης. Τα σχολεία που εξετάστηκαν φιλοξενούν ένα τυπικό πλήθος μαθητών που είναι γύρω στα 300 παιδιά ανά σχολείο. Ο θόρυβος βάθους της περιοχής όπως μετρήθηκε, υπολείπεται των μετρήσεων με παιδιά κατά 25 dBA. Αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.4 Μετρήσεις θορύβου σε σχολικά προαύλια δημοτικών και λυκείων της Αττικής [4]

Σχολεία	LA _{eq}	LA _{f90}	LA _{f10}	LA _{fmax}	LA _{fmin}
3 ^ο Δημοτικό Μεταμόρφωσης	86,53	72,17	85,33	104,22	66,3
1 ^ο Δημοτικό Μεταμόρφωσης	89,87	68,58	87,75	110,68	61,52
7 ^ο Δημοτικό Μεταμόρφωσης	83,75	74,33	92,17	107,08	65,52
3 ^ο Δημοτικό Αγ. Αναργύρων	88,28	70,25	89,50	109,25	64,32
1 ^ο Δημοτικό Αγ. Αναργύρων	84,58	70,33	83,92	103,08	63,00
6 ^ο Δημοτικό Αγ. Αναργύρων	92,46	68,95	84,00	106,3	62,3
3 ^ο Λύκειο Αγ. Αναργύρων	69,43	60,17	72,92	85,00	55,63
Πειραματικό Λύκειο Αγ. Αναργύρων	67,62	59,67	71,05	85,35	55,25
1 ^ο Λύκειο Αγ. Αναργύρων	72,35	62,58	75,58	89,53	57,35

Στην επόμενη μελέτη που εξετάζουμε [5], γίνονται μετρήσεις σε 12 δημοτικά σχολεία όπου το πλήθος των μαθητών κυμαινόταν από 200 έως 300 παιδιά. Οι μετρήσεις θορύβου διεξήχθησαν από εξειδικευμένο προσωπικό του Ελληνικού Ινστιτούτου Υγιεινής και Ασφάλειας στην Εργασία (HIOHS) με τη χρήση μετρητή στάθμης ήχου Brüel και Kjaer 2231. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σχολείου και ολοκληρώθηκαν εντός μιας εργάσιμης ημέρας για κάθε σχολείο. Κάθε μέτρηση λήφθηκε για περίοδο πέντε λεπτών. Αποτελέσματα των μετρήσεων δίδονται στον πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.5 Μετρήσεις θορύβου προαυλισμού σε 12 δημοτικά σχολεία

Σχολείο	L_{Aeq} (dB)	L_{A90} (dB)
1	70.9	59
2	80.9	72
3	71.9	57
4	77.4	62.5
5	74	60
6	62.8	53
7	78	70.5
8	83	70
9	84.5	78
10	84.5	66
11	84.4	79
12	71	60

Τέλος, στοιχεία από σχολεία της περιφέρειας, τόσο δημοτικά όσο και λύκεια, υπάρχουν από υπό εκπόνηση διπλωματική εργασία του ΕΜΠ [6] που έγινε στην πόλη της Σπάρτης. Το πλήθος των μαθητών σε αυτά τα 7 σχολεία κυμαίνεται από 150 έως 200 μαθητές. Αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.6 Μετρήσεις θορύβου προαυλισμού σε δημοτικά και λύκεια της Σπάρτης (dBA)

Σχολεία	L_{Aeq}	L_{Af90}	L_{Af10}	L_{Afmax}	L_{Afmin}
1 ^ο Δημοτικό	73.8	58.4	76.9	94.0	49.3
3 ^ο Δημοτικό	73.1	60.8	76.4	94.6	47.5
4 ^ο Δημοτικό	71.3	63.6	75.1	91.5	45.4
5 ^ο Δημοτικό	74.9	62.4	75.3	95.6	50.9
1 ^ο Λύκειο	62.7	46.6	66.2	80.7	40.6
2 ^ο Λύκειο	61.7	42.8	65.0	80.0	40.3
3 ^ο Λύκειο	62.1	49.4	49.4	82.4	40.1

Όπως και στα σχολεία της Αθήνας που παρουσιάστηκαν παραπάνω, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ της στάθμης θορύβου δημοτικών και λυκείων. Πιο συγκεκριμένα, τα δημοτικά παρουσιάζουν L_{Aeq} μέχρι και 15 dBA υψηλότερο σε σχέση με τα λύκεια της αντίστοιχης περιοχής. Επίσης παρατηρείται πως η ισοδύναμη στάθμη θορύβου στα σχολεία της Σπάρτης είναι μικρότερη από αυτά των Αθηνών.

2. Συμπεράσματα

Η παραπάνω ανασκόπηση παρουσιάζει στάθμες θορύβου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτιμήσουν τόσο στην ενοχλητικότητα του θορύβου, δηλαδή ισοδύναμες στάθμες σε dBA (L_{Aeq}) όσο και για χρήση στο σχεδιασμό κατασκευών ηχοπροστασίας (L_{10} , L_{90} , L_{max} , L_{min}). Αποτελέσματα από τις παραπάνω μελέτες δεν είναι δυνατόν να συγκριθούν απολύτως μεταξύ τους ως έχουν, διότι αναφέρονται σε διαφορετικό πλήθος μαθητών, οπότε πρέπει να γίνει η κατάλληλη αναγωγή. Εντούτοις, είναι φανερό εν γένει ότι παρατηρούνται υψηλότερες στάθμες σε δημοτικά σχολεία σε σχέση με λύκεια και σε σχολεία της Αθήνας σε σχέση με αυτά της περιφέρειας. Επίσης η λίστα με τα επίπεδα εκπαίδευσης στα οποία αναφέρονται οι μετρήσεις δεν είναι πλήρης π.χ. έχουμε ελλιπή στοιχεία για νηπιαγωγεία και γυμνάσια σε ελληνικά σχολεία. Στις περισσότερες παραπάνω μελέτες δεν παρέχονται στοιχεία σχετικά με το θόρυβο βάθους της περιοχής που εξετάζεται, μολονότι αυτό αποτελεί κρίσιμο δεδομένο στην αποτίμηση της ηχορύπανσης που δημιουργείται. Περισσότερη ερευνά χρειάζεται να γίνει σε σχολεία της πατρίδας μας που να αναφέρεται συστηματικά σε όλες τις βαθμίδες εκπαίδευσης από σχολεία τόσο της πρωτεύουσας όσο και της περιφέρειας και μάλιστα από περιοχές με διαφορετικά κοινωνικά χαρακτηριστικά, προκειμένου να συμπληρωθούν τα δεδομένα για το είδος θορύβου που διερευνάται. Σε γενικές γραμμές, οι υψηλές στάθμες θορύβου που παρατηρούνται σε σχολικά προαύλια μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως χρειάζεται σχεδιασμός τόσο για την προστασία των περιοχών/κτηρίων γύρω από αυτά, όσο και για τις αίθουσες των αντίστοιχων σχολείων.

3. Αναφορές

[1] Scannell K., Harwood M., *Carrying out noise assessments for proposed childcare facilities*, Noise and Sound Services, 249-254, Australia (2006).

[2] Kryter K. D., *The Effects of Noise on Man*, Second Edition, Academic Press Inc, Orlando (1985).

[3] New York School Construction Authority, *Primary school replacement facility at PS 133(William A. Buttler school)*.

[4] Κουτελιά Α., Καλδάνη Β., *Το προαύλιο σχολείου ως πηγή θορύβου*, Διπλωματική Εργασία Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ υπό την επίβλεψη των καθ. Γ.Πουλάκου και Α.Σωτηροπούλου, Αθήνα (2012).

[5] Kapetanaki S., Konstantopoulou S., Linos A., *Noise Measurements and Sources of Noise in Primary Schools Located in Vulnerable Areas in Greece: A Cross-Sectional Study*, Occupational Medicine & Health Affairs, Volume 6, Issue 3, (2018).

[6] Ηλιόπουλος Ν., *Θόρυβος προαυλισμού σχολείων στην πόλη της Σπάρτης*, Υπό Εκπόνηση Διπλωματική Εργασία Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ

Ο Τελευταίος Παγκόσμιος Κοινός Πρόγονος: μια εργο- κεντρική προσέγγιση στη διδασκαλία Ψηφιακής Επεξεργασίας Ήχου

Εμμανουήλ Ροβίθης
Μετα-διδαστορικός Ερευνητής
Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα
emrovithis@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εισήγηση παρουσιάζει μια εναλλακτική προσέγγιση στη διδασκαλία του μαθήματος «Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου» κατά το ΣΤ' εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2018-19 στο Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας του Ιονίου Πανεπιστημίου. Η προσέγγιση αυτή αξιοποιεί στοιχεία από τα πεδία της Βιωματικής Μάθησης και της Παιγνιοποίησης για την υλοποίηση της τετρακάναλης διαδραστικής ηχητικής εγκατάστασης «Ο Τελευταίος Παγκόσμιος Κοινός Πρόγονος», με στόχο την ενίσχυση της κινητοποίησης των φοιτητών ως προς τη μαθησιακή διαδικασία. Ο βασικός άξονας του έργου συνίσταται στη συμβολική αντιστοίχιση της εξέλιξης ενός ζωντανού οργανισμού με ένα ολοένα αυξανόμενης πολυπλοκότητας και ευκρίνειας σύστημα πρόσληψης και επεξεργασίας ηχητικών δεδομένων. Στην εισήγηση αναλύονται το θεωρητικό υπόβαθρο και όλα τα στάδια της πολυπτυχούς συνθετικής διαδικασίας.

The Last Universal Common Ancestor: a project-oriented approach in teaching Digital Sound Processing

ABSTRACT

This paper presents an alternative approach in teaching the course “Digital Sound Processing” during the 6th semester of the academic year 2018-19 at the Department of Audio & Visual Arts of the Ionian University. This approach exploits the benefits of elements from the Experiential Learning Theory, as well as the of the field of Gamification for the realization of the 4-channel interactive audio installation “The Last Universal Common Ancestor”, with the aim of enhancing students’ motivation towards the learning process. The work evolves around symbolically mapping the evolutionary process of a living organism to an audio processing system of rising complexity and fidelity. The theoretical background, as well as all stages of the multi-faceted creative process are described in detail.

Εισαγωγή

Η ολοένα αυξανόμενη εισχώρηση της ψηφιακής τεχνολογίας στις πτυχές της σύγχρονης ζωής έχει αναδιαμορφώσει ριζικά και το πεδίο της μουσικής δημιουργίας. Η επίδραση αυτή είναι καθολική: από τη συλλογή μέχρι τον σχεδιασμό, από την επεξεργασία μέχρι την τελική μείξη, και από τη διανομή μέχρι την ακρόαση, σε ένα ή και όλα από τα παραπάνω στάδια, η ακουστική πληροφορία θα αναπαρασταθεί ως ψηφιακά δείγματα στο εσωτερικό του υπολογιστή, καθιστώντας δυνατές διαδικασίες που δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν με αναλογικά μέσα. Συνεπώς, οι σημερινοί δημιουργοί οφείλουν να είναι ενήμεροι των νέων εργαλείων που έχουν στη διάθεσή τους, αν θέλουν να συμβαδίζουν με τις σύγχρονες απαιτήσεις της μουσικής βιομηχανίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, το μάθημα «Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου» του Τμήματος Τεχνών Ήχου και Εικόνας (ΤΤΗΕ) του Ιονίου Πανεπιστημίου αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς εισάγει τους σπουδαστές τόσο στις θεωρητικές αρχές των τεχνικών ηχητικής πρόσληψης και επεξεργασίας, όσο και στην πρακτική, προγραμματιστική τους υλοποίηση, εφόδια απαραίτητα για την επαγγελματική τους αρτιότητα και καλλιτεχνική έκφραση. Το επίσημο πρόγραμμα σπουδών της πενταετούς φοίτησης στο ΤΤΗΕ θέτει ως στόχο τη συστηματική εκπαίδευση και κατάρτιση επαγγελματιών και καλλιτεχνών στον τομέα της Οπτικοακουστικής Τέχνης μέσω, ανάμεσα σε άλλα, της επιστημονικής έρευνας γύρω από τις εφαρμογές της σύγχρονης τεχνολογίας στην παραγωγή και επεξεργασία του ήχου, καθώς και τις νέες μορφές επικοινωνίας και καλλιτεχνικής δημιουργίας που προκύπτουν. [1] Μέσα από το συγκεκριμένο μάθημα οι σπουδαστές εισάγονται εκ των έσω στις τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας ηχητικού σήματος: στις μεν διαλέξεις τους παρουσιάζονται σε θεωρητικό επίπεδο οι βασικές αρχές μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά, καθώς και η δομική λειτουργία των επεξεργαστικών αλγορίθμων, στις δε εργαστηριακές ασκήσεις εξοικειώνονται πρακτικά με την υλοποίηση των αλγορίθμων αυτών και με την εφαρμογή τους σε ηχητικά δείγματα.

Ωστόσο, λόγω της τεχνικής φύσης του μαθήματος, εγκυμονούν οι εξής κίνδυνοι κατά τη διδασκαλία του: α) η παράδοση να αναλωθεί σε τεχνικές λεπτομέρειες παραβλέποντας τις δημιουργικές δυνατότητες των διδασκόμενων εργαλείων, και β) η ανάγκη εισαγωγής κώδικα να λειτουργήσει αποθαρρυντικά ως προς τον πρακτικό πειραματισμό και τη γενικότερη μαθησιακή διαδικασία. Για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε από τον υπογράφοτα μια εναλλακτική, εργο-κεντρική προσέγγιση στη διδασκαλία του μαθήματος. Κατά τον σχεδιασμό της χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τα πεδία της Βιοματικής Μάθησης (Experiential Learning) και της Παιγνιοποίησης (Gamification). Η παρούσα δημοσίευση περιγράφει τη διαδικασία του σχεδιασμού της διδασκαλίας και τα στάδια της υλοποίησης του τελικού έργου.

1. Σχεδιαστικές Προδιαγραφές

1.1 Στοιχεία Βιοματικής Μάθησης

Η θεωρία της Βιοματικής Μάθησης δεν εστιάζει στα αποτελέσματα, αλλά στην ίδια τη μαθησιακή διαδικασία, θεωρώντας πως αυτή ξεκινάει με την εδώ-και-τώρα εμπειρική σχέση του διδασκόμενου με το αντικείμενο και ακολουθείται από την

παρατήρηση και την περισυλλογή των σχετικών με αυτή την εμπειρία δεδομένων. [2] Έχει υποστηριχθεί πως η ενεργή εμπλοκή προς την επίτευξη ενός στόχου, καθώς και η ανάλυση των ενεργειών και η ανατροφοδότηση των συμπερασμάτων, με στόχο τον επαναπροσδιορισμό της γνώσης και τη διαμόρφωση νέων εμπειριών, αποτελούν βασικούς άξονες της βελτίωσης της ανώτατης εκπαίδευσης. [3] Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπ' όψιν αποφασίστηκε η δημιουργία ενός έργου, στην πραγμάτωση του οποίου οι φοιτητές θα εμπλακούν ενεργά σε όλα τα στάδια, από την εύρεση της κεντρικής ιδέας μέχρι την πρακτική υλοποίηση και την τελική παρουσίασή του στο τέλος του εξαμήνου. Η ενασχόληση με το πρότζεκτ εκτάθηκε στους τελευταίους δύο μήνες, ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την εποπτεία των πράξεών τους και την ανατροφοδότηση με σχόλια και κατευθύνσεις.

Μια ακόμα θέση της θεωρίας της Βιωματικής Μάθησης είναι πως η μάθηση συντελείται μέσω της συνεργατικής συνδιαλλαγής ανάμεσα στο άτομο και το κοινωνικό περιβάλλον, διαδικασία που δομεί τον χώρο μάθησης ως έννοια που υπερβαίνει τα φυσικά όρια του διδασκαλείου και συμπεριλαμβάνει τη συνολική κοινωνική δραστηριότητα του διδασκόμενου και τη συμμετοχή του σε κοινότητες εξάσκησης. [4] Προς αυτή την κατεύθυνση, το έργο σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να παρέχει ερωτήματα και ασχολίες που απαιτούν από τους φοιτητές να προβληματιστούν, να συνεργαστούν και να πράξουν μέσα σε και έξω από το χωροχρονικό πλαίσιο των διαλέξεων και εργαστηριακών συνεδριών.

1.2 Στοιχεία Παιγνιοποίησης

Η παιγνιοποίηση έγκειται στην εφαρμογή παιγνιακών σεναρίων και μηχανικών με στόχο την ενίσχυση της κινητοποίησης και της εμπύθισης των – στην περίπτωση της εκπαίδευσης – διδασκόμενων στη στοχευμένη δραστηριότητα. Δομικές έννοιες των παιχνιδιών που αξιοποιούνται κατά την παιγνιοποίηση είναι το σύστημα, δηλαδή ένα σύνολο διασυνδεδεμένων στοιχείων, οι κανόνες, που ορίζουν τις επιτρεπόμενες και μη ενέργειες, η μηχανική, δηλαδή οι απαιτούμενες ενέργειες και η οργάνωσή τους σε επίπεδα δυσκολίας και βαθμίδες αξιολόγησης, και ο στόχος, που ορίζει με σαφήνεια το επιθυμητό, μετρήσιμο αποτέλεσμα και τη σχετική ανταμειβή. [5] Η εναλλακτική προσέγγιση της διδασκαλίας του μαθήματος δεν αφορούσε στον σχεδιασμό κάποιου παιχνιδιού, όμως αξιοποίησε τα παραπάνω στοιχεία παιγνιοποίησης για την οργάνωση και υλοποίηση του έργου με απώτερο στόχο την κινητοποίηση των φοιτητών. Έτσι, ορίστηκε ως τελικό παραδοτέο η δημιουργία μιας ηχητικής εγκατάστασης και ετέθησαν κανόνες, περιορισμοί και μηχανισμοί, σχετικοί τόσο με την τελική της λειτουργία, όσο και με τη διαδικασία υλοποίησής της.

Παράλληλα, ελήφθησαν υπ' όψιν παιγνιακά στοιχεία που έχουν προταθεί ως κατάλληλα για την αντιμετώπιση των ιδιαίτερων αναγκών της ψηφιακής εκπαίδευσης, όπως η ενεργή συμμετοχή, οι κλιμακωτά αυξανόμενης δυσκολίας εργασίες, η εξάσκηση και ανατροφοδότηση, και η καθοδηγούμενη ανακάλυψη. [6] Έτσι, αναπτύχθηκαν περαιτέρω οι απαιτήσεις του έργου από άποψη διδασκαλίας και υλοποίησης, αλλά και αποφασίστηκε η διαδραστική μορφή του, δηλαδή το κοινό να συμμετέχει ενεργά στο ακουστικό αποτέλεσμα της τελικής εγκατάστασης.

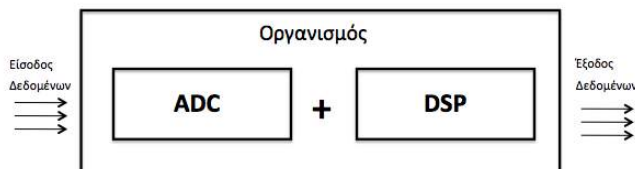
2. Ο Τελευταίος Παγκόσμιος Κοινός Πρόγονος

Στο έργο συμμετείχαν 12 φοιτητές. Η επιτυχής ολοκλήρωση του έργου ίσχυσε ως απαλλακτική εργασία εξαμήνου, υπό την προϋπόθεση ο φοιτητής να έχει επιδείξει την απαραίτητη συνέπεια σε όλα τα στάδια της υλοποίησης. Προγραμματιστικά, οι φοιτητές διδάχτηκαν το ελεύθερο λογισμικό GNU Octave για την συγγραφή του παραδοτέου κώδικα. Το λογισμικό για την διαδραστική εγκατάσταση υλοποιήθηκε στην προγραμματιστική πλατφόρμα Max/MSP και για τη δημιουργία της διαδραστικής διεπαφής χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino.

2.1 Εννοιακός Σχεδιασμός Κεντρικής Ιδέας

Έχει υποστηριχτεί πως η μουσική εκπαίδευση θα πρέπει να προάγει την ψηφιακή τεχνολογία σε 3 διαστάσεις: ως εργαλείο, ως μουσικό όργανο, αλλά και ως μέσο για σκέψη. [7] Σε αυτό το πνεύμα, οι φοιτητές κλήθηκαν να σχεδιάσουν μαζί με τον διδάσκοντα την κεντρική ιδέα του έργου, η οποία θα διασφαλίζει το απαραίτητο πλαίσιο, ώστε ο καθένας ξεχωριστά να μπορεί να εξελίξει την προσωπική του καλλιτεχνική έκφραση. Για την εύρεση της ιδέας του έργου αφιερώθηκαν 15-20 λεπτά συζήτησης (brainstorming) στο τέλος κάθε διάλεξης. Το συνθετικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μεταφορά, δηλαδή η διαδικασία συσχέτισης δύο ετερόκλητων πεδίων μέσω της αντιστοίχισης των στοιχείων τους, διαδικασία κεντρικής σημασίας για τον εννοιακό σχεδιασμό έργων που αφορούν την εξαγωγή νοήματος από μη-λεκτική ηχητική πληροφορία. [8]

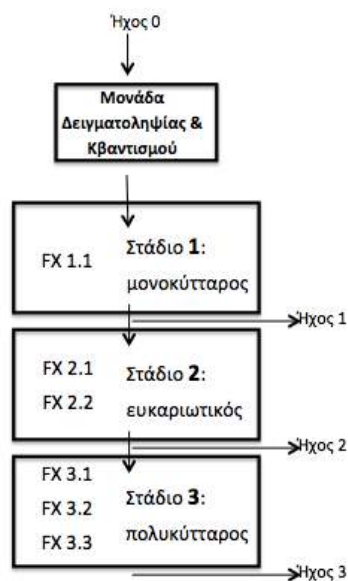
Αρχικά κατηγοριοποιήθηκε η διδακτέα ύλη, ώστε να αναγνωριστούν οι ιδιότητες προς αντιστοίχιση. Διαπιστώθηκαν δύο μεγάλες κατηγορίες, καθώς οι πρώτες συνεδρίες ασχολούνται με τα στάδια μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, τα ενδεχόμενα προβλήματα και τους τρόπους αντιμετώπιση αυτών, ενώ οι υπόλοιπες με την ανάλυση και υλοποίηση μονάδων επεξεργασίας. Η διάκριση αυτή οδήγησε στην αντιστοίχιση των συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας ήχου με τους ζωντανούς οργανισμούς. Τα εργαλεία εισαγωγής του αναλογικού σήματος στο ψηφιακό σύστημα ισοδυναμούν με τα αισθητήρια όργανα πρόσληψης δεδομένων από το περιβάλλον, ενώ τα εργαλεία επεξεργασίας του ψηφιακού πια σήματος με τα όργανα μέσα στο σώμα που διεκπεραιώνουν διακριτές λειτουργίες. Περαιτέρω ανάλυση της μεταφοράς οδήγησε στον Τελευταίο Παγκόσμιο Κοινό Πρόγονο (Last Universal Common Ancestor – LUCA), δηλαδή τον μονοκύτταρο οργανισμό, από τον οποίο εξελίχθηκαν όλα τα έμβια όντα. Η ηχητική αναπαράσταση αφενός του LUCA και αφετέρου της εξέλιξής του προς πιο σύνθετες μορφές παρέχει στους συμμετέχοντες τόσο την ισότητα της κοινής αφετηρίας, όσο και την προσωπική ελευθερία να αναπτύξει ο καθένας τον ηχητικό οργανισμό της φαντασίας του.



Σχήμα 2.1 Κεντρική Ιδέα

2.2 Διαμόρφωση Επιπέδων

Με δεδομένη την κεντρική ιδέα, ο εννοιακός σχεδιασμός εστίασε στην εξέλιξη των οργανισμών και παράλληλα στην περαιτέρω κατηγοριοποίηση και ενσωμάτωση της διδακτέας ύλης. Διακρίθηκαν 3 εξελικτικά στάδια: 1) ο μονοκύτταρος οργανισμός που έχει απλή δομή χωρίς πυρήνα, 2) ο ευκαριωτικός οργανισμός που, άλλες φορές με ένα κύτταρο και άλλες σε πιο σύνθετη μορφή, διαθέτει πλήρως σχηματισμένο πυρήνα και πρώιμες μορφές οργάνων, τα οργανίδια, και 3) ο πολυκύτταρος οργανισμός που αναθέτει σε πλήρως σχηματισμένα όργανα πολύπλοκες, διακριτές λειτουργίες. Η αποτύπωση της εξέλιξης ενός έμβιου οργανισμού μέσω της εξέλιξης ενός συστήματος επεξεργασίας ηχητικών δεδομένων συντελείται σε δύο παράλληλα επίπεδα. Στο πρώτο, όσο ο οργανισμός εξελίσσεται, τόσο βελτιώνεται η ποιότητα της πρόσληψης των δεδομένων. Συνεπώς, η συχνότητα δειγματοληψίας και η τάξη του κβαντιστή του σήματος αυξάνονται σταδιακά από τον μονοκύτταρο στον πολυκύτταρο οργανισμό. Στο δεύτερο επίπεδο, ο αλγόριθμος επεξεργασίας γίνεται ολοένα πιο πολύπλοκος με τον μονοκύτταρο οργανισμό να έχει μια ενστικτώδη αντίδραση προς το περιβάλλον και για αυτό να αποτελείται μόνο από επεξεργαστές δυναμικής περιοχής, τον ευκαριωτικό να αποκτά πυρήνα και να προσθέτει στη σύνθεσή του επεξεργαστές μνήμης, και τον πολυκύτταρο οργανισμό να έχει αποκτήσει πια τη δυνατότητα για συνθετότερες επεξεργαστικές μονάδες, απευθυνόμενος έτσι στο σύνολο της διδακτέας ύλης.



Σχήμα 2.2 Εξελικτικά Στάδια

2.3 Συλλογή Ηχητικού Υλικού

Όπως οι έμβιοι οργανισμοί προσλαμβάνουν ερεθίσματα από το περιβάλλον τους, έτσι και οι φοιτητές κλήθηκαν να συλλέξουν ήχους από τον πραγματικό κόσμο. Ως κατευθυντήριοι περιορισμοί ετέθησαν το πλήθος των ηχητικών δειγμάτων, 3 έως 10,

η διάρκειά τους, έως 1 λεπτό, και το είδος τους, διακρινόμενο σε αποσπάσματα ηχοτοπίων, όπως ένας πολυσύχναστος δρόμος, μεμονωμένες υφές και χειρονομίες, όπως ένας βόμβος ή χτυπήματα στην πόρτα, ήχοι παραγόμενοι από όντα, όπως ένα γάβγισμα, και αποσπάσματα προφορικού λόγου.

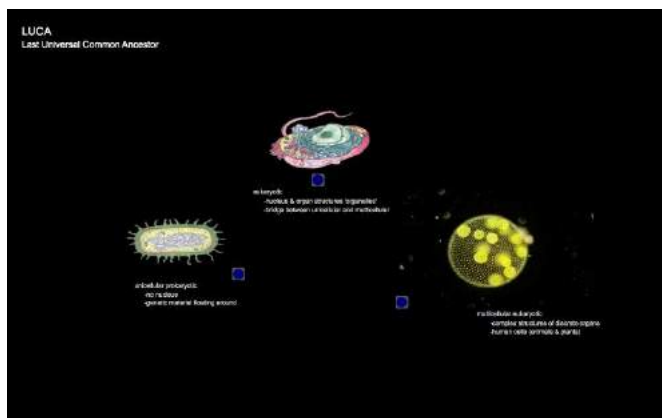
2.4 Συγγραφή Κώδικα

Η επίβλεψη της συγγραφής του κώδικα πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών ωρών. Το τελικό παραδοτέο αποτελείται από 2 τμήματα, το κύριο μέρος και τις συναρτήσεις. Στο κύριο μέρος πραγματοποιείται η εισαγωγή των ήχων με μεταβαλλόμενη δειγματοληψία και κβαντισμό, και η εξαγωγή τους, αφού εφαρμοστούν οι συναρτήσεις κάθε εξελικτικού σταδίου. Οι συναρτήσεις είναι υπεύθυνες για την επεξεργασία και ανακαλούνται σειραϊκά από τον κύριο κώδικα.

Βασικά κριτήρια για την αξιολόγηση του κώδικα αποτέλεσαν η λειτουργικότητά του, καθώς πρέπει να επεξεργάζεται και να εξάγει σωστά τα αρχεία ήχου, και ο τρόπος που ο κάθε φοιτητής έχει δομήσει τις συναρτήσεις που αποδίδουν την εξέλιξη του οργανισμού του. Η διαδοχή των μονάδων επεξεργασίας οφείλουν να συνθέτουν ένα εννοιακά πειστικό και συμπαγές οικοδόμημα, το οποίο να αναλύεται στα σχόλια του κώδικα.

2.5 Υλοποίηση Διαδραστικής Εφαρμογής

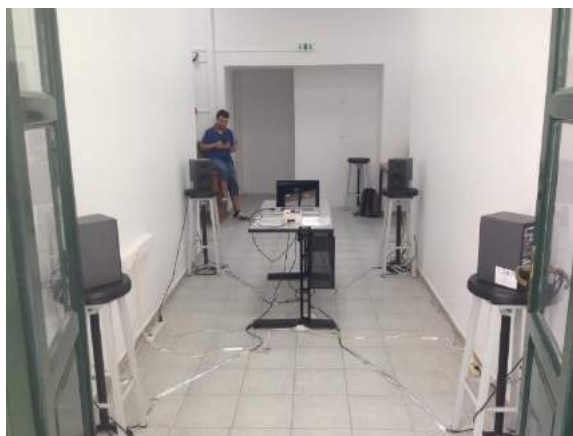
Η διαδραστική εφαρμογή υλοποιήθηκε από τον υπογράφοι σύμφωνα με τα από κοινού με τους φοιτητές συμφωνηθέντα κατά τον εννοιακό σχεδιασμό, και παρουσιάστηκε αναλυτικά κατά τη διάρκεια των εργαστηρίων με στόχο την εισαγωγή τους στις βασικές αρχές του οπτικού προγραμματισμού. Το σύστημα που σχεδιάστηκε επιλέγει στοχαστικά από το σύνολο των διαθέσιμων ήχων ανάλογα με το στάδιο εξέλιξης που είναι ενεργό τη δεδομένη στιγμή. Η επιλογή του εξελικτικού σταδίου πραγματοποιείται μέσω συσκευής διεπαφής (ποτενσιόμετρο), της οποίας η συνδεσμολογία και λειτουργία επίσης παρουσιάστηκαν στους φοιτητές.



Εικόνα 2.5 Περιβάλλον της Εφαρμογής

2.6 Τετρακάναλη Διαδραστική Ηχητική Εγκατάσταση

Η διαδραστική ηχητική εγκατάσταση έλαβε χώρα στο κτίριο του Τμήματος Τεχνών ήχου και Εικόνας του Ιονίου Πανεπιστημίου κατά τη διάρκεια του Φεστιβάλ Οπτικοακουστικών Τεχνών 2018. Τοποθετήθηκαν 4 ηχεία στις 4 γωνίες του χώρου για τη διάχυση των ήχων μέσω αντίστοιχων μονοφωνικών καναλιών. Ο επισκέπτης στεκόταν στο κέντρο και επηρέαζε το ακουστικό αποτέλεσμα επιλέγοντας ανάμεσα στα στάδια εξέλιξης. Όσο μεγαλύτερο το στάδιο εξέλιξης, τόσο πιο πυκνός ο ρυθμός αναπαραγωγής των ήχων. Το σύστημα σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να μπορούν να ακούγονται έως και 4 ήχοι ταυτόχρονα, ένας σε κάθε κανάλι, αλλά να μην μπορεί να διακοπεί ένας ήχος από κάποιον άλλον στο ίδιο κανάλι πριν το τέλος της αναπαραγωγής του. Οι συμμετέχοντες φοιτητές ανέλαβαν το στήσιμο και τη φύλαξη της εγκατάστασης ανά βάρδιες.



Εικόνα 2.6 Τετρακάναλη Διαδραστική Ηχητική Εγκατάσταση

3. Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε η εργο-κεντρική διδασκαλία του μαθήματος «Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου» με τελικό αποτέλεσμα την τετρακάναλη διαδραστική ηχητική εγκατάσταση «Ο Τελευταίος Παγκόσμιος Κοινός Πρόγονος». Στόχος της εναλλακτικής αυτής προσέγγισης ήταν η ενίσχυση του κινήτρου για παρακολούθηση και συμμετοχή, καθώς και η εμπειρική κατανόηση της στενής σχέσης ανάμεσα στην τεχνική γνώση και την καλλιτεχνική έκφραση. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο σχεδιασμός του έργου αξιοποίησε στοιχεία της θεωρίας της Βιωματικής Μάθησης και της διαδικασίας της παιγνιοποίησης, φέρνοντας τους φοιτητές σε επαφή με τη δημιουργική διαδικασία σε πολλαπλά επίπεδα: τον εννοιολογικό σχεδιασμό, την ηχητική σύνθεση, τον αλγοριθμικό προγραμματισμό, τον διαδραστικό σχεδιασμό, τη στοχαστική σύνθεση και την οργάνωση εγκατάστασης.

4. Αναφορές

- [1] Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας, «Σκοπός του Τμήματος» Ιόνιο Πανεπιστήμιο. [Online]. Available: <https://avarts.ionio.gr/gr/department/aim/>, (2018) [Accessed: 19-Sep-2018].
- [2] D. A. Kolb, «Experiential learning: Experience as the source of learning and development» FT press., (2014).
- [3] D. A. Kolb, A. Y., & Kolb, «Learning styles and learning spaces: Enhancing experiential learning in higher education» *Academy of Management Learning and Education*, vol. 4(2), pp. , 193–212, (2005).
- [4] Lave, J., Wenger, E., & Wenger, E. «Situated learning: Legitimate peripheral participation» Cambridge: Cambridge university press, (Vol. 521423740), (1991).
- [5] K. M. Kapp, «The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education» John Wiley & Sons, (2012).
- [6] M. Prensky, «Computer games and learning: Digital game-based learning» *Handbook of Computer Game Studies*, vol. 18, pp. 97–122, (2005).
- [7] A. R. Brown, «Music, Media and Making - Humanising Digital Media in Music Education» *International Journal of Music Education.*, pp. 10–17, (1999).
- [8] A. Pirhonen, «Metaphor as a focal concept in sound design» in *Proceedings of the 9th Audio Mostly: A Conference on Interaction With Sound*, p. 13, (2014).

Ηχητικός Σχεδιασμός για τον Κινηματογράφο & Εικαστικά

Γούσιος Χρήστος,
επ. καθηγητής, Τμήμα Κινηματογράφου,
Σ.Κ.Τ., ΑΠΘ, Ικονίου 1, Θεσσαλονίκη
cgoussios@hotmail.com,

Τσινίκας Νικόλαος,
καθηγητής, Τμήμα Αρχιτεκτόνων
Μηχανικών, Π.Σ., ΑΠΘ,
tsinikas@arch.auth.gr,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η εύρεση αισθητικών συσχετισμών ανάμεσα στα εικαστικά και τον ηχητικό σχεδιασμό για τον κινηματογράφο, αλλά και ο εντοπισμός άλλων σημείων τομής, όπως και παραλληλισμοί με την τεχνολογία του ήχου. Οι άμεσοι στόχοι είναι: i) η χρήση των σχέσεων αυτών ως δημιουργικά εργαλεία του ηχητικού σχεδιασμού και γενικότερα της προσπάθειας αφήγησης μέσω της σύνθεσης των ήχων στον κινηματογράφο και ii) η εφαρμογή στις εκπαιδευτικές διαδικασίες για τη διδασκαλία του ηχητικού σχεδιασμού και γενικότερα της σύνθεσης των ήχων με εναλλακτικούς δια-καλλιτεχνικούς τρόπους.

Sound Design for Film & Visual Arts

ABSTRACT

This work attempts to find aesthetic correlations between the visual arts and sound design for film, as well as to identify other intersections and parallelism with the sound technology. The direct objectives are: i) the use of these relationships as creative tools for sound design and for the synthesis of sounds in cinema and -in general- in narrative attempts through sonic media and (ii) application to educational processes for the teaching of sound design and, more generally, the synthesis of sounds in alternative cross-artistic and interdisciplinary ways.

1. Εισαγωγή και Μεθοδολογία που εφαρμόστηκε

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η εύρεση συσχετισμών, παραλληλισμών και σημείων τομής ανάμεσα στα εικαστικά και τον ηχητικό σχεδιασμό για τον κινηματογράφο, αναφορικά με την αισθητική, αλλά και την τεχνολογία του ήχου. Μέσα από την παρουσίαση γνωστών εικαστικών έργων γίνεται η προσπάθεια εντοπισμού:

1. Ηχητικών στοιχείων μέσα στους πίνακες
2. Στοιχείων του συνθετικού τρόπου με τον οποίο επεξεργαζόμαστε τους ήχους κατά τον ηχητικό σχεδιασμό, βάσει των τεσσάρων κύριων συνόλων των κινηματογραφικών ήχων (διάλογος, ατμόσφαιρες, εφέ, Μουσική)
3. Τεχνικών στα εικαστικά, μέσω των οποίων μπορούμε να εξηγήσουμε εργαλεία της επεξεργασίας του ήχου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούμε τα υλικά στη δημιουργία του ηχητικού σύμπαντος μιας κινηματογραφικής ταινίας.

2. Εισαγωγικά στοιχεία του Ηχητικού Σχεδιασμού

Ο ηχητικός σχεδιασμός για τον κινηματογράφο, αποτελεί μια συνθετική διαδικασία, που απαιτεί τεχνικές γνώσεις σχετικές με τον ήχο, αλλά και αισθητικό υπόβαθρο που να μπορεί να υποστηρίξει επιλογές, που να εξυπηρετούν την αφήγηση και την αισθητική θέση της κάθε ταινίας. Ένας μηχανικός ήχου που ασχολείται με τον ηχητικό σχεδιασμό, θα πρέπει να έχει απαντήσεις και για τα *πως*, αλλά κυρίως για τα *γιατί* των επιλογών του. Η παρούσα εργασία αναφέρεται στις συνήθεις ταινίες μυθοπλασίας μικρού και μεγάλου μήκους, τηλεοπτικές σειρές και ταινίες τεκμηρίωσης. Επίσης αναφέρεται περισσότερο σε ένα πρώτο κι άμεσο επίπεδο παραλληλισμού και περισσότερο στα εμφανή και προφανή στοιχεία και των δύο εφαρμογών, της ζωγραφικής και του ηχητικού σχεδιασμού.

Αρχικά πρέπει να ικανοποιηθούν οι βασικές ανάγκες που εξυπηρετούν την αληθοφάνεια του κινηματογραφικού ήχου: ακούμε αυτά που βλέπουμε (ή έστω τα περισσότερα). Ο ήχος στον κινηματογράφο και η συνολική του υφή μπορεί και να προσδώσει σε μια ταινία έναν συνολικό τόνο, που να είναι καθοριστικός και για την όλη διαδικασία της αφήγησης κι όλη την παρουσία του οπτικοακουστικού έργου, σε αντιστοιχία με την παλέτα και τον τόνο που διακρίνουμε στη φωτογραφία, αλλά και το σκηνικό. Επιπρόσθετα, καθώς ο ήχος επιδρά κυρίως στο υποσυνείδητο, θα πρέπει να σκεφτόμαστε και τα στοιχεία που δεν μπορούν να γίνουν αντιληπτά μόνον με τη χρήση του ήχου (υπάρχει ήχος της βροχής, αλλά δεν υπάρχει ήχος του χειμώνα (υπάρχει όμως ήχος που δίνει την αίσθηση του χειμώνα)), αλλά και αυτά που επιθυμούμε να επικοινωνήσουμε με το κοινό, θεατές και ακροατές.

Υπάρχει η δυνατότητα της συμπληρωματικής αφήγησης, της παρουσίασης στοιχείων της ιστορίας, πριν αυτά συμβούν (foreshadowing), καθώς και η ανάμνηση κι η επαναφορά συμβάντων μόνον με τη χρήση του ήχου τους, με γνώμονα τους περιορισμούς που υπάρχουν στην προσπάθεια αφήγησης με μόνο μέσο τον ήχο, όπου είναι αναγκαία η απόδοση πλήθους λεπτομερειών, αν επιθυμούμε να είναι κατανοητή. Για να συμβούν όλα αυτά, ο ήχος θα πρέπει να αποτελεί στοιχείο της σκέψης και επιθυμίας των δημιουργών του εκάστοτε οπτικοακουστικού έργου, από το στάδιο της προπαραγωγής (pre-production) και του σχεδιασμού του, καθώς δεν έχουμε πάντα την ευκαιρία να χρησιμοποιήσουμε δημιουργικά τον ήχο, όταν το έργο έχει ολοκληρωθεί ως εικόνα: όχι μόνον το μοντάζ, αλλά και τα γυρίσματα, θα είναι σίγουρα διαφορετικά, αν υπάρχει πρόθεση για δημιουργική χρήση του ήχου, λ.χ. *Raising Arizona*, *There will be blood* και πολλές άλλες [1].

3. Η διαδικασία του Ηχητικού Σχεδιασμού

Για τον ηχητικό σχεδιασμό μπορεί να υπάρξει προεργασία, η οποία πιθανά - μάλλον επιθυμητά- ξεκινάει από το σενάριο, με πολλαπλούς και διαφορετικούς τρόπους, που καθορίζονται από τον τρόπο εργασίας των σκηνοθετών και των σχεδιαστών ήχου [2],[3]. Κατά τη διαδικασία του ηχητικού σχεδιασμού, συλλέγονται, τοποθετούνται κι επεξεργάζονται στο DAW (Digital Audio Workstation) όλοι οι ήχοι, που συνθέτουν τελικά το ηχητικό σύμπαν της εκάστοτε ταινίας. Μια γενική κατηγοριοποίησή τους, είναι η παρακάτω, όπου και διακρίνουμε το τετραμερές του κινηματογραφικού ήχου:

1. Διάλογοι/φωνές

2. Ατμόσφαιρες (atmospheres, ambiances, backgrounds)
3. Εφέ
4. Μουσική

Οι παραπάνω κατηγορίες καθορίζονται από πολλές παραμέτρους, όπως: η φύση των ήχων της κάθε ομάδας, ο τρόπος της διαχείρισής τους, η σημαντικότητά τους σε κάθε είδος ταινίας, η προέλευσή τους κλπ, όπου βέβαια η Μουσική προέρχεται από άλλους καλλιτεχνικούς συντελεστές, αλλά αρκετά συχνά πλέον συνδιαλέγεται με τους υπόλοιπους ήχους μιας ταινίας (λ.χ. Dunkirk, Atonement, Gravity, Love Me Tonight, Dancer in the Dark και πολλά άλλα) [4].

Ως συνθετική διαδικασία ο ηχητικός σχεδιασμός, συσχετίζεται πρωταρχικά με τα υλικά, την εύρεση, διαλογή, τον πειραματισμό και την επιλογή, αλλά και την πρωτότυπη δημιουργία τους όπου χρειάζεται, καθώς μπορούμε -και θα μπορούμε για πάντα- να σχεδιάζουμε και να κατασκευάζουμε νέους ήχους για τις εφαρμογές όπου είναι απαραίτητο (ταινίες, νέα video games, VR & AR κ.ά.). Η επιλογή των υλικών άλλοτε είναι πολύ συγκεκριμένη (διάλογοι) κι άλλοτε παρέχει περισσότερη ελευθερία, αλλά και ποικιλία (λ.χ. για τα ηχητικά εφέ: σύνθεση ήχων, βιβλιοθήκες ήχων, ηχογραφήσεις, ήχοι από τα γυρίσματα (διεθνής μπάντα & off)).

Επόμενο στάδιο αποτελεί η συν-τοποθέτηση των ήχων που έχουν συλλεχθεί (track laying) και η επεξεργασία τους με τη χρήση όλων των πιθανών εργαλείων της επεξεργασίας (equalization, compression, reverb, delay κ.ά.). Από τη συνύπαρξη των ήχων συχνά προκύπτουν ενδιαφέροντες συσχετισμοί και συνέργειες ανάμεσά τους, όπου πολλές φορές παρατηρούμε ή και επιδιώκουμε και κάποιες επεμβάσεις μουσικής προσέγγισης, όπως λ.χ. η συνύπαρξη τριών ατμοσφαιρών με διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο, θυμίζει ή έστω μπορεί και να παραπέμψει στη συνύπαρξη των οργάνων ενός κουαρτέτου εγχόρδων (π.χ. distant traffic, hum, buzz). Βεβαίως από τη συνύπαρξη των ήχων και αυτή των ήχων με τις εικόνες, ζητούμενο είναι η κατασκευή ενός soundtrack -κυριολεκτικά- το οποίο να υποστηρίζει την ταινία όπου απαιτείται, καθώς και να συνδιαλέγεται με τις εικόνες. Η διαδικασία του ηχητικού σχεδιασμού πραγματοποιείται πάντα με ανοικτό διάλογο και συνεργασία με τον σκηνοθέτη, αλλά και τον παραγωγό του κάθε οπτικοακουστικού έργου. Σημαντικό επίσης είναι να αναφερθεί ότι όλες οι τελικές αποφάσεις και όλη η τελική μορφή του ήχου της κάθε ταινίας καθορίζεται στο τελικό στάδιο, αυτό της μίξης.

4. Ηχητικός Σχεδιασμός & Εκπαίδευση

Στο πλαίσιο της εκπαίδευσης που σχετίζεται με τα οπτικοακουστικά έργα και προϊόντα, ο ήχος έχει τη δική του θέση, όπου είναι απαραίτητη η διδασκαλία και της τεχνικής, αλλά και της αισθητικής πτυχής του. Ανάλογα (και) με το ακαδημαϊκό πλαίσιο, διαμορφώνεται και η ταυτότητα του περιεχομένου των μαθημάτων του ήχου, όπως και μέρος της ταυτότητας των μελλοντικών επαγγελματιών του ήχου. Η διδασκαλία του ήχου, πραγματοποιείται στη χώρα μας και στην Πολυτεχνική Σχολή, αλλά και στην Σχολή Καλών Τεχνών κι υπάρχουν απόφοιτοι και από τις δύο, που μπορεί και να εμπλακούν στις διαδικασίες της οπτικοακουστικής δημιουργίας. Οι έννοιες όμως που σχετίζονται με την επεξεργασία του ήχου (και φυσικά της Μουσικής), από τη λήψη του μέχρι και την τελική αναπαραγωγή του από διαφορετικά μέσα και σε διαφορετικούς χώρους, είναι οικουμενικές. Η έννοια λ.χ. της ισοστάθμισης πρέπει να είναι κατανοητή και από τον μηχανικό που ασχολείται με την κτηριακή ακουστική, αλλά και από τον σχεδιαστή του ήχου μιας κινηματογραφικής

ταινίας. Πέρα από την απαραίτητη φυσική του ήχου, ακόμα και την απλούστευση της παρουσίας της, υπάρχει πλήθος άλλων μέσων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να γίνουν κατανοητές όλες οι έννοιες που σχετίζονται με τον ήχο και την τεχνολογία του, ακόμη και σε ανθρώπους που έχουν λιγότερο τεχνολογικό προσανατολισμό και να δίνεται η δυνατότητα για την παροχή απαντήσεων σε όλα τα πώς του ήχου, πέρα από την καλλιέργεια και τον διάλογο γύρω από τα γιατί. Ένας έμμεσος τρόπος είναι η παρουσίαση του ήχου μέσα από άλλες συνθετικές διαδικασίες, καλλιτεχνικής φύσης και μη.

5. Αναπαραστάσεις του ήχου σε πίνακες ζωγραφικής

Σε πολλά έργα ζωγραφικής, απεικονίζεται η παραγωγή ήχων, όπως για παράδειγμα διάφορες δράσεις, που συνδέονται με συγκεκριμένους ήχους (λ.χ. κύμα-ήχος κύματος, άνθρωπος περπατάει-ήχος βημάτων). Πρόκειται για ήχους τους οποίους είτε φανταζόμαστε, είτε ακούμε με το εσωτερικό αυτί μας καθώς παρατηρούμε το εκάστοτε έργο. Ονομάζουμε **άμεσα ηχο-περιεκτικές εικόνες** αυτές που συνδέονται άμεσα με κάποιον ήχο και που απεικονίζεται η παραγωγή τους, αλλά και **έμμεσα ηχο-περιεκτικές εικόνες** αυτές που συνδέονται σε δεύτερο επίπεδο με την παραγωγή συγκεκριμένων ήχων (δέντρο κάμπτεται-ήχος αέρα, φύση την άνοιξη-ήχοι πουλιών) [5]. Με γνώμονα τον παραπάνω διαχωρισμό των εικόνων, διαπιστώνουμε ότι τα περισσότερα γνωστά έργα των εικαστικών συνοδεύονται από τους ήχους τους, οι οποίοι θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν εύκολα στις τρεις από τις τέσσερις ομάδες των κινηματογραφικών ήχων (διάλογοι/φωνές, ατμόσφαιρες, ηχητικά εφέ). Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να βρίσκουμε αντιστοιχίες στα οπτικοακουστικά έργα, για τα οποία καλούμαστε να σχεδιάσουμε το ηχητικό τους περιβάλλον. Μια απλή πρώτη άσκηση, είναι η καταγραφή των ήχων αυτών και στη συνέχεια η ομαδοποίησή τους. Οι αναπαραστάσεις της Μουσικής μέσα από τη ζωγραφική αποτελούν από μόνες τους ένα ευρύ πεδίο έρευνας, το οποίο και δεν σχετίζεται με την παρούσα εργασία, όπως και η αντιστοίχιση των χρωμάτων με τη Μουσική (και κατά συνέπεια η συναισθησία).

6. Ήχος ως ύπαρξη στα εικαστικά και όχι μόνον ως αναπαράσταση

Στο γνωστό έργο *Μάχη Καρναβαλιού και Σαρακοστής* (1559), και σύμφωνα με τον Ζακ Ατταλί [6], για πρώτη ίσως φορά στη δυτική τέχνη, ο Πίτερ Μπρίγκελ ο πρεσβύτερος (1525-1569), δεν μας κάνει μονάχα να δούμε, αλλά και να ακούσουμε τον κόσμο. Στο ίδιο δοκίμιο αναφέρεται αυτός ο πίνακας ως χαρτογραφία των ήχων, αλλά κι ότι ο Μπρίγκελ είχε δει τη βαθιά ταυτότητα των θορύβων και των διαφορών, της σιωπής και της ανωνυμίας. Μπορούμε να υπερασπιστούμε ότι στο συγκεκριμένο έργο, ο ήχος όχι μόνον αναπαρίσταται, αλλά υπάρχει κιόλας.

Όντως, ακόμη κι αν αδιαφορήσουμε για τις εικόνες-πηγές ήχου αλλά και Μουσικής, τους ήχους που απεικονίζονται στο συγκεκριμένο έργο, από μόνο του θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί ως ένα πολύ ιδιαίτερο και συνολικό θορυβώδες ηχοτοπίο, ιδιαίτερα κατανεμημένο μέσα στο χώρο της πλατείας. Στη δεξιά πλευρά του έργου έχουμε τη σιωπή και στα αριστερά το θόρυβο, μπροστά στην εκκλησία και στο πανδοχείο αντίστοιχα. Επιπρόσθετα στο κέντρο του πίνακα υπάρχει ένα πηγάδι και στο βάθος λεπτομερέστατη δραστηριότητα.

Ένα τεχνικό ζήτημα του ήχου, το οποίο μπορούμε να αναλύσουμε από τον πίνακα αυτό, είναι η χωρική τοποθέτησή του στο χώρο, το *panorama* (*pan*) των 180° αλλά και το *surround* στο χώρο. Με αφετηρία την ξεκάθαρη αντιπαράθεση της σιωπής και του θορύβου στις δυο πλευρές της *Μάχης Καρναβαλιού και Σαρακοστής*, είναι εφικτή η διατύπωση των κανόνων και δυνατοτήτων που έχουμε για τη διάκριση των ήχων, αλλά και την αρμονικότερη συνύπαρξή τους, με την τοποθέτησή τους είτε στη διδιάστατη οθόνη, είτε στον τρισδιάστατο χώρο της προβολής. Επίσης, μπορούμε να διευρύνουμε τον προβληματισμό και στη δυνατότητα αφήγησης μέσω των ήχων, με την τοποθέτησή τους στο χώρο.

Στον κινηματογραφικό ήχο, με τον όρο ατμόσφαιρες (*atmospheres, ambiances, backgrounds*) αναφερόμαστε στους συνεχείς ήχους, που συνήθως δεν προσδιορίζονται από τους επιμέρους ήχους από τους οποίους αποτελούνται, αλλά από το σύνολό τους (λ.χ. η ατμόσφαιρα της πόλης είναι οι κόρνες, τα αυτοκίνητα, οι πεζοί, οι φωνές, τα κατασκευαστικά έργα κλπ, ως συνολικό αποτέλεσμα κι όχι ως διακριτοί ήχοι). Οι ατμόσφαιρες χαρακτηρίζονται από συνέχεια κι εξυπηρετούν τη συνέχεια (*continuity*) στις εικόνες, τις λήψεις και τα πλάνα κάθε σκηνής. Το έργο του Μπρίγκελ, αν ειδωθεί ως σύνολο όλων των επιμέρους λεπτομερειών του, θυμίζει έντονα τον πλούτο των ηχητικών ατμοσφαιρών από τη μία, αλλά και τον τρόπο που διακριτές λεπτομέρειες αναπηδούν μέσα από τον πλούτο αυτό. Αν δίπλα στο αριστούργημα του Μπρίγκελ αντιπαραθέσουμε την εικόνα μιας σύγχρονης πλατείας, μπορούμε με την ίδια λογική να σκεφτούμε τη δημιουργική πτυχή του ήχου, αλλά και τεχνικά, την χωρική τοποθέτηση του ήχου (*spatial sound*) στο ηχοσύστημα, αλλά και στο χώρο.

Επιπρόσθετα, οι ίδιοι παραλληλισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν και στις περιπτώσεις της απεικόνισης της φύσης, μόνο που στην περίπτωση αυτή συνήθως υπερσχύουν οι ήχοι των αόρατων πηγών: οι παρουσίες, δράσεις, λεπτομέρειες του τοπίου και τα καιρικά και άλλα φαινόμενα, δεν απεικονίζονται με τον τρόπο που μπορούν όλα όσα συνδέονται με την ανθρώπινη ύπαρξη. Ως εκ τούτου, πρέπει να επιστρατεύεται η φαντασία αναφορικά με τους ήχους που συνοδεύουν ένα τοπίο, πέρα από τα εμφανή, καθώς και για το σύνολο όλων όσων βρίσκονται στην κατοπτρική πλευρά του. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να σημειώνουμε πιθανούς ήχους ενός τοπίου, οι οποίοι δικαιολογούνται από τη συνολική εικόνα, αλλά αντιστοιχούν σε καταστάσεις που δεν είναι εμφανείς αλλά και προφανείς. Για παράδειγμα στις δύο εικόνες ελληνικών τοπίων, ακούγονται: βατράχια, λίμνη, ρυάκι, αεράκι, πουλιά, φύλλα, έντομα, άλογα, σκυλιά από μακριά, ένα αεροπλάνο που περνάει (Νυμφαίο) & αγριοκάτσικα, τζιτζίκια, ένας γάιδαρος, ηχώ, ένα αεροπλάνο που πετάει (Καρθέα).

7. Η Μόνα Λίσα ως οδηγός για τον Ηχητικό Σχεδιασμό

Στο πασίγνωστο αριστούργημα Μόνα Λίσα (1503-1519), ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι (1452-1519), επέλεξε να τοποθετήσει βουνά, λόφους, μια γέφυρα, κοιλάδες, ένα μονοπάτι κι έναν ποταμό πίσω από το διάσημο πορτρέτο. Η εναλλαγή διαφορετικού περιβάλλοντος χώρου στη Μόνα Λίσα, θα μπορούσε να δώσει τελείως διαφορετική αίσθηση στην ανάγνωσή του. Ακριβώς όπως συμβαίνει και στον κινηματογράφο, όπου και μόνον ο ήχος της ατμόσφαιρας μπορεί -σε συγκεκριμένες περιπτώσεις- να δώσει πλήθος αφηγηματικών πληροφοριών, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται διαφορετικές αφηγηματικές πτυχές στην κάθε περίπτωση [7].

Επιπρόσθετα, θα μπορούσε κανείς να εξετάσει ανεξάρτητα το περιβάλλον ενός πορτρέτου, σε μια προσπάθεια να προσδιορίσει το νόημα που περιέχει. Στον ήχο, σε αντίθεση με την εικόνα, όπου είναι ορατές όλες οι λεπτομέρειες, οι πηγές κάποιων ηχητικών λεπτομερειών μπορεί να είναι καλά κρυμμένες, αόρατες στο μάτι, αλλά έντονες στο αυτί. Σε μια απεικόνιση της ανοιξιάτικης φύσης δεν βλέπουμε τις μύγες κι άλλα έντομα, που ζουζουνίζουν γύρω μας, το νερό που κελαρύζει στο ρυάκι, το οποίο μπορεί να μην είναι καν ορατό, αλλά περνάει ανάμεσα στα δέντρα, κ.ά.

Στις εικόνες μπορούν να ενυπάρχουν έμμεσες ηχητικές λεπτομέρειες, η πηγή των οποίων δεν είναι ορατή, αλλά δικαιολογείται από το σύνολο των εικόνων, που είναι ορατό (λ.χ. τηλεόραση του γείτονα, ο ήχος του ασανσέρ στο κλιμακοστάσιο της οικοδομής, ένα κρυμμένο πουλί κ.ο.κ.). Όλες αυτές οι αόρατες ηχητικές πηγές βοηθάνε στο σχεδιασμό και στη δημιουργία/κατασκευή ή και στον εμπλουτισμό κάποιων κινηματογραφικών ηχοτοπίων, που να είναι αρμονικά με τις εικόνες. Για την εύρεση αυτών των ηχητικών στοιχείων και την εφαρμογή τους στον ηχητικό σχεδιασμό, είναι απαραίτητη η παρατήρηση και η ανάλυση των ήχων που ακούμε, με τρόπους που είναι κοντά στις ασκήσεις που πρότεινε ο R. M. Schafer [8]. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε κάποιους ήχους των οποίων η σύνδεση είναι έμμεση με τις εικόνες και μπορεί να οδηγήσουν σε σύγχυση το κοινό. Πολλές φορές είναι απαραίτητο να δείξουμε την πηγή του ήχου, έστω μια φορά, ώστε στη συνέχεια να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον ήχο της, ακόμα κι όταν αυτή δεν είναι ορατή [9].

Με την έντονη παρατήρηση, μπορεί κανείς να συνειδητοποιεί, να προσδιορίζει και να συλλέγει -ανάμεσα σε άλλους- και το πλήθος των ήχων που δεν προέρχονται από ορατές πηγές στα περιβάλλοντα/τοπία. Σε δεύτερο επίπεδο εφαρμογής αυτών των ήχων σε μια ταινία, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή αναφορικά με τη χωροχρονική συνέπεια των χρησιμοποιούμενων ήχων (λ.χ. έντομα του Αμαζόνιου, σε δάσος της Β. Ευρώπης, τζιτζίκια το βράδυ κ.ο.κ.). Η κινηματογραφική απαίτηση για χωροχρονική συνέπεια των ήχων, αναφορικά με τον τόπο, την εποχή του χρόνου και τη χρονική περίοδο, ισχύει και σε άλλες κατηγορίες ήχων όπως: όπλα, μηχανοκίνητα οχήματα κ.ά., καθώς όλοι οι άνθρωποι μπορούν να αναγνωρίσουν ότι ο κινητήρας της βέσπα είναι δίχρονος και σίγουρα θα νιώσουν αταίριαστο τον τετράχρονο κινητήρα μιας άλλης μοτοσυκλέτας, ακόμα κι αν δεν υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού του λάθους.

Χωρίς να αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αναφέρεται η έντονη έρευνα, που πραγματοποιείται, με σκοπό τον εντοπισμό και ταυτοποίηση της τοποθεσίας του τοπίου, που απεικονίζεται πίσω από τη Mona Lisa. Κάποιοι επιστήμονες ισχυρίζονται ότι πρόκειται για ένα φανταστικό τοπίο, ενώ άλλοι θεωρούν ότι είναι κάποια υπαρκτή τοποθεσία. Ενδεικτικά αναφέρονται: αλπικό τοπίο, η κοιλάδα Valdarno του ποταμού Arno, το Montefeltro στην περιοχή Marche της Ιταλίας [10].

Η ιστορικός C. Glori ισχυρίζεται ότι η γέφυρα που απεικονίζεται στο τοπίο της Mona Lissa, βρίσκεται σε ένα χωριό στην Piacenza, στην Emilia-Romagna [11], [12]. Σε άλλη πρόσφατη έρευνα [13], οι Olivia Nesci, και Rosetta Borchia, κατά τη μελέτη των τοπίων του Piero della Francesca (1412-1492), κατέληξαν ότι το τοπίο βρίσκεται στη Β. Ιταλία, συγκεκριμένα το Montefeltro όπως φαίνεται από τα υψώματα της Valmarecchia. Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία είναι ο ισχυρισμός τους, ότι ο Ντα Βίντσι χρησιμοποιούσε μια τεχνική για την διαχείριση της προοπτικής και την απεικόνιση μιας πολύ μεγάλης περιοχής σε έναν μικρό χώρο, την οποία ονομάζουν συμπίεση.

Ορμώμενοι από την συνωνυμία, αλλά και με βάση την ουσία της συμπίεσης του ήχου σε παραλληλισμό με τη συμπίκνωση του απλωμένου τοπίου, μπορούμε να μιλήσουμε μέσα από τη Μόνα Λίσα για καθαρά τεχνικούς όρους, όπως η συμπίεση του ήχου (compression), όπου οι ασθενέστεροι σε στάθμη ήχοι, έρχονται στο επίπεδο αίσθησης των εντονότερων. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου πίνακα, πρόκειται για μια χωρική συμπίεση, όπου στοιχεία από διαφορετικές περιοχές, συντοποθετούνται, δημιουργώντας ένα νέο τοπίο. Αρκετά επιτυχημένη είναι κι η προσπάθεια εύρεσης αντιστοιχίσεων των τοπίων που απεικονίζονται σε ένα πορτρέτο και της χρήσης του ισοσταθμιστή, όπως διατυπώθηκε σε διαδικτυακό άρθρο [14], όπου παρουσιάζεται η έννοια του βάθους στα εικαστικά και στον ήχο, κι ενώ στη ζωγραφική σχετίζεται με τις λεπτομέρειες του φόντου, αντίστοιχα σχετίζεται με το συχνοτικό περιεχόμενο των ήχων, που θέλουμε να τοποθετήσουμε στο φόντο μίας ηχητικής ή και μουσικής σύνθεσης.

8. Νυχτερινή Περίπολος: λεπτομέρειες του ηχητικού σχεδιασμού

Η *Νυχτερινή Περίπολος* (1642) του Ρέμπραντ (1606-1669), αποτελεί ένα έργο πάνω στο οποίο μπορεί κανείς να αναλύσει τη γενικότερη χρήση του ήχου στον κινηματογράφο. Από τον πλήρη τίτλο του έργου, προκύπτουν ήδη πληροφορίες που σχετίζονται με τον πίνακα και το περιεχόμενό του: *Militia Company of District II under the Command of Captain Frans Banninck Cocq*. Το φως, η προοπτική και το χρώμα οδηγούν το βλέμμα στον συγκεκριμένο πίνακα και μπορεί κανείς να διατυπώσει απόψεις για ένα ηχητικό σύνολο που θα συμφωνεί με τις συγκεκριμένες κατευθύνσεις, αλλά και την πιθανότητα της κατασκευής ενός ηχητικού σύμπαντος που θα συνομιλεί με τις λεπτομέρειες που περιστοιχίζουν το κέντρο του ενδιαφέροντος. Από τους τρόπους που οι εκάστοτε ήχοι -όπως προκύπτουν από τις δράσεις- κατανέμονται στο χώρο, μπορούμε εύκολα να αναλύσουμε γενικά τον ήχο στο χώρο, καθώς θυμίζουν τις κινηματογραφικές απόπειρες για τη δημιουργία ενός πειστικού ηχητικού συνόλου μέσα στους χώρους που προβάλλουν (λ.χ. Gravity). Αυτό όμως που αποτελεί ένα σημείο τομής ανάμεσα στις συνθετικές διαδικασίες, οι οποίες αντιπαραβάλλονται στη συγκεκριμένη εργασία, είναι η *λεπτομέρεια* και η βαρύτητα που προσδίδεται σε αυτή στο συγκεκριμένο έργο. Στο ζωγραφικό πίνακα πρόκειται για στοιχεία, τα οποία πιθανότατα δεν θα προσέξει κανείς και τα οποία επίσης δεν έχουν τοποθετηθεί με αυτή τη σκοπιμότητα, αλλά λειτουργούν συμπληρωματικά στη δημιουργία του συνόλου που απεικονίζεται. Ακριβώς η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται και κατά τον ηχητικό σχεδιασμό, όπου υπάρχει πλήθος λεπτομερειών που δεν γίνονται καν ακουστές, αλλά φιλοδοξούν να αποτελέσουν πινελιές ενός συνολικού αριστουργήματος, ενός ολοκληρωμένου και επιτυχημένου οπτικοακουστικού έργου, με το οποίο και εναρμονίζονται.

9. Αποτελέσματα & Περεταίρω εργασία

Κατά την ακαδημαϊκή χρονιά 2017-18 χρησιμοποιήθηκε πολλαπλά η συγκεκριμένη μεθοδολογία σε κάποια μαθήματα της ενότητας Ήχος & Μουσική στον κινηματογράφο, στο Τμήμα Κινηματογράφου της Σ.Κ.Τ. του Α.Π.Θ., όπου υπήρχε θερμή υποδοχή από τους φοιτητές και φοιτήτριες.

Επιπρόσθετα ξεκίνησε διάλογος με συναδέλφους από Πανεπιστήμια της Μ. Βρετανίας, οι οποίοι πραγματοποιούν αντίστοιχες έρευνες και χρησιμοποιούν επίσης

τα εικαστικά ως εργαλείο για τη διδασκαλία της σύνθεσης του ήχου για τον κινηματογράφο, το ραδιόφωνο και γενικότερα όλες τις καλλιτεχνικές δραστηριότητες στις οποίες μπορεί και να υπεισέρχεται η έννοια της αφήγησης μέσω των ήχων.

Μεθοδολογικά, μπορεί να εφαρμοστεί και η αντίστροφη διαδικασία για την περαιτέρω ανάλυση και εμβάθυνση στις σχέσεις ανάμεσα στον ήχο και τα εικαστικά. Πιο συγκεκριμένα, είναι εφικτό, αφού καθοριστεί αρχικά το αντικείμενο ή η διαδικασία, την οποία επιθυμούμε να συσχετίσουμε και να παρουσιάσουμε, να αποδοθεί με τρόπο τέτοιο, ώστε η πράξη από το πεδίο του ήχου να μεταφέρεται στο πεδίο της εικόνας. Στη συνέχεια πρέπει να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να απεικονιστεί ή και να απεικονίζεται η εν λόγω διαδικασία [15], να αναζητηθεί και να εντοπιστεί σε έργα ή και σε εποχές, τρόπους, πιθανές εκδοχές σε πρώτο και δεύτερο επίπεδο (άμεση κι έμμεση προβολή) και στη συνέχεια να παρουσιαστούν οι παραλληλισμοί και τα κοινά σημεία τομής.

Λόγω του μεγάλου πλούτου των εικαστικών έργων, αλλά και της πολυποικιλίας των ηχητικών συνθέσεων, μπορεί κανείς να επεκτείνει, αλλά και να διευρύνει τη συγκεκριμένη έρευνα, λ.χ. παραλληλισμοί ανάμεσα στον ήχο και τα διάφορα ρεύματα/κινήματα της τέχνης (εξπρεσιονισμός, ιμπρεσιονισμός κλπ). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να ερευνηθούν σχέσεις του ηχητικού σχεδιασμού και με άλλες συνθετικές διαδικασίες, με στόχο πάντα την ακουστική εκπαίδευση.

Ένας συνοπτικός πίνακας αντιστοίχισης τεχνικών κι αισθητικών πτυχών του ηχητικού σχεδιασμού με λεπτομέρειες και γνωστά έργα της ζωγραφικής, είναι μια από τις προτεραιότητες, καθώς δείχνει να είναι μια βάση για μια συνοπτική και περιεκτική προσέγγιση του όλου εκπαιδευτικού εγχειρήματος.

10. Αναφορές

[1] Bernes R., «The Sound Coen Comedy: Music, Dialogue and Sound Effects in Raising Arizona», *The Soundtrach*, vol.1, No 1, 2007

[2] Sonnenschein D., *The Expressive Power of Music, Voice and Sound Effects in Cinema*, 2002

[3] Chion M., *Ο Ήχος στον Κινηματογράφο*, μετάφραση Μ. Κουτάλου, εκδ. Πατάκη, Αθήνα, 2010

[4] Underwood M., «“I wanted an electronic Silence...”, Musicality in Sound Design and the Influences of New Music on the Process of Sound Design for Film», *The Soundtrach*, vol.1, No 3, 2008

[5] Κίτσιου Ν., «Ερμηνεύοντας τις Αόρατες πόλεις, μια μεταφορά των ιστοριών του Ίταλο Καλβίνο σε ήχους», πτυχιακή εργασία, Τμ. Κιν/φου ΑΠΘ, Φεβρουάριος 2018

[6] Ατταλί Ζάκ, *Θόρυβοι*, εκδ. Ράππα, 1991

[7] Pat Jackson, «The Use and Manipulation of Atmospheres to project place, emotion and character», *School of Sound*, London 2009

[8] Schafer R.M., *A Sound Education, 100 Exercises in Listening and Sound-Making*, Arcana Editions, Ontario, Canada, 1992

[9] Randy Thom, «Designing a Movie for Sound», filmsound.org

[10] <http://www.italymagazine.com/italy/mona-lisa/location-mona-lisa-background-identified>

[11] Glori C. & Capello U., *Enigma Leonardo: decifrazioni e scoperte*, 2011

[12] <https://www.telegraph.co.uk/culture/art/art-news/8249386/Mona-Lisa-landscape-location-mystery-solved.html>

[13] Nesci O. & Borchia R., Codice P. ‘Atlante illustrato del reale paesaggio della Gioconda. Ediz. illustrata Copertina flessibile, 2012

[14] <https://howtoeq.wordpress.com/>

[15] Matthews T., Fong J., Mankoff J., «Visualizing Non-Speech Sounds for the Deaf», *Assets '05*, Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pg 52-59, Baltimore, MD, USA, October 09 - 12, 2005

Φιλμογραφία

There will be blood, 2007, Paul Thomas Anderson

Raising Arizona, 1987, Joel & Ethan Coen

Dunkirk, 2017, Christopher Nolan

Atonement, 2007, Joe Wright

Gravity, 2013, Alfonso Cuarón

Love Me Tonight, 1932, Reuben Mamoulian

Dancer in the Dark, 2000, Lars Von Trier

Ο ρόλος του ήχου και του χώρου σε σκηνές δράσης και μαχών μέσα από τρεις ταινίες Ευρωπαϊκού, Ιαπωνικού, Αμερικάνικου και Κινέζικου κινηματογράφου

Δήμητρα Σιδερίδου
Υπ. Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων
Α.Π.Θ. / Συνθέτρια
Σωκράτους 45, Θεσ/νικη
dsiderid@auth.gr

Αιμιλία Καραποστόλη
Διδ. Τμ. Αρχιτεκτόνων
Α.Π.Θ./ Φλαουτίστρια
Λευκωσίας 18, Θεσ/νικη
emiliearch@gmail.com

Νίκος Τσινίκας
Επίτιμος καθηγητής τμ.
Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
Πανεπιστημιούπολη,
Θεσ/νικη
tsinikas@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Η κινηματογραφική μουσική και γενικότερα ο ήχος, λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο από ταινία σε ταινία: σκιαγραφώντας το νόημα, ενισχύοντας τη διάθεση, οριοθετώντας τον θεατή σε σχέση με τη δράση και ούτω καθεξής. Αλλά με έναν προφανή τρόπο, ο κινηματογραφικός ήχος και χώρος όπου εξελίσσονται οι σκηνές δράσης και μαχών δεν είναι οι παρόμοιοι. Αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης έρευνας αποτελεί η σύγκριση τριών χαρακτηριστικών σκηνών δράσης και μάχης με λεπτομερειακή ανάλυση της μουσικής επένδυσης και των ηχητικών εφέ, από τις ταινίες: *Braveheart* (1995) - Αμερική, *Fightclub* (1999) - Αμερική και Γερμάνια, *Ran* (1985) - Ιαπωνία. Η ανάλυση της κάθε σκηνής επιτυγχάνεται δίνοντας βάρος στην εικαστική και χωρική της διάσταση. Οι παραπάνω παράμετροι μορφοποιούν τον χαρακτήρα, περιγραφικό ή ερμηνευτικό, της εκάστοτε σκηνής. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των επιλεγμένων σκηνών, ώστε να αναδειχθούν τα στοιχεία που καθορίζουν την ηχητική, ακουστική και χωρική της ταυτότητα.*

The role of sound and space in action scenes and battles through three European films, Japanese, American and Chinese film

ABSTRACT

*Cinematographic music and sound work in a similar way• they reinforce meaning, enhance mood and define viewer's perception regarding the plot. But in an obvious way, cinematic sound and space that evolve in scenes of action and battle are not the same. The presented research analyses three characteristic action and battle scenes using a detailed analysis of music score and sound effects: *Braveheart* (1995) - America, *Fightclub* (1999) - America and Germany, *Ran* (1985) - Japan. Analysis of each scene is achieved by highlighting its visual and spatial dimensions. These parameters determine the identity, descriptive or interpretive, of each scene. The aim of this paper is to determine the elements that define its sound, acoustic and spatial character.*

Εισαγωγή

Τα κύρια συστατικά του κινηματογράφου, ο οποίος αποτελεί ένα οπτικοακουστικό θέαμα, είναι ο λόγος, η εικόνα και ο ήχος. Κατά συνέπεια, η κινηματογραφική μουσική, αλλιώς μουσική επένδυση (film score), δεν μπορεί να απομονωθεί από το πλαίσιο το οποίο εξυπηρετεί και να αντιμετωπιστεί σαν να προορίζονταν αποκλειστικά για ακρόαση. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας δεν μας απασχολεί γενικά η σύνθεση μουσικής, αλλά η **σύνθεση μουσικής για κινούμενη εικόνα**. Η μουσική οφείλει να παίζει το ρόλο της ως ένα αναπόσπαστο κομμάτι του συνόλου που 'βιώνει' ο θεατής [1].

Οι ταινίες που διαδραματίζονται σε ένα κλειστό χώρο δημιουργούν την εντύπωση πως είναι μονοδιάστατες, ωστόσο συμβαίνει το ανάποδο. Ο θεατής προβάλλει τον εαυτό του στους ήρωες, βιώνοντας τις ψυχολογικές και συναισθηματικές αντιδράσεις τους. Το συγκεκριμένο είδος ταινιών αν και βασίζεται κυρίως στη σεναριακή δομή, υποστηρίζεται αρκετά από την μουσική, τα ηχητικά εφέ και την ακουστική. Σε αντίθεση, οι σκηνές επικών ταινιών σε μεγαλειώδεις τοποθεσίες και ανοιχτούς χώρους έχουν ως αποτέλεσμα μια ιδιαίτερη κινηματογραφική ποιότητα.

Η παρούσα εργασία είναι μία παρουσίαση κάποιων κομβικών σημείων της διπλωματικής εργασίας μίας εκ των τριών συγγραφέων, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών για την απόκτηση του διπλώματος Σύνθεσης, και παρουσιάστηκε τον Ιούνιο του 2018 στο Δημοτικό Ωδείο Καλαμαριάς, ως μέρος των διπλωματικών εξετάσεων.

1. Επιρροή της μουσικής, του ήχου και της χωρικής διάστασης των σκηνών στην αντίληψη του θεατή

Η μουσική είναι ο πιο αποτελεσματικός κώδικας για την κινηματογραφική έκφραση των συναισθημάτων [2]. Η οθόνη, από την άλλη, είναι ένα ισχυρό μέσο για την παρουσίαση του αντικειμένου, στο οποίο απευθύνεται το συναίσθημα [3]. Παρόμοια είναι και η θεωρία του Lack [4] που υποστηρίζει πως η μουσική εντείνει τις συναισθηματικές αντιδράσεις, πιο πετυχημένα από την ίδια η γλώσσα.

Η άποψη του Eisler [5] για τη μουσική είναι πως αυτή μπορεί να είναι εξίσου σημαντική με την εικόνα, ισοδύναμη δομικά, αλλά χωρίς να εξαρτάται από τους δικούς της «εσωτερικούς» περιορισμούς για το αποτέλεσμα της. Σύμφωνα με αυτή την άποψη, η μουσική οφείλει να είναι ευέλικτη, και να μην χρησιμοποιεί την επίδρασή της για αποκλειστικά μουσικούς σκοπούς, αλλά και για δομικούς [6].

Κάθε σκηνή καθορίζεται όσον αφορά την εικαστική και χωρική της διάσταση (περιγραφικός ή ερμηνευτικός χαρακτήρας) σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους: χώρος, ακουστική, σκηνογραφία, φωτισμός. Η μουσική, ο ήχος και ο χώρος που εκφράζει κάθε σκηνή μετασχηματίζουν την ταινία σε μια γνήσια συναισθηματική εμπειρία, επιβεβαιώνοντας την έκφραση του R. Tan, πως η ταινία είναι μία «μηχανή» που παράγει συναισθήματα.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μία προσπάθεια σκιαγράφησης της εμπειρίας του θεατή μέσα από τρία παραδείγματα σκηνών δράσης, σχολιάζοντας τα ηχητικά και χωρικά τους χαρακτηριστικά. Ο λόγος της επιλογής των σκηνών δράσης ως αντικείμενο μελέτης, είναι το γεγονός ότι εμπεριέχουν πολλές παραμέτρους που οφείλουν οι σκηνοθέτες να λαμβάνουν υπόψη στο πλαίσιο της εικόνας με τα υπόλοιπα τεχνικά μέσα. Έτσι υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία στην χρήση μουσικών

θεμάτων και εντονότερη συναισθηματική κλίμακα σε αντιστοιχία με την ροή του σεναρίου.

2. Αντικείμενα μελέτης και Μεθοδολογία

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας συνίσταται από τρεις σκηνές δράσης, ταινιών (Braveheart, Fightclub, Ran) που αντιπροσωπεύουν την Ευρωπαϊκή, Αμερικάνικη και Ιαπωνική κινηματογραφική βιομηχανία με σκοπό τον σχολιασμό τους όσον αφορά την μουσική επένδυση, τα ηχητικά εφέ και τις χωρικές τους ποιότητες. Ένα βασικό κριτήριο επιλογής των συγκεκριμένων σκηνών ήταν ο μεγάλος προϋπολογισμός της παραγωγής, ο οποίος έδινε επιπλέον ελευθερία στην μουσική τους επένδυση.

Στη συνέχεια της εργασίας, πραγματοποιείται η περιγραφή της εκάστοτε σκηνής δράσης και η λεπτομερειακή ανάλυση της μουσικής της επένδυσης και των ηχητικών της εφέ όσον αφορά την διάρκεια, την ενορχήστρωση, το ποσοστό κάλυψης, την ένταση-μίξη, αλλά και την μουσικολογική της πλευρά (ρυθμός, δυναμικές και ταχύτητα). Επιπλέον, επιτυγχάνεται η ανάλυση της εικαστικής και χωρικής της διάστασης (χώρος, ακουστική, σύνθεση όγκων, προοπτική, φωτισμός).

2.1 Braveheart

Έτος και χώρα παραγωγής: 1995, Αμερική

Σκηνοθέτης: Mel Gibson

Προϋπολογισμός: \$72 εκατομμύρια

Ακαθόριστα έσοδα: \$210,409,945

Επιλεγμένη Σκηνή: 1:25:43 – 1:28:48 (frames)

Ενορχήστρωση: Γκάιντα, πνευστά, σώμα εγχόρδων, χορωδία

Συνθέτης: James Horner

Ποσοστό κάλυψης: 100%

Ένταση-μίξη: Επικρατεί η μουσική, καθόλου ομιλία, μόνο προστάγματα του πρωταγωνιστή

Μουσικές ποιότητες: γρήγορος ρυθμός, χωρίς εναλλαγές στην ενορχήστρωση, κορύφωση μέσω δυναμικών και μικρό accelerando

Χωρική διάσταση: πολύ μεγάλη έκταση, εξωτερικός χώρος, εκατοντάδες ηθοποιοί ή κομπάρσοι, κανένα κτίριο, πλαγιά λόφου, φωτισμός ημέρας

2.2 Fightclub

Έτος και χώρα παραγωγής: 1999, Αμερική & Γερμανία

Σκηνοθέτης: David Fincher

Προϋπολογισμός: \$63 εκατομμύρια

Ακαθόριστα έσοδα: \$37 εκατομμύρια

Επιλεγμένη Σκηνή: 00:34:56 – 00:35:46 (frames)

Ενορχήστρωση: ρυθμικό bass beat, ηλεκτρονική μουσική, συγχορδίες στο πιάνο

Track: Who is Tyler Durden?

Καλλιτέχνης: The Dust Brothers

Ποσοστό κάλυψης: 100%

Ένταση-μίξη: fade in, κυριαρχεί στην αρχή η ομιλία και μετά η μουσική

Μουσικές ποιότητες: 70bpm, χωρίς εναλλαγές στην ενορχήστρωση, χωρίς κορύφωση

Χωρική διάσταση: αστικό περιβάλλον, μικρός και έρημος δρόμος, εξωτερικός χώρος, 2 ηθοποιοί, βράδυ, φώτα δρόμου

2.3 *Ran*

Έτος και χώρα παραγωγής: 1985, Ιαπωνία, Γαλλία

Σκηνοθέτης: Akira Kurosawa

Προϋπολογισμός: \$11 εκατομμύρια

Ακαθόριστα έσοδα: \$12 εκατομμύρια

Επιλεγμένη Σκηνή: 01:30:24 – 01:37:10 (frames)

Ενορχήστρωση: σόλο όμποε, πνευστά, σώμα εγχόρδων

Συνθέτης: Toru Takemitsu

Ποσοστό κάλυψης: 100%

Ένταση-μίξη: αποκλειστικά μουσική

Μουσικές ποιότητες: adagio, minimal

Χωρική διάσταση: μικρός οικισμός, εξωτερικός χώρος, ομίχλη, όχι έντονος φωτισμός, μικρή χρωματολογική παλέτα

3. Ανάλυση-Σχολιασμός

3.1 *Braveheart*

Η επιλεγμένη σκηνή μάχης διαδραματίζεται στην μεσαιωνική Σκωτία και περιγράφει μια σύρραξη ανάμεσα στον στρατό του Εδουάρδου Α' (Αγγλοι) και τους Σκωτσέζους που μάχονται για την ανεξαρτησία τους, με αρχηγό τον πρωταγωνιστή της ταινίας, Γουάλας. Η γραμμή του σκηνοθέτη στοχεύει στην ταύτιση του θεατή με το αριθμητικά ασθενέστερο σώμα των Σκωτσέζων μαχόμενων. Τη στιγμή που το πεζικό του Εδουάρδου Α' ξεκινάει την επίθεση, αρχίζει να γίνεται αισθητή και η μουσική σύνθεση που επενδύει την σκηνή.

Η επιλογή της γκάιντα (παραδοσιακό μουσικό όργανο της Σκωτίας) προσδίδει μία συγκινησιακή χροιά που κάνει διακριτό τον πατριωτισμό της ασθενέστερης ομάδας αλλά και την τραγικότητα της, αφού γνωρίζουμε από την ιστορία την έκβαση της μάχης. Η αύξηση των δυναμικών από το σώμα εγχόρδων που συνοδεύουν την γκάιντα, κάνουν εντονότερη την αγωνία, καθώς ο σκωτσέζικος στρατός περιμένει τα προστάγματα του Γουάλας που τελικά θα κάνουν την ανατροπή. Την στιγμή της σύγκρουσης, στη μουσική παρτιτούρα κυριαρχούν οι παύσεις με αποτέλεσμα να ακούγονται μόνο οι φυσικοί ήχοι της μάχης. Στην περίπτωση αυτή γίνεται έκδηλος ο στόχος της μουσικής να **επηρέασει τον θεατή**, καθώς ταυτίζεται με τον πρωταγωνιστή και την ασθενέστερη αριθμητικά ομάδα. Με τη χρήση της γκάιντας

δημιουργούνται έντονα αισθήματα, ενώ η αύξηση των δυναμικών εντείνει την αναμονή της σύγκρουσης.

3.2 *Fightclub*

Το εξεταζόμενο κινηματογραφικό απόσπασμα εξιστορεί τη στιγμή που ο Durden (χαρακτήρας της ταινίας) παρακινεί τον πρωταγωνιστή να τον χτυπήσει στο πρόσωπο, όπως και τελικά κάνει. Η σκηνή δείχνει την πάλη μεταξύ τους και την έκπληκτη ικανοποίηση του πρωταγωνιστή. Η μουσική εισάγεται σταδιακά, ρυθμικά, με έναν ηλεκτρονικό μπάσο ήχο που παραπέμπει σε χτύπημα καρδιάς και, με την τεχνική «fade in», συνοδεύει την κινηματογραφική δράση. Το αργό τέμπο δεν προσπαθεί να αποδώσει αγωνία για την έκβαση της πάλης, αλλά παρακινεί τον θεατή να βιώσει μέσα από τον ρυθμό μία αλλαγή κατάστασης, μία συνθήκη απολαυστική, έναν χορό.

Το ενδιαφέρον στοιχείο στη συγκεκριμένη σκηνή, είναι πως ο σκηνοθέτης επιλέγει μια μουσική σύνθεση που μπορεί κανείς να ακούσει σε έναν μικρό δρόμο της πόλης, προερχόμενη από κάποιο club ή από κάποιο αυτοκίνητο. Εισάγοντας ένα «urban rhythm» στοιχείο στην μουσική επένδυση **εμπλουτίζει αισθητικά**, αλλά και **αναβαθμίζει επικοινωνιακά την ταινία**. Πρόκειται για μία σκηνή δράσης με τέλειο συγχρονισμό, αφαιρώντας το στοιχείο της αγωνίας για την έκβαση της, συνεπώς δεν υπάρχει κορύφωση. Όλος αυτός ο χειρισμός πλαισιώνει την δημιουργία μιας ομαλής μετάβασης στην λύση του σεναρίου, δηλαδή στην αποκάλυψη ότι οι δύο αυτοί χαρακτήρες αποτελούν εκφάνσεις του ίδιου προσώπου.

3.3 *Ran*

Η εξεταζόμενη σκηνή θεωρείται από τις χαρακτηριστικότερες του Ιάπωνα σκηνοθέτη Akira Kurosawa.. Την μουσική της επένδυση, επηρεασμένη εμφανώς από τον Gustav Mahler την υπογράφει ο Toru Takemitsu. Στην συγκεκριμένη σκηνή η οποία εξιστορεί την μάχη στο τρίτο κάστρο, ακούγεται αποκλειστικά μουσική, χωρίς κανέναν ήχο περιβάλλοντος.

Η μινιμαλιστική μουσική σύνθεση και ενορχήστρωση αποδίδει άρτια την εκτυλισσόμενη τραγωδία. Το τρίτο κάστρο, πολιορκείται και όχι αναίμακτα. Ο Takemitsu υποστηρίζει τη σκηνή μουσικά μέσα από την ζοφερή παρουσία της ορχήστρας. Τα γεγονότα εκτυλίσσονται, με μία θρηνώδη μουσική υπόκρουση. Τα βιολιά, το όμποε και το shingobue φλάουτο επικρατούν προσδίδοντας τραγικότητα και επαναλαμβάνοντας μουσικά θέματα. Είναι η σκηνή με την μεγαλύτερη διάρκεια μουσικής σε όλη την ταινία.

Παρατηρείται έλλειψη κορύφωσης, γρήγορων ρυθμικών εναλλαγών, αποφεύγοντας την δημιουργία αγωνίας του θεατή. Η μουσική υπόκρουση λειτουργεί αφηγηματικά και άχρονα σε σχέση με τα κινηματογραφικά γεγονότα. Δεν υπάρχει συντονισμός, μόνο μία συνοδεία ενός λυρικού μοτίβου. Θα μπορούσαμε να πούμε πως υποβόσκει μια αίσθηση ματαιότητας για τις καταστροφικές συνέπειες μιας μάχης, καθιστώντας τους θεατές ως τους παρατηρητές που βιώνουν το πέρασμα του χρόνου μέσα από τις κρατημένες νότες και τα πένθιμα μουσικά μοτίβα.

4. Συμπεράσματα

Στις παραπάνω σκηνές παρατηρήθηκε ότι η μουσική επένδυση επηρεάζει έντονα τον θεατή, επικοινωνώντας συγχρόνως την κινηματογραφική πλοκή. Στην ταινία *Braveheart* η μουσική υπόκρουση συγκινεί, στην ταινία *Fightclub* το ρυθμικό ηλεκτρονικό μοτίβο συγχρονίζει και στην ταινία *Ran*, το μουσικό περιβάλλον παραγκωνίζει οποιαδήποτε άλλη ηχητική πληροφορία που έχει σχέση με την εικόνα, ενισχύοντας την δραματικότητα αλλά και την λυρικότητα της μάχης. Ο μίνιμαλ και *adagio* χαρακτήρας της μουσικής σύνθεσης έρχεται σε αντίθεση με τις βίαιες εικόνες της πολιορκίας του κάστρου δημιουργώντας μια ατμόσφαιρα σχεδόν ονειρική. Σημειώθηκε επίσης πως στις σκηνές που διαδραματίζονται σε μεγάλους χώρους, χρησιμοποιήθηκε πλήρης ορχήστρα και υπήρχε απώλεια της ακουστικής του χώρου, ενώ στη σκηνή του *Fightclub*, όπου ο χώρος ήταν μικρός, υπήρξε έντονος ρυθμός και έντονο το στοιχείο της αστικότητας.

Συμπερασματικά, επαληθεύεται η θέση πως οι σκηνές δράσης δεν έχουν κάποια ενιαία γραμμή αντιμετώπισης της μουσικής παρτιτούρας, αντιθέτως, μπορούν να συσχετιστούν με μεγάλη ποικιλία σεναρίων και συλλογιστικής πορείας που είναι ίσως η κατηγορία σκηνών με την πολυπλοκότερη διαχείριση οπτικοακουστικών μέσων, αλλά και το πιο πρόσφορο έδαφος για πειραματισμό και εναλλαγές σκηνοθετικών τεχνικών.

5. Αναφορές

[1] Stuart Fischhoff «The Evolution of Music in Film and its Psychological Impact on Audiences Why Is There Music in Film», (2005)

[2] Annabel J. Cohen «Film Music and the Unfolding Narrative», 2010

[3] Mervyn Cook «Hollywood's Golden Age: Narrative In cinema and the classical film score.» In *A History of Film Music* Cambridge: Cambridge University Press. Pp. 67-130 (2008)

[4] Balkwill L.-L., Thompson W. F. «A Cross-Cultural Investigation of the Perception of Emotion in Music: Psychophysical and Cultural Cues.» Toronto, ON: York University, (1999).

[5] Daniel Levitin. «This is Your Brain on Music: The Science of a Human Obsession.» New York, NY: Penguin Group Inc., (2006)

[6] Konecni, V. «The influence of affect on music choice.» In *P.N. Juslin και J.A.Sloboda ,Handbook of Music and Emotion* p.p.697-724. New York: Oxford University Press. 2010

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3: Έλεγχος Θορύβου και Δονήσεων

Μελέτη και κατασκευή συστήματος εξαγωγής καυσαερίων κινητήρα αγωνιστικού οχήματος για τη μείωση του θορύβου

Δημήτρης
Καββαδίας
Φοιτητής
kavvadias@auth.gr

Χρήστος
Σεβαστιάδης
Δρ. Ηλ/Μηχ
csevast@auth.gr

Μάριος
Γιουβανάκης
Υπ. Διδάκτορας
mgiouvan@auth.gr

Γεώργιος
Παπανικολάου
Καθηγητής
pap@eng.auth.gr

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία περιγράφεται η μελέτη, κατασκευή και μέτρηση της στάθμης θορύβου του συστήματος των καυσαερίων ενός αγωνιστικού μονοθέσιου οχήματος προκειμένου να λάβει μέρος σε διεθνή φοιτητικό διαγωνισμό Formula SAE.

Επίσης γίνεται παρουσίαση των διαφορετικών συντονιστών που μοντελοποιήθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου των πινάκων μεταφοράς (Transfer Matrix Method), η οποία εφαρμόστηκε σε λογισμικό αριθμητικής υπολογιστικής (MATLAB) και σε ειδικά αναπτυγμένο λογισμικό για τη σχεδιομελέτη κινητήρων εσωτερικής καύσης (WaveBuild).

Αναλύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν οι κατάλληλοι συντονιστές προκειμένου να μετρηθεί ο θόρυβος σε πραγματικές συνθήκες και να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητά τους. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η απώλεια παρεμβολής (Insertion Loss).

Construction and study of the exhaust system of a race vehicle for noise reduction

ABSTRACT

This is a study of the construction and noise limit calculations of the exhaust system of a racing vehicle. The vehicle complies with the standards of the Formula SAE international student design competition in which it took part.

The modelling of different types of resonators is done by the transfer matrix method both in Matlab and in specialized internal combustion engine software, WaveBuild.

Based on the modelling results resonators were constructed and tested by measuring the noise level in real life conditions. The measurement was the insertion loss, based on which the effectiveness of each resonator was deduced.

Εισαγωγή

Από την ομάδα φοιτητών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Aristotle Racing Team (ART) μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ένα εσωτερικής καύσης αγωνιστικό μονοθέσιο όχημα προκειμένου να λάβει μέρος στους ετήσιους φοιτητικούς διαγωνισμούς της Formula SAE. Η προετοιμασία της νέας ομάδας για τη συμμετοχή της στους αγώνες διαρκεί περίπου 8 μήνες. Ο διαγωνισμός αποτελείται από τα στατικά (κοστολόγηση, επιχειρηματικό πλάνο, παρουσίαση των σχεδίων) και τα δυναμικά (επιτάχυνση, πλαγιολίσθηση, autocross, το αγώνισμα της αντοχής, οικονομία καυσίμου) αγωνίσματα.

Από τους κανονισμούς του διαγωνισμού έχουν τεθεί όρια για τη στάθμη θορύβου του οχήματος. Η μέτρηση της στάθμης θορύβου γίνεται σε δύο καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα, στην κατάσταση αδράνειας (ρελαντί) και στις υψηλές στροφές, πιο συγκεκριμένα στις 11.000 rpm. Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 5130 [5], το οποίο ορίζει τις συνθήκες μέτρησης για τα αυτοκίνητα παραγωγής. Ένα μικρόφωνο τοποθετείται στο ίδιο επίπεδο με τον τελικό αγωγό του συστήματος εξαγωγής των καυσαερίων, σε γωνία 45° από τον κάθετο άξονα και σε απόσταση 0,5 m. Ο νέος κανονισμός διατήρησε ίδια τα όρια της στάθμης του θορύβου στα 103 dBC σε κατάσταση αδράνειας του κινητήρα και στα 110 dBC στις υψηλές στροφές όμως επέβαλλε την εφαρμογή του φίλτρου C έναντι του φίλτρου A.

Η αλλαγή αυτή είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη για αύξηση της ηχομείωσης στις χαμηλές περιοχές συχνότητας. Προκειμένου να επιτευχθούν τα όρια στάθμης θορύβου αναλύθηκαν, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί κατασιγαστήρων και συντονιστών.

1. Κατασιγαστήρες και συντονιστές ηχοαπορρόφησης

Για την αύξηση της ηχομείωσης στις χαμηλές συχνότητες έγιναν αναλύσεις σε διατάξεις κατασίγησης του θορύβου με τους παρακάτω συντονιστές: συντονιστής Helmholtz, θαλάμου εκτόνωσης με σωλήνες εισόδου και εξόδου (Expansion Chamber with Inlet and Outlet Tubes), πλευρικών αγωγών ενός τετάρτου μήκους κύματος (Quarter Wave), ομόκεντρων συντονιστών (Concentric Resonators).

1.1 Συντονιστής Helmholtz

Αποτελεί την κύρια μορφή συντονιστή καθώς γίνεται αναγωγή των υπολοίπων συντονιστών και κατασιγαστήρων σε συντονιστή Helmholtz προκειμένου να απλοποιηθεί η μελέτη τους. Το ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο στο οποίο γίνεται πλήρης αντιστοίχιση των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών με φυσικά μεγέθη είναι το ενός βαθμού ελευθερίας σύστημα μάζας ελατηρίου. Το μηχανικό ελατήριο αντιστοιχεί στην κοιλότητα (cavity) του συντονιστή ενώ η μάζα στον αγωγό που συνδέει την κοιλότητα με τον κεντρικό αγωγό (λαιμός, neck).

Ο υπολογισμός της κρίσιμης συχνότητας συντονισμού μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή είτε του απλού τύπου [1] είτε της μεθόδου των πινάκων μεταφοράς (Transfer Matrix Method) [2]. Από την ανάλυση προκύπτει το τελικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η μείωση του θορύβου σε όλο το συχνотικό φάσμα.

1.2 Αγωγός ενός τετάρτου μήκους κύματος, *Quarter Wave*

Ο συντονισμός του συντονιστή ενός τετάρτου μήκους κύματος, όπως δηλώνεται από το όνομά του, επιτυγχάνεται σε μήκος κύματος $\lambda/4$. Η αρχή λειτουργίας του είναι ίδια με του συντονιστή Helmholtz με τη μόνη διαφορά ότι αποτελείται μόνο από το λαιμό (neck) και ο όγκος της κοιλότητας (cavity) είναι μηδενικός [3]. Ομοίως οι υπολογισμοί υλοποιούνται όπως στο συντονιστή Helmholtz με τη μέθοδο των πινάκων μεταφοράς.

1.3 Θάλαμος εκτόνωσης με σωλήνες εισόδου και εξόδου

Ο θάλαμος εκτόνωσης (Expansion Chamber) στη γενική του μορφή περιέχει εσωτερικούς αγωγούς εισόδου και εξόδου των καυσαερίων. Στην απλή του μορφή στην οποία δεν περιέχει σωλήνες εισόδου και εξόδου ο υπολογισμός για τη μείωση του θορύβου μπορεί να γίνει με τη χρήση του παρακάτω τύπου:

$$TL = 10 * \log \left[1 + 0,25 * \left(N - \frac{1}{N} \right)^2 * \sin^2 kL \right] \quad (2.3.1)$$

Όπου $N = D_{εξ}/D_{εσ}$ και L το μήκος του θαλάμου.

Για την πιο σύνθετη μορφή του οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τη μέθοδο των πινάκων μεταφοράς [2].

1.4 Ομόκεντρος Συντονιστής ηχοαπορρόφησης

Βιβλιογραφικά οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με τη χρήση των πινάκων μεταφοράς [2]. Επίσης όπως κάθε άλλος συντονιστής υπάρχει πλήρης συσχέτισή του με το ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο καθώς οι εσωτερικοί αγωγοί αντιστοιχούν στη μάζα και η εσωτερική κοιλότητα στο ελατήριο. Η μορφή του επιτρέπει τη χρήση απορρόφησης στο εσωτερικό του προκειμένου να αυξηθεί το φάσμα του συντονισμού, αποδίδοντας περισσότερη ηχομείωση στις χαμηλές συχνότητες.

1.5 Κατασιγαστήρες

Οι κατασιγαστήρες κατηγοριοποιούνται σε ελεύθερης ροής, που με βάση την εσωτερική τους διαμόρφωση περιορίζουν την ροή των καυσαερίων του κινητήρα, και σε μη ελεύθερης ροής, οι οποίοι δεν εμποδίζουν τη ροή των καυσαερίων. Η χρήση των μη ελεύθερης ροής δεν ενδείκνυται για αγωνιστικό μονοθέσιο, λόγω της μεγάλης αντίθλιψης των καυσαερίων συγκριτικά με τους μη ελεύθερης ροής κατασιγαστήρες.

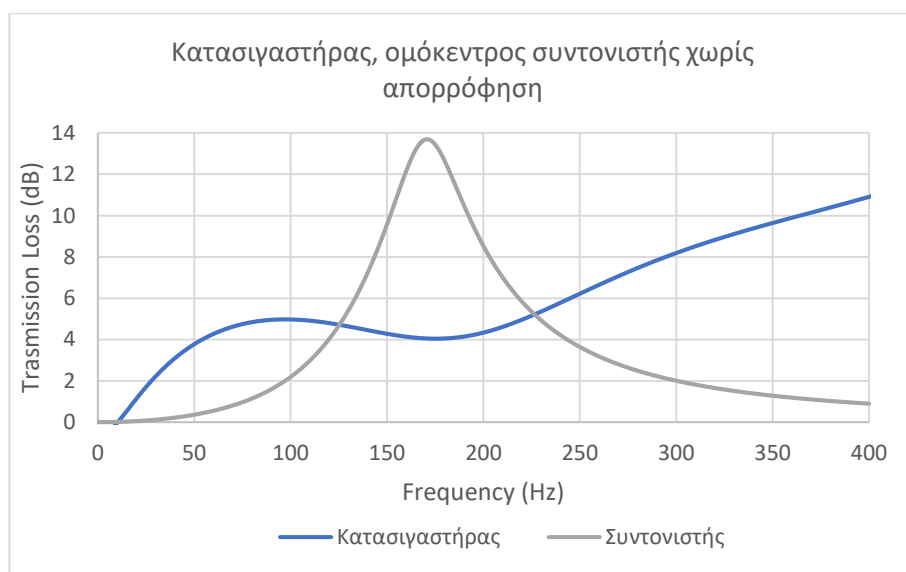
Καθώς η συσχέτιση με το ισοδύναμο μηχανικό μοντέλο γίνεται μέσω του συντονιστή Helmholtz, οι μικρές οπές αντιστοιχούν στον αγωγό (λαιμό), ενώ ο όγκος του κατασιγαστήρα αντιστοιχεί στην κοιλότητα του συντονιστή. Στην περίπτωση χρήσης απορρόφησης η κοιλότητα του συντονιστή εμπλουτίζεται με ηχοαπορροφητικό υλικό [1].

2. Εφαρμογή

Στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί οι ομόκεντροι κατασιγαστήρες χωρίς τη χρήση απορροφητικού υλικού [4] και με εσωτερική απορρόφηση [1].

Στην παρούσα εργασία για την ανάλυση με τη μέθοδο των πινάκων μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το γενικό λογισμικό αριθμητικής υπολογιστικής (MATLAB) [1][2][3][4]. Για μεγαλύτερη ακρίβεια και επαλήθευση της υλοποίησης της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης WaveBuild [6] με το οποίο αναλύεται η απόδοση και η ακουστική μηχανών εσωτερικής κάυσης σε συνδυασμό με συστήματα απαγωγής των καυσαερίων τους. Το τελευταίο λογισμικό εφαρμόζει και πάλι τη μέθοδο των πινάκων μεταφοράς με τη διαφορά της επιπλέον διακριτοποίησης των επιμέρους τμημάτων του συστήματος εξαγωγής των καυσαερίων.

Από τα αποτελέσματα που παρήγαγε η ανάλυση έγινε σαφής η ανάγκη χρήσης απορροφητικού υλικού στον κατασιγαστήρα. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη απώλεια μετάδοσης του ήχου σε συνάρτηση με τη συχνότητα του κατασιγαστήρα με απορροφητικό υλικό, από το οποίο εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο κατασιγαστήρας με απορροφητικό υλικό δεν παρέχει επαρκή ηχομείωση στις συχνότητες 130 - 220 Hz. Σε συχνότητες μεγαλύτερες των 220 Hz η απώλεια μετάδοσης του ήχου συνεχώς αυξάνεται. Με κριτήριο το φάσμα αυτό προσδιορίστηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συντονιστή προκειμένου να καθοριστεί η λειτουργία του στην παραπάνω συχνοτική περιοχή.



Σχήμα -4 Ηχοαπορρόφηση του κατασιγαστήρα με απορρόφηση

Από τις προσομοιώσεις με τη χρήση των παραπάνω λογισμικών φάνηκε ότι για να αποδώσουν οι συντονιστές στις επιθυμητές χαμηλές συχνότητες απαιτούνταν διαστάσεις που υπερέβαιναν τους κατασκευαστικούς περιορισμούς για τη τοποθέτησή τους σε ένα αγωνιστικό μονοθέσιο. Πιο συγκεκριμένα η χρήση του

συντονιστή αγωγού μήκους κύματος ενός τετάρτου και του θαλάμου εκτόνωσης απαιτούσαν μήκος, περί το ένα μέτρο. Ο συντονιστής Helmholtz απαιτούσε μικρότερο χώρο, αλλά λόγω χωροταξικών περιορισμών έπρεπε να τοποθετηθεί πάνω από τον κατασιγαστήρα, γεγονός που έθετε απαγορευτικούς περιορισμούς για την αποτελεσματική ψύξη του κινητήρα. Ο ομόκεντρος συντονιστής (Concentric Resonator) απαιτούσε συγκριτικά το λιγότερο χώρο και κατά συνέπεια πρόσθετε το λιγότερο βάρος στο αγωνιστικό μονοθέσιο. Επιπλέον, κρίθηκε αναγκαία η χρήση απορροφητικού υλικού στο συντονιστή, καθώς ο συντονισμός στις χαμηλές συχνότητες παρουσίαζε μικρό συχνοτικό εύρος. Η χρήση του απορροφητικού υλικού μείωσε τη μέγιστη ηχοαπορρόφηση άλλα διεύρυνε το συχνοτικό εύρος της.

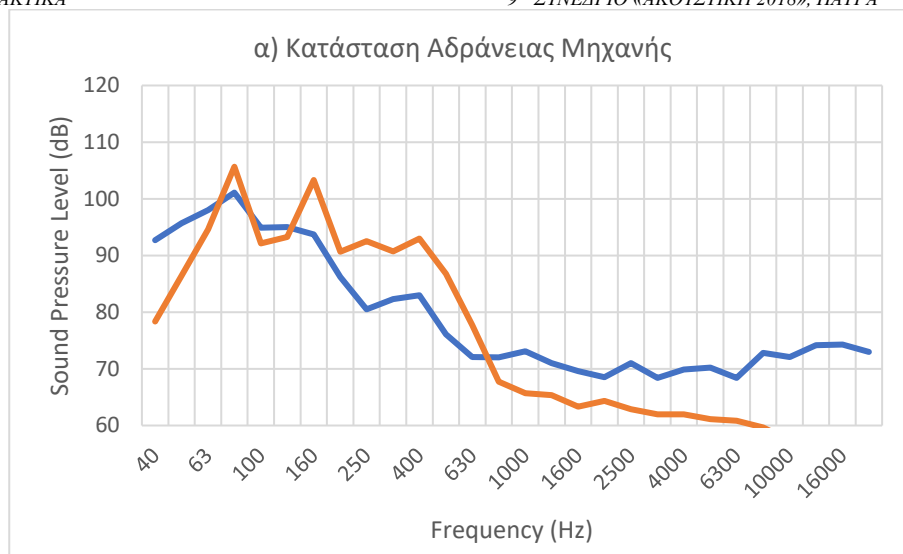
Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη ορθών αποτελεσμάτων υπήρξε ο υπολογισμός ή μέτρηση των αρχικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα μέσω του μοντέλου κινητήρα υπολογίστηκαν τα παρακάτω θερμοδυναμικά μεγέθη των καυσαερίων: πυκνότητα, ταχύτητα, αριθμός Mach, πίεση, ιξώδες και θερμοκρασία. Επίσης προς επαλήθευση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων με τη χρήση ειδικού αισθητήρα. Τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζουν άμεσα το σημείο συντονισμού στα διαφορετικά συστήματα κατασίγασης θορύβου.

3 Αποτελέσματα

Προκειμένου να μετρηθούν σε πραγματικές συνθήκες κατά τα πρότυπα, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν οι συντονιστές Helmholtz και ο ομόκεντρος συντονιστής (Concentric Resonator) σε διάφορες μορφές, με ή χωρίς εσωτερικούς αγωγούς, με ή χωρίς απορρόφηση και με διαφορετικό όγκο (κοιλότητα). Ο ομόκεντρος συντονιστής πληροί όλες τις προϋποθέσεις, δηλαδή τη μείωση της στάθμης θορύβου, τη μείωση βάρους του συστήματος εξαγωγής των καυσαερίων και καταλαμβάνει χώρο ικανό για την τοποθέτησή του σε ένα αγωνιστικό μονοθέσιο.

Το νέο σύστημα κατασίγασης των καυσαερίων αποτελείται από τον ομόκεντρο συντονιστή μήκους 100 mm και τον κατασιγαστήρα μήκος 400 mm και το σύστημα έχει εσωτερική διάμετρο 140 mm. Αντιθέτως, το παλιό σύστημα αποτελείται μόνο από τον κατασιγαστήρα εσωτερικής διαμέτρου 165 mm και μήκους 500 mm. Η αύξηση του θορύβου στις υψηλές στροφές οφείλεται κυρίως στη μείωση των διαστάσεων του κατασιγαστήρα.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι φασματικές αναλύσεις του συντονιστή - κατασιγαστήρα οι οποίες προέκυψαν από τις μετρήσεις θορύβου σε κατάσταση αδράνειας της μηχανής και στις υψηλές στροφές (11.000 rpm).



Σχήμα 4-5 Τριτοκταβική ανάλυση σε κατάσταση αδράνειας

Πιο συγκεκριμένα συγκριτικά με το προηγούμενο κατασιγαστήρα που χρησιμοποιούσε το αγωνιστικό μονοθέσιο επιτεύχθηκε μείωση της στάθμης θορύβου από τα 108,6 dBC στα 104,8 dBC σε κατάσταση αδράνειας του κινητήρα και από τα 113,8 dBC στα 113,6 dBC στις υψηλές στροφές. Το βάρος του συστήματος κατασίγασης των καυσαερίων μειώθηκε κατά 0,6 kg, ενώ η αντίθλιψη των καυσαερίων μειώθηκε κατά 19%.

4 Σχολιασμός

Αρχικά το λογισμικό WaveBuild παρέχει περισσότερες λειτουργίες και ρυθμίσεις που βοηθούν να εξαχθούν σαφέστερα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον τύπο καυσίμου του κινητήρα ώστε το λογισμικό να υπολογίσει την πυκνότητα των καυσαερίων. Επιπλέον παρείχε περαιτέρω δεδομένα όπως η ταχύτητα των καυσαερίων και το ιξώδες τους, για τη μέτρηση των οποίων απαιτούνταν ειδικός εξοπλισμός.

Επιπροσθέτως, παρατηρώντας τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι στις υψηλές στροφές του κινητήρα δεν υπάρχει αισθητή μείωση της στάθμης θορύβου. Ο συντονιστής σχεδιάστηκε και μελετήθηκε προκειμένου να είναι αποτελεσματικός στη κατάσταση αδράνειας της μηχανής, επομένως στις υψηλές στροφές δεν επιτεύχθηκε περαιτέρω μείωση της στάθμης θορύβου.

Για περαιτέρω μελέτη προτείνεται η μοντελοποίηση διαφορετικών συντονιστών ή/και χρήση των ήδη διαθέσιμων προκειμένου να τηρούνται τα όρια στάθμης θορύβου που τίθενται από το διαγωνισμό. Η συνέχιση της παρούσας εργασίας θα γίνει σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

5 Αναφορές

[1] M.O. Iljae Lee «Acoustic Characteristics of perforated dissipative and hybrid silencers», PhD dissertation, Ohio State University (2005).

[2] M.A. Leo Beranek, «Noise and vibration control engineering: principles and applications» *John Wiley & Sons Inc.*, New Jersey (2006).

[3] M.O. P. K. Tang and W. A. Sirignano, "Theory of a generalized Helmholtz resonator," *Journal of Sound and Vibration*, **26**, pp 247-262 (1973).

[4] M.O. Joseph, W. Sullivan and Malcolm J. Crocker, "Analysis of concentric-tube resonators having unpartitioned cavities", *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, pp. 207-215 (1978).

[5] M.O. International Standard ISO/FDIS 5130, "Acoustics - Measurements of sound pressure level emitted by stationary road vehicles".

[6] M.O. Ricardo Software, "Wave User Manual", Version 2016.2, pp 557-594 (2016).

Φωνονικός απορροφητής κραδασμών διάταξης επάλληλων επιπέδων

Αριάδνη Κωνσταντοπούλου¹, Νικόλαος Αραβαντινός-Ζαφείρης², Μιχαήλ Σιγάλας¹

¹Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504,

e-mail: sigalas@upatras.gr, e-mail: ariadk@upatras.gr

²Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό

Ίδρυμα Ιονίων Νήσων, Αηζούρι 28200, e-mail: nikosaravadinis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται αριθμητικά μία δομή που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως απορροφητής κραδασμών. Η δομή λόγω των περιοδικών της χαρακτηριστικών θα μπορούσε να θεωρηθεί ως Φωνονικό Υλικό και η μελέτη της δείχνει πως μπορεί να αποτελέσει βάση για αξιοποίησή της στο συγκεκριμένο πεδίο. Τα φωνονικά χάσματα που υπολογίστηκαν στην εγκάρσια διεύθυνση είναι ιδιαίτερος μεγάλα και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου.

Phononic vibration absorber on a parallel level set-up

ABSTRACT

In this work, a structure that could act as a vibration absorber is being numerically studied. The structure due to its periodic characteristics could be considered as a Phononic Material and its study shows that, it can be a basis for its exploitation in this field. The calculated phononic band gaps along the transverse direction were very wide and cover a broad range of frequencies. The numerical method used was that of the finite differences in the time domain.

Εισαγωγή

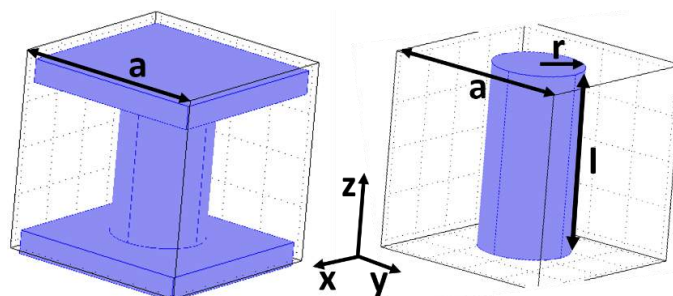
Εδώ και αρκετά χρόνια υπάρχει η αυξανόμενη απαίτηση για μείωση του θορύβου και γενικότερα των μηχανικών δονήσεων. Η μείωση αυτή είναι επιθυμητή τόσο σε σταθερές κατασκευές όπως διαφόρων χρήσεων κτίρια (σπίτια, νοσοκομεία, δημόσια ιδρύματα), όσο και σε ανοιχτούς χώρους όπως τα πάρκα και οι σταθμοί διαφόρων μέσων μαζικής μεταφοράς. Η προσπάθεια για μείωση θορύβου και γενικότερα μηχανικών δονήσεων αφενός συνδέεται άμεσα με την λειτουργικότητα χώρων (όπως μια ιδιωτική κατοικία ή ένα δημόσιο κτίριο) αφετέρου με την βελτίωση της ποιότητας ζωής που προέρχεται από τη μείωση του θορύβου. Η ηχητική ρύπανση τόσο στην χειρσαία όσο και στην εναέρια κυκλοφορία δημιουργεί την επιτακτική και ουσιαστική ανάγκη για διερεύνηση δομών που συντελούν στην ύφεση του προβλήματος. Είναι άλλωστε γνωστό πως η συνεχής έκθεση στον δυνατό θόρυβο και στις μηχανικές δονήσεις μπορεί να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα υγείας. Ως εκ τούτου κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση και αναζήτηση καινοτόμων μεθόδων και δομών που συντελούν στην μείωση του θορύβου και των μηχανικών δονήσεων.

Οι φωνονικοί κρύσταλλοι (ΦΚ) είναι τεχνητά σύνθετα υλικά που έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό την περιοδική διάταξη εγκλεισμάτων σε ένα άλλο ομογενές υλικό (υλικό μήτρας) [1]. Μπορούν να παρουσιάσουν φωνονικά ή ακουστικά χάσματα, δηλαδή ζώνες συχνοτήτων στις οποίες η διάδοση των ακουστικών/ελαστικών κυμάτων μέσα από τη δομή ανακόπτεται. Οι ελαστικές ιδιότητες, το σχήμα αλλά και η διάταξη των περιοδικά διατεταγμένων εγκλεισμάτων, που λειτουργούν ως σκεδαστές στην διάδοση του ακουστικού/ελαστικού κύματος, μεταβάλλουν σημαντικά την διάδοση του κύματος μέσα από την δομή. Συνεπώς, η σχέση αλλά και τα διαγράμματα διασποράς μπορούν να τροποποιηθούν κατά το δοκούν με την κατάλληλη επιλογή υλικών, κρυσταλλικών πλεγμάτων αλλά και τοπολογίας των σκεδαστών. Ο γενικός μηχανισμός δημιουργίας φωνονικού χάσματος στηρίζεται στην καταστρεπτική συμβολή των σκεδαζόμενων ακουστικών/ελαστικών κυμάτων από τους σκεδαστές, γι' αυτό και απαιτείται μεγάλη διαφορά στις ελαστικές ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν ως σκεδαστές και ως υλικό μήτρας. Σε περιοδικές δομές, ο μηχανισμός αυτός καλείται μηχανισμός Bragg και το πρώτο χάσμα στο διάγραμμα διασποράς εμφανίζεται σε συχνότητα περίπου ίση με το πηλίκο c/a , όπου c η ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού/ελαστικού κύματος και a η περιοδικότητα της δομής. Οι Δρ. Νίκος Αραβαντινός-Ζαφείρης και Δρ. Μιχαήλ Σιγάλας έχουν μελετήσει πλήθος Φωνονικών Υλικών και Μεταϋλικών από την κλίμακα των νανομέτρων μέχρι και την κλίμακα μερικών μέτρων. Οι δομές αυτές δύνανται να αποτελέσουν βάση για πλήθος εφαρμογών μεταξύ των οποίων είναι η απορρόφηση κραδασμών και δονήσεων [2,3].

1. Αποτελέσματα και συζήτηση

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε αριθμητικά η δομή επάλληλων επιπέδων η οποία ενδέχεται να αποτελέσει μια υποσχόμενη δομή με χρησιμότητα ως απορροφητής κραδασμών. Η δομή συγκροτείται από μια σειρά επάλληλων επιπέδων με κατάλληλη σύνδεση μεταξύ τους. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το υπολογιστικό κελί της δομής. Η δομή χαρακτηρίζεται από μια πλεγματική σταθερά $a = 1m$ και στο σχήμα φαίνεται ο σύνδεσμος μεταξύ των επιπέδων όπου έχει κυλινδρική γεωμετρία. Η ακτίνα του κυλίνδρου συμβολίζεται με r και το ύψος του, που ταυτίζεται με την

απόσταση μεταξύ των επιπέδων, συμβολίζεται με l . Επιπροσθέτως, μελετήθηκε η επίδραση στην αποτελεσματικότητα της δομής τόσο του υλικού των επιπέδων όσο και του υλικού που τα συνδέει. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η συγκεκριμένη δομή μπορεί να λειτουργήσει ως απορροφητής κραδασμών σε ένα σημαντικό εύρος συχνοτήτων. Ωστόσο, με την επιλογή κατάλληλου συνδυασμού υλικών επιπέδου και συνδέσμων, το εύρος των φωνονικών χασμάτων αυξάνεται αξιοσημείωτα.



Σχήμα 1.1 Το υπολογιστικό κελί (που ταυτίζεται με την μοναδιαία κυψελίδα) της υπό μελέτη δομής (αριστερά). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συνδέσμου κυλινδρικής γεωμετρίας μεταξύ των επιπέδων του φωνονικού απορροφητή κραδασμών (δεξιά).

1.1 Μέθοδος και υλικά

Οι αριθμητικοί υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών χρονικού πεδίου (Finite Difference Time Domain method). Οι ελαστικές κυματικές εξισώσεις ολοκληρώνονται σε ένα σχήμα πεπερασμένων διαφορών χρονικού πεδίου (Finite Difference Time Domain (FDTD)) αφού πρώτα διακριτοποιηθούν τόσο χωρικά όσο και χρονικά, τεθούν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και γίνει ακριβής υπολογισμός της εξέλιξης του u στο πεδίο του χρόνου [3,4]. Στους υπολογισμούς της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκαν περιοδικές συνοριακές συνθήκες. Θεωρώντας την πλεγματική σταθερά $a = 1m$ τα αποτελέσματα προκύπτουν σε συχνότητες της τάξης των KHz. Είναι ωστόσο σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό πως, θεωρώντας τις ταχύτητες του ήχου και την πυκνότητα ανεξάρτητες από την συχνότητα τα αποτελέσματα μπορούν αντίστοιχα να αναχθούν ανάλογα με την επιλογή της σταθεράς πλέγματος a . Αν για παράδειγμα η σταθερά πλέγματος ήταν $a = 1\mu m$ τότε οι συχνότητες που θα προέκυπταν θα ήταν της τάξης των GHz.

Τα υλικά που επιλέχθηκαν για την συγκεκριμένη μελέτη είναι υλικά που θα μπορούσαν να αποτελούν υλικά κατασκευής της προτεινόμενης δομής σε πιθανές εφαρμογές της. Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ μέταλλο το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει δομικό στοιχείο της κατασκευής σε ενδεχόμενη εφαρμογή της για την προστασία ελαφρών κατασκευών όπως για παράδειγμα μουσειακά εκθέματα. Αντίθετα το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε για μεγαλύτερες κατασκευές όπως είναι τα κτίρια με πιθανή διερεύνηση της λειτουργικότητας της δομής σε προστασία από ένα σεισμικό γεγονός. Τα χαρακτηριστικά των υλικών (ταχύτητες ήχου και πυκνότητες) που επιλέχθηκαν για τους υπολογισμούς φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Οι διαμήκεις (C_l) και οι εγκάρσιες (C_s) ταχύτητες καθώς και οι πυκνότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

Material	C_l (Km/s)	C_s (Km/s)	Density (gr/cm ³)
Τσιμέντο	3.47	2.02	2.30
Αλουμίνιο	6.42	3.04	2.7
Ελαστομερές	0.023	0.006	1.30
Αέρας	0.331	-	0.0013

1.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

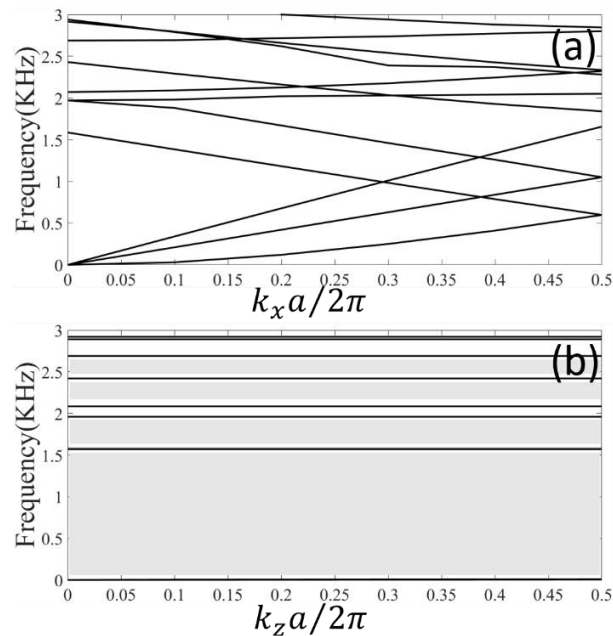
Όλες οι περιπτώσεις συνδυασμών υλικών που πραγματοποιήθηκαν μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι συγκεντρωμένα στον Πίνακα 1.2. Για να υπάρξει καλύτερη και πιο αξιόπιστη σύγκριση των αποτελεσμάτων εισάγεται και ο αδιάστατος συντελεστής $\Delta\omega/\omega_g$ όπου $\Delta\omega$ είναι η διαφορά του άνω ορίου από το κάτω όριο του φωνονικού χάσματος και ω_g είναι η μεσαία συχνότητα του χάσματος. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις επιπέδων από αλουμίνιο και τσιμέντο. Επίσης μελετήθηκε η περίπτωση κυλινδρικών συνδέσμων από ελαστομερές και αλουμίνιο. Τα φωνονικά χάσματα για την συγκεκριμένη δομή εμφανίζονται κατά την διεύθυνση του άξονα z και συμβολίζεται ως k_z στην αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 1.2.

Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι υπάρχει μια βέλτιστη συμπεριφορά της δομής στην εγκάρσια διεύθυνση διάδοσης και για λόγο $l/a = 9/20$. Σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος $\Delta\omega/\omega_g$ μεγιστοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Σημαντική είναι επίσης και η περίπτωση που ο κυλινδρικός σύνδεσμος μεταξύ των επιπέδων είναι το ελαστομερές. Και αυτό διότι η προσθήκη του στην δομή χαμηλώνει ακόμη περισσότερο το κάτω όριο του φωνονικού χάσματος, διευρύνοντάς το και διπλασιάζοντας σχεδόν τον λόγο $\Delta\omega/\omega_g$. Η μεταβολή της ακτίνας του ελαστομερούς κυλίνδρου δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίπτωση στην λειτουργικότητα της δομής όπως είναι φανερό από την μεταβολή του λόγου r/a .

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί στο σημείο αυτό πως σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν υπάρχουν αξιοσημείωτα φωνονικά χάσματα και σε υψηλότερες συχνότητες. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται αυτά που εντοπίζονται στις χαμηλές συχνότητες που είναι και τα μεγαλύτερα. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται το διάγραμμα διασποράς της δομής από τσιμέντο με κυλινδρικούς συνδέσμους από ελαστομερές με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $r/a = 3/20$ και $l/a = 9/20$. Είναι φανερό από το διάγραμμα διασποράς πως η δομή εμφανίζει στην εγκάρσια διεύθυνση πολλαπλά φωνονικά χάσματα γεγονός που δεικνύει την δυνατότητα εφαρμογής της ως απορροφητής κραδασμών.

Πίνακας 1.2 Φωνονικά χάσματα κατά μήκος της διεύθυνσης k_z για τον Φωνονικό Απορροφητή Κραδασμών

l/a	Διεύθυνση	Κάτω όριο (KHz)	Άνω όριο (KHz)	$\Delta\omega/\omega_g$
$r/a = 3/20$ (aluminium layers with aluminium blocks)				
9/20	k_z	0.64	2.01	1.03
$r/a = 3/20$ (aluminium layers with rubber blocks)				
9/20	k_z	0.01	2.46	1.98
$r/a = 3/20$ (concrete layers with rubber blocks)				
9/20	k_z	0.007	1.59	1.98
$r/a = 5/20$ (concrete layers with rubber blocks)				
3/20	k_z	0.01	1.24	1.97
9/20	k_z	0.007	1.57	1.98
13/20	k_z	0.007	1.33	1.98
15/20	k_z	0.007	1.12	1.97



Σχήμα 1.2 Το διάγραμμα διασποράς της δομής για τις διευθύνσεις k_x (a) και k_z (b). Με γκρι φόντο είναι σημειωμένα τα φωνονικά χάσματα κατά την εγκάρσια διεύθυνση.

2. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε αριθμητικά μια δομή η οποία θα μπορούσε να λειτουργήσει ως απορροφητής κραδασμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η προτεινόμενη δομή μπορεί να έχει αυτήν την εφαρμογή ιδιαίτερος για απορρόφηση

εγκάρσιων κραδασμών αφού προς αυτήν την διεύθυνση υπάρχουν τα φωνονικά χάσματα. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας δείχνουν πως ο κλάδος των φωνονικών υλικών μπορεί να αποτελέσει βάση πλήθους εφαρμογών σε ό,τι αφορά τον ευρύτερο τομέα της απορρόφησης ήχου και κραδασμών με την προτεινόμενη δομή να μπορεί να βρει εφαρμογές σε ποικίλης κλίμακας περιπτώσεις.

Ευχαριστίες

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ - ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου:Τ1ΕΔΚ-00185)

Το μέλος της ερευνητικής ομάδας Αριάδνη Κωνσταντοπούλου χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) (Κωδικός Υποτροφίας: 80156).

3. Βιβλιογραφία

[1] M. I. Hussein, M. J. Leamy and M. Ruzzene, “Dynamics of Phononic Materials and Structures: Historical Origins, Recent Progress, and Future Outlook”, *Appl. Mech. Rev* **66**(4), 040802 (2014).

[2] N. Aravantinos-Zafiris and M.M. Sigalas, “Band gaps in 3D layer-by-layer phononic crystal”, *Journal of Vibration and Acoustics* **135**, 041003 (2013).

[3] N. Aravantinos-Zafiris and M.M. Sigalas, “Large scale phononic metamaterials for seismic isolation”, *Journal of Applied Physics* **118**, 064901 (2015).

[4] M. M. Sigalas and N. García, “Theoretical study of three-dimensional elastic band gaps with the finite-difference time-domain method”, *Journal of Applied Physics* **87**, 3122 (2000).

Εφαρμογές Φωνονικών Υλικών στην απορρόφηση κραδασμών

Αριάδνη Κωνσταντοπούλου¹, Νικόλαος Αραβαντινός-Ζαφείρης², Μιχαήλ Σιγάλας¹

¹Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504,

e-mail: sigalas@upatras.gr, e-mail: ariadk@upatras.gr

²Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό

Ίδρυμα Ιονίων Νήσων, Αηζούρι 28200, e-mail: nikosaravadinos@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου μελετάται αριθμητικά ένας φωνονικός κρύσταλλος γνωστός και ως δομή κατά στρώσεις που θα μπορούσε να αποτελέσει βάση για εφαρμογές στην σεισμική προστασία υφιστάμενων αστικών ή αγροτικών κατασκευών, μνημείων ή οποιασδήποτε κατασκευής ευάλωτης σε σεισμικό συμβάν. Εξετάστηκε η απόκριση της δομής σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Όλες οι παράμετροι γεωμετρίας της δομής εξετάστηκαν στους υπολογισμούς.

Applications of Vibrational Materials in Vibration Absorption

ABSTRACT

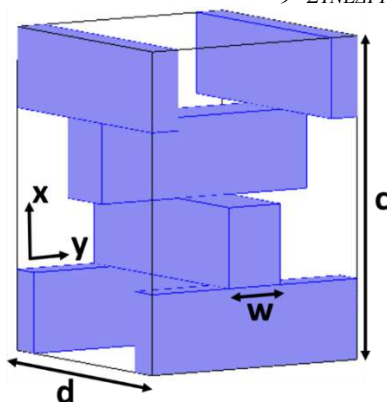
In this work, using the Finite Difference Time Domain method, we numerically examine the well-known Layer-By-Layer phononic crystal as a suitable candidate for applications in seismic protection of existing urban or countryside structures, monuments or any construction vulnerable to a seismic event. We investigate the response of the structure in different types of soil. All the geometry parameters of the structure were examined in our calculations.

Εισαγωγή

Ο έλεγχος της διάδοσης των ακουστικών/ελαστικών κυμάτων αποτελεί ένα θεμελιώδες ζήτημα με πολλές εφαρμογές όπως για παράδειγμα στα πεδία της απορρόφησης του ήχου και των κραδασμών. Οι φωνονικοί κρύσταλλοι (ΦΚ) είναι τεχνητά σύνθετα υλικά που προτάθηκαν πριν από τρεις περίπου δεκαετίες και θεμελιώδης ιδιότητά τους ήταν η δυνατότητα να τροποποιείται σημαντικά η σχέση διασποράς τους, σε σχέση με αυτή ενός απλού ομογενούς υλικού από το οποίο αυτά συντίθενται. Βασική ιδιότητα των ΦΚ είναι ότι μπορούν να παρουσιάσουν φωνονικά ή ακουστικά χάσματα δηλαδή ζώνες συχνοτήτων στις οποίες η διάδοση των ακουστικών/ελαστικών κυμάτων μέσα από τη δομή ανακόπτεται. Οι ελαστικές ιδιότητες, το σχήμα αλλά και η διάταξη των περιοδικά διατεταγμένων εγκλεισμάτων, που λειτουργούν ως σκεδαστές στην διάδοση του ακουστικού/ελαστικού κύματος, τροποποιούν σημαντικά την διάδοση του κύματος μέσα από την δομή. Επομένως, η σχέση αλλά και τα διαγράμματα διασποράς μπορούν να μεταβληθούν κατά το δοκούν με την κατάλληλη επιλογή υλικών, κρυσταλλικών πλεγμάτων αλλά και τοπολογίας των σκεδαστών [1]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι Έλληνες Ερευνητές θεωρούνται πρωτοπόροι σε αυτό το πεδίο έρευνας. Ο κ. Σιγάλας και ο κ. Οικονόμου θεωρούνται οι συνιδρυτές του τομέα των φωνονικών κρυστάλλων [2]. Σπουδαία, επίσης, συνεισφορά σε υπολογιστικό επίπεδο έχει επιτευχθεί από τον κ. Στεφάνου και τον κ. Μοδινό [3], ενώ στο πειραματικό σκέλος έχει συμβάλει και ο κ. Φυτάς [4]. Ο κ. Αραβαντινός – Ζαφείρης και ο κ. Σιγάλας εξέτασαν αριθμητικά, σε πρόσφατη εργασία τους, δομές που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως μεγάλης κλίμακας φωνονικά μετά-υλικά και να έχουν χάσματα στο φάσμα συχνοτήτων σεισμικών κυμάτων όταν οι διαστάσεις τους έχουν επιλεγεί κατάλληλα [5]. Τα ακουστικά μετά-υλικά εμφανίστηκαν προσφέροντας νέες λειτουργίες που δεν βρέθηκαν σε φωνονικούς κρυστάλλους και επηρέαζαν εκτός από ακουστικά κύματα και τη μελέτη των ελαστικών κυμάτων. Οι μοναδικές ιδιότητές τους προκύπτουν λόγω των τοπικών συντονισμών που εμφανίζονται στην δομή τους [6].

1. Αποτελέσματα και συζήτηση

Στόχος της παρούσας έρευνας είναι μια συνοπτική παρουσίαση του ερευνητικού αντικειμένου των φωνονικών υλικών καθώς και δυνατότητες χρήσης τους σε εφαρμογές όπως η απορρόφηση του ήχου και των κραδασμών. Διερευνήθηκε αριθμητικά η ύπαρξη φωνονικών χασμάτων στην τρισδιάστατη δομή κατά στρώσεις (Σχήμα 1.1). Η συγκεκριμένη δομή αποτελείται από στρώματα μονοδιάστατων ράβδων με μία αλληλουχία τοποθέτησης που επαναλαμβάνεται κάθε τέσσερα στρώματα και η σταθερά πλέγματος συμβολίζεται με c . Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των ράβδων εντός του στρώματος είναι d και το πλάτος κάθε ράβδου είναι w . Ανάμεσα σε διαδοχικά στρώματα ο προσανατολισμός των ράβδων περιστρέφεται κατά 90° και μεταξύ κάθε στρώσης οι ράβδοι μετατοπίζονται συλλογικά κατά $0.5d$. Επιπλέον, εξετάστηκε αριθμητικά η συμπεριφορά της δομής για διάφορους τύπους υλικών αλλά και για διαφορετικές γεωμετρικές παραμέτρους αυτής. Για τους αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 1.1 Το υπολογιστικό κελί (που είναι ταυτόσημο με την μοναδιαία κυψελίδα) της δομής κατά στρώσεις. Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των ράβδων εντός του στρώματος είναι d και το πλάτος κάθε ράβδου είναι w .

1.1 Μέθοδος και υλικά

Για τον υπολογισμό του διαγράμματος διασποράς της δομής, μέσω των αριθμητικών υπολογισμών με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών χρονικού πεδίου (Finite Difference Time Domain method), χρησιμοποιήθηκε μόνο μία μοναδιαία κυψελίδα της δομής με Περιοδικές Συνοριακές Συνθήκες (Periodic Boundary Conditions) ως αποτέλεσμα του θεωρήματος Bloch [7]. Λόγω του κυβικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς, ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο πλέγμα χρησιμοποιήθηκε ως υπολογιστικό κελί αποτελούμενο από 30 επί 30 επί 40 σημεία πλέγματος κατά μήκος των αξόνων x , y και z αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε μειώνοντας το μέγεθος του ορθογώνιου πλέγματος στο μισό, διπλασιάζοντας ουσιαστικά το υπολογιστικό κελί σε ένα πλέγμα 60x60x80 σημείων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είχαν διαφορές μεταξύ τους λιγότερο από 3%, γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλή σύγκλιση και μικρό σφάλμα στους υπολογισμούς.

Οι υπολογισμοί έγιναν τόσο για το αμμώδες όσο και για πετρώδες έδαφος, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα [8], προκειμένου να υπάρχουν αριθμητικά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της δομής σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Η πυκνότητα και οι ταχύτητες ήχου κάθε υλικού που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Οι διαμήκεις (C_l) και οι εγκάρσιες (C_s) ταχύτητες καθώς και οι πυκνότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

Υλικό	C_l (m/s)	C_s (m/s)	Πυκνότητα (Kgr/cm ³)
Αμμώδες Χώμα	290	160	1.500
Πετρώδες Χώμα	1.732	1.000	2.039
Αέρας	0.331	-	0.0013

1.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

Το κάτω άκρο (KA) και το άνω άκρο (AA) κάθε φωνονικού χάσματος παρουσιάζονται για κάθε συνιστώσα του πεδίου. Εστιάζουμε στις περιπτώσεις των φωνονικών χασμάτων που έχουν πιθανή επικάλυψη και στις τρεις εξεταζόμενες κατευθύνσεις. Επιπρόσθετα δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα σε χάσματα που εμφανίζονται σε χαμηλότερες συχνότητες ως πιθανότερη περιοχή συχνοτήτων που μπορεί να βρει εφαρμογή η συγκεκριμένη δομή στην απορρόφηση κραδασμών με έμφαση στο σεισμικό φάσμα. Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση που μελετήθηκε, είναι αυτή όπου οι ράβδοι έχουν ορθογώνια διατομή και ο λόγος $c/d = 40/30$, για την περίπτωση που υπάρχει αμμώδες χώμα. Ο Πίνακας 1.2 περιέχει τα αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης για τη δομή κατά στρώσεις και $w/d = 11/30$. Το διάγραμμα διασποράς της δομής για τη διεύθυνση k_z για αμμώδες έδαφος φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

Για μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη της δομής κατά στρώσεις, οι υπολογισμοί επεκτάθηκαν και στην περίπτωση ενός πετρώδους εδάφους. Θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί η απόκριση της δομής σε διαφορετικό τύπο εδάφους έτσι ώστε να μπορεί κανείς να έχει καλύτερη εικόνα της λειτουργικότητας που θα μπορούσε να έχει η δομή αυτή για σεισμική προστασία σε διαφορετικούς τύπους εδάφους.

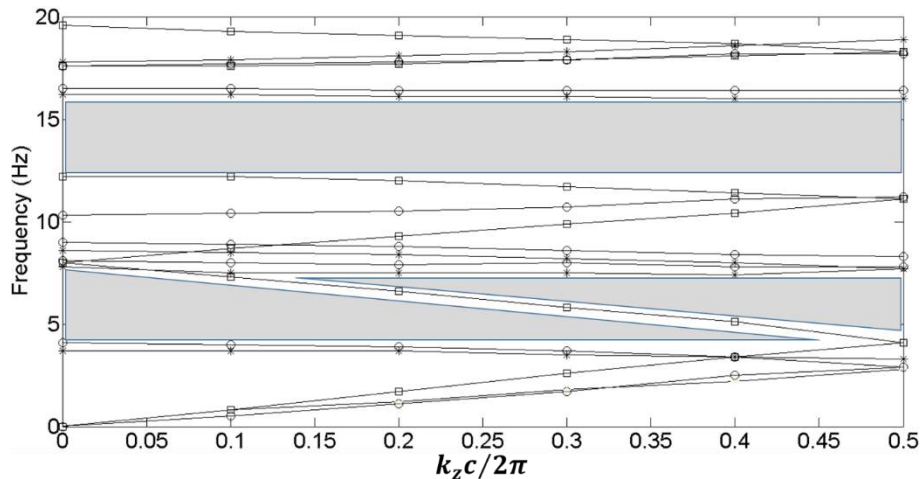
Πίνακας 1.2 Αποτελέσματα δομής ράβδων κατά στρώσεις ($d = 10m$, $c/d = 40/30$ και $w/d = 11/30$) σε αμμώδες έδαφος

w/d	Dir.	Field comp	KA (Hz)	AA (Hz)	$\Delta\omega/\omega_g$	KA (Hz)	AA (Hz)	$\Delta\omega/\omega_g$
11/30	k_z	x	4.1	7.8	0.62	12.3	16.4	0.28
11/30	k_z	y	3.7	7.7	0.72	11.1	16.1	0.37
11/30	k_z	z	-	-		12.2	17.6	0.36

Ο Πίνακας 1.3 περιέχει τα αποτελέσματα για την περίπτωση όπου $c/d = 40/30$ και $w/d = 5/30$ για πετρώδες έδαφος. Είναι προφανές ότι οι συχνότητες που εμφανίζουν τα κενά της ζώνης για αυτόν τον τύπο εδάφους είναι υψηλότερες από την περίπτωση του αμμώδους εδάφους. Αυτά τα αποτελέσματα αναμένονται επειδή οι ταχύτητες ήχου του πετρώδους εδάφους είναι σχεδόν 6 φορές υψηλότερες από εκείνες του αμμώδους εδάφους.

Πίνακας 1.3 Αποτελέσματα της δομής των ράβδων κατά στρώσεις σε πετρώδες έδαφος ($d = 10m$, $c/d = 40/30$ και $w/d = 5/30$)

w/d	Dir.	Field com.	KA (Hz)	AA (Hz)	$\Delta\omega/\omega_g$	KA (Hz)	AA (Hz)	$\Delta\omega/\omega_g$
5/30	k_z	x	16.2	38.8	0.82	42.4	56.3	0.28
5/30	k_z	y	14.1	29.5	0.70	37.0	66.2	0.56
5/30	k_z	z	-	-		-	-	



Σχήμα 1.2 Το διάγραμμα διασποράς της δομής για τη διεύθυνση k_z ($d = 10m$, $c/d = 40/30$ και $w/d = 11/30$) για αμμώδες έδαφος. Ο οριζόντιος άξονας είναι ο κανονικοποιημένος k φορέας κατά μήκος της κατεύθυνσης k_z . Τα τετράγωνα σύμβολα είναι για το στοιχείο κατά μήκος του άξονα z (κατεύθυνση στοίβαξης), οι αστερίσκοι είναι για το στοιχείο κατά μήκος του άξονα y και οι κύκλοι είναι για το στοιχείο κατά μήκος του άξονα x .

2. Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται για πρώτη φορά μια εκτεταμένη αριθμητική μελέτη της γνωστής δομής κατά στρώσεις ως υποψήφια για εφαρμογές στην αντισεισμική προστασία. Αυτή η δομή είναι μια τρισδιάστατη δομή που μελετήθηκε εφαρμόζοντας μια πλήρως τρισδιάστατη αριθμητική μέθοδο προσομοίωσης. Εξετάστηκαν αριθμητικά διαφορετικές γεωμετρικές παράμετροι της δομής. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις εξετάζοντας δύο διαφορετικούς τύπους εδάφους. Πρόκειται για μια φιλική προς το περιβάλλον, εύκολη και χαμηλού κόστους δομή, η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί χωρίς οποιαδήποτε παρέμβαση σε μια υπάρχουσα κατασκευή που να την προστατεύει από τα καταστροφικά αποτελέσματα που θα μπορούσε να έχει ένας σεισμός πάνω σε αυτήν.

Ευχαριστίες

Η εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Γ1ΕΔΚ-00185)

Το μέλος της ερευνητικής ομάδας Αριάδνη Κωνσταντοπούλου χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) (Κωδικός Υποτροφίας: 80156).

3. Βιβλιογραφία

- [1] A. Khelif and A. Adibi, “Phononic Crystals, Fundamentals and Applications”, Springer-Verlag New York, (2016)
- [2] T. Gorishnyy, M. Maldovan, C. Ullal and E. Thomas, “Sound Ideas”, *Physics World* **18**, (2005)
- [3] M. Sigalas, M. S. Kushwaha, E. N. Economou, M. Kafesaki, I. E. Psarobas and W. Steurer, “Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment”, *ZEITSCHRIFT FUR KRISTALLOGRAPHIE* **220**, 765 (2005)
- [4] W. Cheng, J.Wang, U.Jonas, G.Fytas, N.Stefanou, "Observation and Tuning of Hypersonic Band Gaps in Colloidal Crystals", *Nature Materials* **5**, 830 (2006)
- [5] N. Aravantinos-Zafiris and M. M. Sigalas, “Large scale phononic metamaterials for seismic isolation”, *Journal of Applied Physics* **118**, 064901 (2015).
- [6] G. Ma and P. Sheng, “Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons”, *Science Advances* **2**, (2016).
- [7] N. Aravantinos-Zafiris and M.M. Sigalas, “Band gaps in 3D layer-by-layer phononic crystal”, *Journal of Vibration and Acoustics* **135**, 041003 (2013).
- [8] Eurocode 8 (2005) Design of structures for earthquake resistance — part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. The European Standard EN 1998-1

**Μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς
στερεομεταφερόμενου θορύβου, κατά την μελέτη
μετεγκατάστασης Εργαστηρίου του Κ.Ε.Κ. Ο.Σ.Ε., με
πρότυπο διεγέρτη δονήσεων BD-05**

Κωνσταντίνος Δαδιώτης¹
Φυσικός, PhD in Acoustics
dadiotis@ema.com.gr

Αλέξανδρος Γαλατάς¹
Πολιτικός Μηχανικός, MSc Sound &
Vibration Studies
galatas@ema.com.gr

Dieter Müller²
Επικεφαλής Συστημάτων
Μετρήσεων
mueller@woelfel.de

Ανέστης Κωστίδης³
Προϊστάμενος Τμ. Εργαστηριακών Δοκιμών
& Ελέγχων Σιδηροδρομικών Υλικών
a.kostidis@osenet.gr

¹Παπαδόπουλος και ΣΙΑ ΟΕ - Εταιρεία Μελετών Ακουστικής EMA ΟΕ
Σπύρου Δήμα 54, Παιανία

²Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co. KG,
Max-Planck-Str. 15, Höchberg, Germany

³Διεύθυνση Σιδηροδρομικών Συστημάτων ΟΣΕ, Καρόλου 1-3, 10437 Αθήνα /

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόβλεψη των δονήσεων και του στερεομεταφερόμενου θορύβου εντός κτιριακών εγκαταστάσεων, που προκύπτουν από την λειτουργία πηγής δονήσεων (π.χ. Η/Μ εξοπλισμού), είναι μια πολυπαραμετρική διερεύνηση που συνδέεται τόσο με τα χαρακτηριστικά της πηγής (διεγείρουσες συχνότητες) όσο και με αυτά του κτιρίου (ιδιοσυχνότητες, ηχογέφυρες κλπ). Τα χαρακτηριστικά της πηγής, όπως οι συχνότητα λειτουργίας και το δυναμικό της φορτίο, μπορεί να διατίθενται από τον κατασκευαστή ή οι παραγόμενες δονήσεις μπορούν να μετρηθούν με την μονάδα εγκατεστημένη σε προσωρινή θέση. Αντίθετα, η συμπεριφορά του κτιρίου δεν μπορεί να υπολογιστεί αυτόνομα, παρά μόνο με αναλυτική μοντελοποίηση του συνολικού κτιρίου. Στην παρούσα δημοσίευση παρατίθεται μια διαδικασία για την μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς και την πρόβλεψη της στάθμης των δονήσεων και του στερεομεταφερόμενου θορύβου με την χρήση πρότυπου διεγέρτη δονήσεων.

***Structure borne noise transfer function measurement,
during the relocation study of a Laboratory of O.S.E.'s
V.T.C., with the prototype vibrations oscillator BD-05***

ABSTRACT

The prediction of vibrations and structure borne noise in building application from vibration sources (e.x. E/M equipment) is a multiparametric investigation that

is related both to the characteristics of the source (excitation frequencies) and those of the building itself (natural frequencies, noise-bridges, etc.). The characteristics of the source, such as excitation frequencies and dynamic load, may be available from the manufacturer or can be measured with the unit installed temporarily. On the other hand, the response of the building cannot be calculated, unless the whole building is analytically modelled. In this paper, a process is presented that allows for the measurement of the transfer function and the prediction of the level of vibrations and the structure borne noise with the use of a prototype vibrations oscillator.

Εισαγωγή

Η προδιαγραφή των απαραίτητων μέτρων για την προστασία ευαίσθητων δεκτών από θόρυβο και δονήσεις είναι ένα σύνθετο ζήτημα που απαιτεί την διενέργεια Ειδικής Ακουστικής Μελέτης Ακουστικού Συμβούλου. Σε περίπτωση που η μελέτη είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί πριν την φάση της κατασκευής, όπως είναι και η σωστή προσέγγιση, δεν υπάρχει η δυνατότητα απευθείας μετρήσεων της επίδρασης της υπό εξέταση πηγής στον χώρο μελέτης και η προδιαγραφή των απαραίτητων μέτρων μπορεί να γίνει μόνο από τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά της πηγής (φασματική ανάλυση εκπομπών θορύβου, συχνότητα λειτουργίας κινουμένων στοιχείων κλπ). Η διαδικασία αυτή δεν μπορεί να λάβει υπόψη την συμπεριφορά του χώρου μελέτης, ζήτημα το οποίο είναι πιο σύνθετο για την περίπτωση του στερεομεταφερόμενου θορύβου και των δονήσεων που επηρεάζονται σημαντικά από την απόκριση (ηχογέφυρες, ιδιοσυχνότητα, κλπ) του χώρου μελέτης και την συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της πηγής και των ευαίσθητων δεκτών.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μεθοδολογία για την μέτρηση των ιδιοσυχνότητων του χώρου μελέτης και της συνάρτησης μεταφοράς στερεομεταφερόμενου θορύβου και δονήσεων, με την χρήση του πρότυπου διεγέρτη δονήσεων BD05 της Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co. KG [1].

Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αυτής παρουσιάζεται μέσω της Μελέτης Προστασίας του Κέντρου Επαγγελματικής Κατάρτισης του ΟΣΕ στον Α.Ι. Ρέντη (Κ.Ε.Κ.), από τον θόρυβο και τις δονήσεις που προκύπτουν κατά την λειτουργία του Εργαστηρίου Δοκιμών & Ελέγχων Σιδηροδρομικών Υλικών, κατά την αλλαγή θέσης του από το υπόγειο του κτιρίου που βρίσκεται σήμερα, σε νέα θέση στο ισόγειο.

1. Μεθοδολογία

1.1 Περιγραφή μετρητικών διατάξεων

Για την διαδικασία των μετρήσεων απαιτείται η χρήση της πρότυπης πηγής δονήσεων BD-05 της εταιρείας Woelfel και αναλυτές ήχου και δονήσεων.

Η πρότυπη πηγή δονήσεων BD-05 αποτελείται από κινούμενη μάζα 11,5kg η οποία είναι αναρτημένη από ελατήρια (στην κατακόρυφη διάταξη της μετρητικής διαδικασίας της παρούσας διερεύνησης) και τίθενται σε ταλάντωση (swept-sine) σε ένα μέγιστο πλάτος peak-peak 290mm και παράγει 500N κατακόρυφης δύναμης για ένα εύρος συχνοτήτων από 5 έως 200Hz.

1.2 Διαδικασία Μέτρησης Συνάρτησης Μεταφοράς

Η γεννήτρια δονήσεων BD-05 πακτώνεται, με αυτοεκτονούμενα μηχανικά αγκύρια στην πλάκα του δαπέδου του χώρου εκπομπής, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας από την πηγή στο κτίριο.

Επιταχυνσιόμετρο τοποθετείται στο δάπεδο, πλησίον της γεννήτριας δονήσεων, για την καταγραφή της διέγερσης της πλάκας στον χώρο εκπομπής και παράλληλα διενεργούνται μετρήσεις στον χώρο λήψης τόσο της στάθμης του στερεομεταφερόμενου θορύβου με το ηχώμετρο όσο και των δονήσεων με γεώφωνο. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις μεταφοράς των δονήσεων της πλάκας του χώρου εκπομπής σε στερεομεταφερόμενο θορύβο και δονήσεις στον χώρο λήψης

Η πρόβλεψη της αναμενόμενης στάθμης στερεομεταφερόμενου θορύβου και δονήσεων στον χώρο λήψης γίνεται με την εφαρμογή της συνάρτησης αναφοράς στο φάσμα δονήσεων των πηγών δονήσεων που θα τοποθετηθούν στον χώρο



Εικόνα 1. Διάταξη μετρητικού εξοπλισμού στον χώρο εκπομπής (αριστερά) και στον χώρο λήψης (δεξιά)

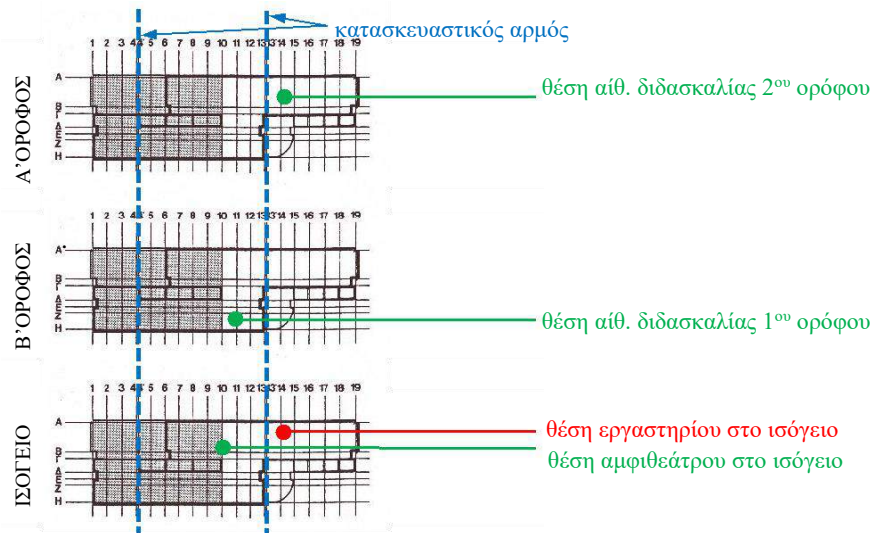
2. Case Study

Η παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε κατά την μελέτη μετεγκατάστασης του Εργαστηρίου Δοκιμών & Ελέγχων Σιδηροδρομικών Υλικών του Κ.Ε.Κ ΟΣΕ από το υπόγειο σε νέα θέση στο ισόγειο.

Αρχικά διενεργήθηκαν μετρήσεις του εκπεμπόμενου θορύβου και δονήσεων των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο, για την αξιολόγηση της αντοχής δειγμάτων σκύρου, μέσω της υποβολής δείγματος σε μηχανικές καταπονήσεις που παράγουν έντονο επίπεδο θορύβου και δονήσεων. Σημειώνεται ότι τα δύο μηχανήματα θα μεταφερθούν αυτούσια στην νέα θέση του εργαστηρίου.

Στην νέα θέση έγινε προσομοίωση της διέγερσης με την πρότυπη πηγή δονήσεων BD-05. Η πρότυπη πηγή τοποθετήθηκε, επί του δυσμενέστερου σημείου (ακριβώς πάνω από το δοκάρι του φέροντος οργανισμού του κτιρίου) και πακτώθηκε με αυτοεκτονούμενα μηχανικά αγκύρια στην πλάκα του δαπέδου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας από την πηγή στο κτίριο.

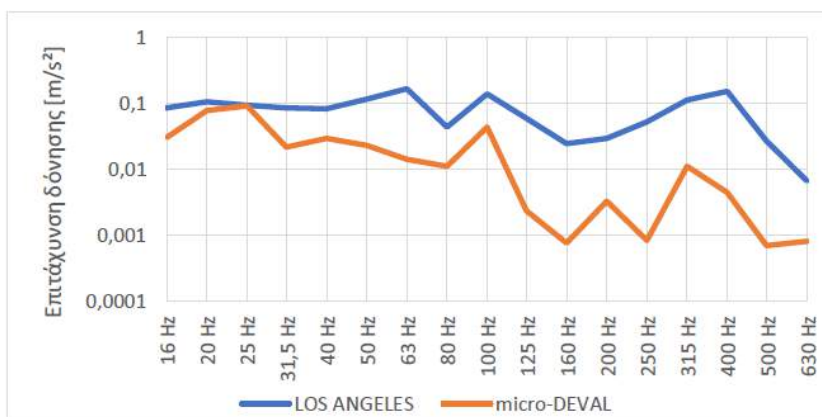
Με την πηγή σε λειτουργία έγιναν μετρήσεις του στερεομεταφερόμενου θορύβου και δονήσεων σε ευαίσθητους ακουστικά δέκτες του κτιρίου (αμφιθέατρο στο ισόγειο, σε αίθουσα διδασκαλίας στον 1ο όροφο και σε αίθουσα διδασκαλίας στον 2ο όροφο) (Εικόνα 1).



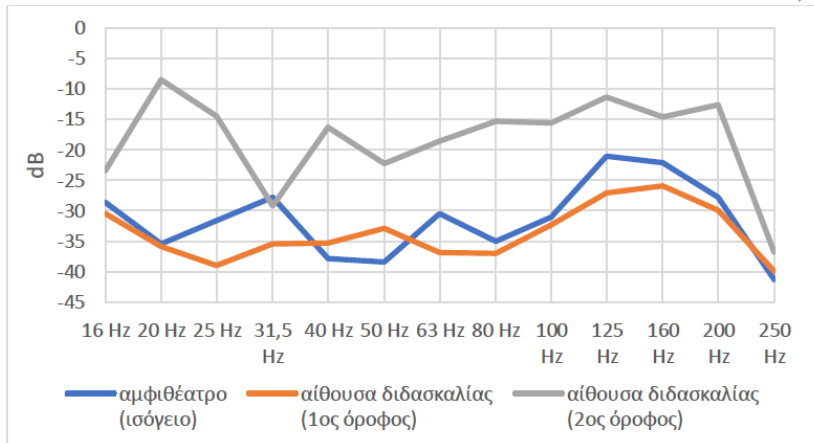
Εικόνα 2. Κάτοψη των σχετικών θέσεων των χώρων εκπομπής και λήψης

2.1 Αποτελέσματα

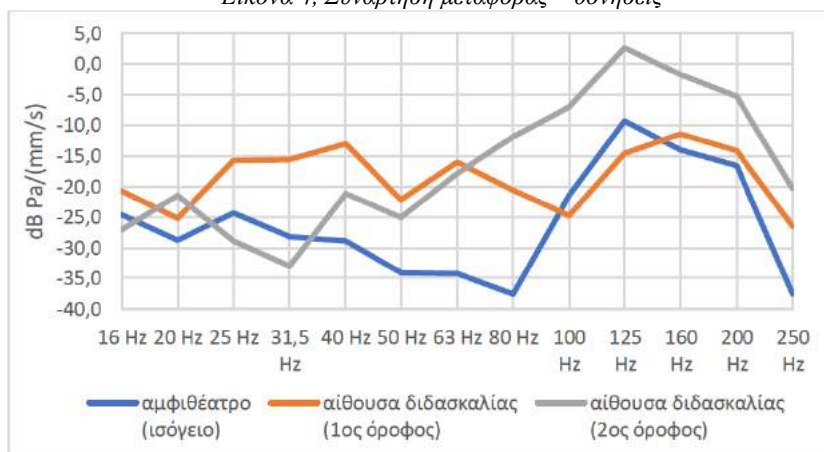
Από τις μετρήσεις δονήσεων [2] και θορύβου [3] προκύπτουν η στάθμη δονήσεων των δύο μηχανών, εντός του υφιστάμενου θαλάμου, κατά την λειτουργία τους σε 1/3-οκταβικές ζώνες από 16 Hz έως 630 Hz (Εικόνα 3) και οι συναρτήσεις μεταφοράς από την πηγή (νέα θέση εργαστηρίου) στους επιμέρους δέκτες που παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4 & Εικόνα 5).



Εικόνα 3. Αποτελέσματα μέτρησης δονήσεων, ανά ζώνες 1/3 οκτάβας



Εικόνα 4, Συνάρτηση μεταφοράς – δονήσεις



Εικόνα 5, Συνάρτηση μεταφοράς – εδαφομεταφερόμενος θόρυβος

Από τις μετρήσεις των συναρτήσεων μεταφοράς (από την πηγή στους δέκτες) και από τις μετρήσεις δονήσεων των μηχανημάτων στην πηγή, μπορεί να γίνει ασφαλής εκτίμηση της στάθμης δονήσεων και στερεομεταφερόμενου θορύβου στους δέκτες. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών, για το δυσμενέστερο (αλλά και αρκετά σύνηθες) σενάριο της ταυτόχρονης λειτουργίας και των δύο μηχανών, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1)

Πίνακας 1, Εκτίμηση στάθμης στερεομεταφερόμενου θορύβου στους ευαίσθητους ακουστικά δέκτες εντός του κτιρίου

Θέση	Εκτίμηση στάθμης στερεομεταφερόμενου θορύβου
Αμφιθέατρο (ισόγειο)	51 dB(A)
αίθουσα διδασκαλίας (1ος όροφος)	54 dB(A)
αίθουσα διδασκαλίας (2ος όροφος)	63 dB(A)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η δυσμενέστερη κατάσταση προκύπτει για την αίθουσα διδασκαλίας του 2^{ου} ορόφου μεταξύ της οποίας και του χώρου εκπομπής δεν παρεμβάλεται κατασκευαστικός αρμός.

Με βάση τις παραπάνω προβλέψεις δύναται ο μελετητής να προδιαγράψει τα απαραίτητα μέτρα αντιδονητικής προστασίας για τον περιορισμό του στερεομεταφερόμενου θορύβου σε αποδεκτά επίπεδα ανάλογα με την χρήση του χώρου.

3. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας δείχνουν ότι η μεθοδολογία αυτή μπορεί να δώσει τα απαραίτητα στοιχεία στον Ακουστικό Σύμβουλο για την προδιαγραφή των απαραίτητων επεμβάσεων περιορισμού του στερεομεταφερόμενου θορύβου και των δονήσεων πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής και την εδραίωση του προβλήματος.

Η διερεύνηση στο Κέντρο Επαγγελματικής Κατάρτισης του ΟΣΕ έδειξε ότι η πρότυπη πηγή στερεομεταφερόμενου θορύβου BD-05 κατάλληλα συνδεδεμένη με τον σκελετό του κτιρίου μπόρεσε να διεγείρει το κτίριο, χωρίς την καταπόνηση του με υψηλά φορτία, σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (10Hz-200Hz).

4. Αναφορές

[1] Wölfel Monitoring Systems GmbH + Co. KG.
<https://www.woelfel.de/fileadmin/produkte/shaker/BD5-BD10-Broschure-en.pdf>

[2] ISO 4866:2010 - Mechanical vibration and shock -- Vibration of fixed structures -- Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures

[3] ISO 11204:2010 - Acoustics -- Noise emitted by machinery and equipment -- Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying accurate environmental corrections

The Patraikos Gulf Ambient and Seismic Noise Monitoring Project

E. Fakiris^{1*}, D. Christodoulou¹, N. Georgiou¹, X. Dimas¹, G. Papatheodorou¹, H. Pappas², Ph. Blondel³, A. Pagoulatos⁴, G. Mikoniatis⁴, G. Zafiroopoulos⁴ and F. Symeonidis⁴

¹ Laboratory of Marine Geology and Physical Oceanography, Geology Dpt., University of Patras, Greece

² METRICA S.A., Athens, Greece

³ Department of Physics, University of Bath, UK

⁴ HELLENIC PETROLEUM SA, Athens, Greece

*fakiris@upatras.gr

ABSTRACT

This work presents the materials, methods and results of the West Patraikos Gulf ambient and seismic noise monitoring project, realized during the marine 3D seismic survey that was conducted by the Hellenic Petroleum S.A., in 2015. Dense acoustic noise monitoring data were acquired and processed close to the seismic source to as far as away from it, offering the opportunity to study the attenuation characteristics of impulse sounds in long distances. The extensive ambient noise monitoring that has taken place before and after the seismic survey, gave for first time evidence about the ratio of anthropophony to biophony in the area, by revealing fauna species and mechanical disturbances that control the soundscape.

Το Πρόγραμμα Παρακολούθησης Περιβάλλοντος και Σεισμικού Θορύβου στον Πατραϊκό Κόλπο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρει τις μεθόδους και τα αποτελέσματα του προγράμματος παρακολούθησης του περιβάλλοντος και σεισμικού θορύβου στον Δυτικό Πατραϊκό Κόλπο, το οποίο έλαβε χώρα κατά τις έρευνες τρισδιάστατης θαλάσσιας σεισμικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκαν από τα ΕΛΠΕ το 2016. Ο μεγάλος όγκος καταγραφών σεισμικού θορύβου, προσέφερε την δυνατότητα να μελετηθεί ο μηχανισμός εξασθένησης των σεισμικών παλμών σε μεγάλες αποστάσεις. Ταυτόχρονα, η εκτεταμένη παρακολούθηση του περιβάλλοντος θορύβου, τόσο πριν όσο και μετά από τις σεισμικές έρευνες, έδωσε την ευκαιρία, για πρώτη φορά στην περιοχή, να μελετηθεί το ύψος του ανθρωπογενούς θορύβου σε σύγκριση με του αντίστοιχου βιογενούς, με την καταγραφή μηχανικών ωχλήσεων αλλά και ήχων νηριτικών και βενθικών οργανισμών.

Introduction

Hellenic Petroleum S.A. has undertaken a Marine Seismic Survey (MSS) in West Patraikos Gulf waters in Greece between January and February 2016. The MSS included acquisition of 3D seismic data from the Polar Empress R/V (Dolphin Geo). The purpose of this MSS was to better describe subsurface geology within the area and more accurately define potential prospective petroleum targets for exploration drilling. An Exclusion Zone of 750 m around the sound source, has been determined based on mathematical modelling, and monitored using the ACCOBAMS protocol [1], to ensure that noise levels were within the designated limits and to avoid adverse effects to marine mammals.

Impacts of man-made energy on the marine environment are related to the prevalence and timing of any activity as well as the distribution and abundance of sensitive marine life. For instance, in the case of offshore commercial operations, shipping activities, energy exploration and pile driving add noise to the already established ambient noise levels. Attention has been raised to the topic of underwater noise and its effects on marine life. Yet, the effects of underwater noise are not fully understood. One reason for this is that only for a few species of mammals and fish, tests have been performed to identify hearing range and sensitivity and yet it is not sure how they react or what damage will be done to them. However, loud impulse noise and ambient (continuous) noise should be distinguished. The disturbance from shipping (from fishing, recreational and liner vessels) lies in particular in the fact that the noise input from these activities can be continuous and persistent in time. On the other hand, loud impulse sounds may instantly be more potentially harmful but they usually last for just some days (e.g. seismic surveys or pile driving). If the dedicated environmental protocols are followed, (e.g. soft start, exclusion zone etc. as in JNCC [2]) then the effects on marine life can be minimized. To accomplish this, the adoption of the European Marine Directive (MSFD 2008/56/EC - Descriptor 11) has given a great impulse to the research in this field and governments, companies and institutes have already performed a great amount of studies on the topic [3-6]. Those studies have formed the guidelines and have set the protocols for performing safer offshore operations, which are adopted by the major energy companies. To ensure that the level of noise disturbance on the marine environment caused by offshore industrial and seismic survey operations is within the nominated limits, strict acoustic noise monitoring surveys are compulsory.

In the case of the MSS in West Patraikos Gulf waters, acoustic monitoring data have been recorded during three monitoring phases: 1) prestart, 2) seismic survey and 3) post completion so as to compare the soundscape before, during and after the seismic survey. Passive acoustic monitoring has been realized through spot measurements with drifting hydrophones [7] on a frequent schedule, which lasted for about 1.5 month, collecting more than 130 hours of raw underwater sound recordings from 4 pre-specified areas. Dense sound recordings were acquired and processed from as close to the seismic source to as far as possible away from it and sound pressure levels were estimated using all standardized metrics. It was verified that, in all cases, the seismic noise was well below the nominated limits. What was equally intriguing to investigate though, is the ambient noise monitoring data, as they were able to give greater insight into the footprints of the anthropogenic and biogenic factors on the local soundscape.

1. Study area

The zone where the 3D seismic survey took place in West Patraikos Gulf covers an area of 1892 km², with a mean and maximum sea depths of 158 m and 466 m respectively (Figure 1.1). It supports a diverse marine mammal fauna, including several species listed by IUCN as endangered or vulnerable. In addition, the survey area is in proximity to four Marine Protected Areas (MPAs), designated as Natura 2000 sites, that are almost completely surrounding it, thus making a strict seismic noise monitoring plan close to their boundaries essential.

Four locations and specifically along the coasts of Ithaki, Atokos, Modi and Oxia islands, were monitored using portable hydrophones, for all the phases of the project. Those locations are situated at the outer limits of the MPAs at the Northern extent of the survey area.

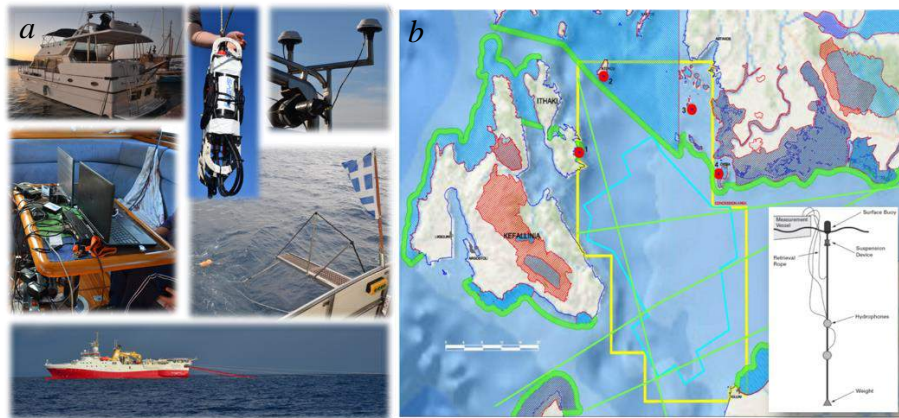


Figure 1.3 (a) Photographs from the monitoring and seismic vessels and the equipment used for the acoustic noise monitoring. (b) Map showing the 3D seismic survey area (cyan polygon), the extents of the MPAs (green polygons) and the 4 locations (red dots) where spot acoustic measurements took place: 1) Ithaki, 2) Atokos, 3) Modia, 4) Oxia.

2. Materials and methods

2.1 Equipment

Two pre-calibrated EA-SDA14 (RTsys) compact embedded recorders, able to connect to up to four hydrophones each were rented. Their broadband analog inputs allow over 500 kHz bandwidth with a dynamic range greater than 100 dB, guaranteeing efficient signal to noise ratios. Recorders came with 2 hydrophones each, a high sensitivity (170 dB dynamic range with 215 dB sensitivity) and a low sensitivity one (215 dB dynamic range with 170 dB sensitivity). Both channels were recorded at 24 bits, with a sampling frequency of 78,125 Hz. Using dual sensitivity hydrophones guaranteed that all dynamic ranges and amplitudes were successfully recorded without any signal clipping. All hydrophones were thoroughly calibrated by

RTsys to be compatible with all international regulations. Apart from the recording units and hydrophones, the research vessel was also equipped with a Hemisphere VS101 GPS, to acquire accurate positioning data in real time.

2.2 Sound pressure level metrics

Noise sound pressure levels (SPLs) have been estimated regarding the zero to peak (SPL_{peak}), peak to peak (SPL_{p-p}) and root mean square (SPL_{rms}) definitions, as well as the sound exposure level (SEL), all integrated for 1s durations. All above SPL metrics have also been examined as a function of sound frequency components and specifically using a total 30 third-octave bands (from 16 to 20,000 Hz center bands), according to the standard ANSI S1.6-1984 formula [8]. Finally, power spectrum densities (PSD) have been estimated using the Welch's method [9], being the power in the signal per 1Hz unit frequency integrated over a duration of 30 s. To meet the above estimations in an automated fashion, a suite of MATLAB codes has been implemented to perform analysis and reporting of the acquired acoustic data.

2.3 Ambient noise monitoring

The ambient noise monitoring program was divided in two distinct stages, the pre-start and the post-end, each lasting for about 10 days of sound recordings. This was to compare any differences that might have occurred in the natural soundscape of the area before and after the 3D seismic survey. Realization of spot measurements, spanning wide spatiotemporal scales, has been decided to be the most cost effective and efficient approach for the acoustic monitoring survey. More precisely, instead of mooring several hydrophones at the monitoring stations for the full survey period, the monitoring research vessel changed locations between the specified station locations in a daily schedule, performing spot acoustic noise measurements. For each station the research vessel turned off the engines to avoid any mechanical acoustic noise and deployed the underwater recording unit at 20m water depth to uninterruptedly acquire sound data for 3 to 6 hours. In each deployment the vessel was left drifting in the winds and the sea currents, hardly stabilized by using a floating anchor. Whenever the vessel had drifted far from the intending position, correction movements were realized, the time and duration of which were noted in the logbook to be excluded from the post-survey analysis. More than 70 hours of raw data recordings have been acquired during the pre-start and post-end ambient noise monitoring stages.

2.4 Seismic noise monitoring

Spot measurement have also been realized for the needs of the seismic noise monitoring stage, which lasted 22 days. The recording schedule had been carefully planned in accordance to the prespecified survey-lines pattern of the seismic vessel, so that at the end of the seismic survey, dense acoustic noise monitoring data would have been acquired from as close as possible to the seismic source (900 m) to as far as possible away from it (60 km). During the seismic noise monitoring phase, the navigational data of the seismic vessel were sent to the acoustic data processing team in a daily fashion after a valid exchange data format had been agreed. Those data included time stamped positions of the seismic vessel, for time intervals that airgun

shots occurred. More than 60 hours of raw seismic noise sound recordings have been acquired during the seismic noise monitoring stage.

Transient sounds (pulses) were detected automatically for which their 90% pulse energy duration was estimated. A peak detector to the RMS smoothed signal was first applied to locate each airgun impulse and then the 5% - 95% rise time period of the cumulative squared signal estimated (Figure 2.1). For this duration all sound pressure level metrics, as described in paragraph 2.2, have been estimated and analyzed as a function of distance and bearing to the seismic source.

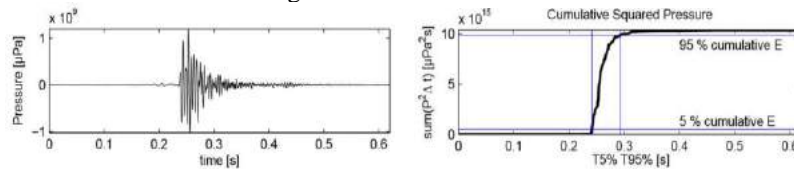


Figure 2.1 Schematic representation of the seismic transient sound detector.

2.5. Monitoring the exclusion zone

Monitoring the exclusion (mitigation) zone around the seismic vessel ($900\text{m} < d < 3,000\text{m}$) was a challenging task, both regarding the field-work planning as well as the data processing queue. The research vessel deployed the sound recorder at 20m depth, standing in positions agreed with the navigation team of the seismic vessel, as the latter was approaching executing its prearranged 3d seismic survey lines. Attention has been paid so that sound measurements were obtained from both the forward and broadside directions relative to the fore-aft axis of the air-guns. Each recording station lasted for about 30 to 40 minutes. Vessel engines were set on for retaining the desired position as well as for safety reasons. For that, a high pass filter over 50Hz was applied to the sound data to remove any self-noise components. As in the seismic noise monitoring stage, the navigational data of the seismic vessel were sent to the data processing team in a daily fashion. In order to study the attenuation of impulse (transient) sounds around the seismic source, the relative position of the monitoring vessel and each emitting airgun was estimated, putting the seismic sources at the center and converting the Cartesian coordinates to polar.

3. Results

3.1 Seismic noise

Spot measurements with drifting hydrophones, apart from being cost effective, it has proven to be a very efficient means for seismic noise monitoring. It holds the advantage of retrieving acoustic data not only from an isolated position but also from a buffer around it, making the estimated SPLs more statistically representative. Following carefully planned recording agendas, in regard to the seismic vessel's prearranged daily survey-lines, spatially dense acoustic data have been managed to be acquired. This practically replaces the need for moored hydrophones, minimizing at the same time the required equipment items, increasing the spatial coverage of the measurements and increasing the flexibility of the monitoring team in terms of service capacity. Figure 3.1.a presents the high spatial density of the seismic impulses that

have been recorded from the Modia station, that lead to an almost continuous SPL vs distance graph (Figure 3.1.b).

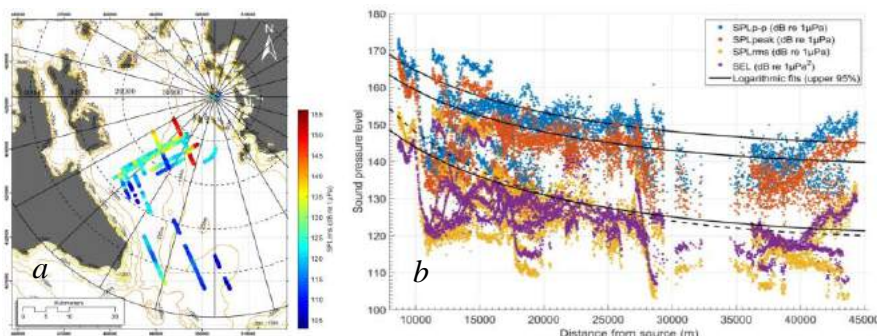


Figure 3.1 a) Spatial density of seismic pulses for Oxia station and b) seismic SPL vs distance to the seismic source.

It was clearly shown that the exclusion zone of 750 m around the seismic vessel was well determined, as it received SPLs less than 200 db re 1 μPa, far below the nominated limits for temporary or permanent hearing loss of marine mammals (Figure 3.2.a). This result is in good agreement with the modeled by D’Apollonia transmission loss in the exclusion zone, which was used for the exclusion zone determination. The latter was a worst-case scenario, quite above the actual measurements (Figure 3.2.b).

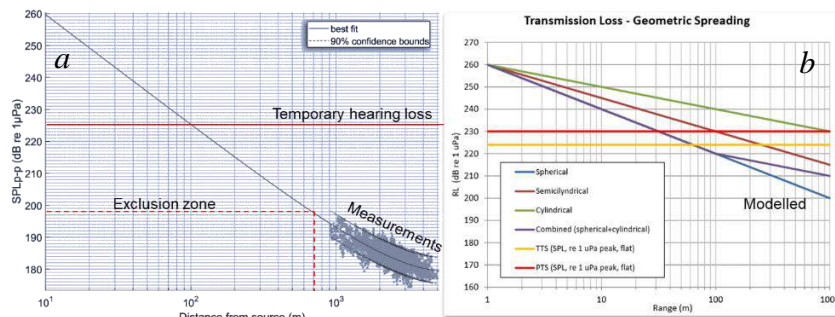


Figure 3.2 Schematic representation of the seismic transient sound detector.

Apart from the core seismic noise monitoring results, some other intriguing findings were extracted from the collected seismic monitoring data. Those include the attenuation and frequency modulation of the seismic impulses in regard to their distance to the seismic source as well as the effect of bathymetry on the transmitted seismic pulses. Towards that, Figure 3.3.a shows the spectrogram of the acoustic noise as the seismic vessel approaches the recorder, exhibiting clear increase of both the mechanical noise of the vessel and the seismic impulse levels. Figure 3.3.b shows the third- octave bands of each individually detected seismic impulse, with distance to the seismic vessel. The frequency modulation of the seismic impulses seems to be towards losing both its low but mostly its higher frequency components, which is also clear in

their corresponding spectrograms. On the other hand, given that the reflected component of each airgun sound on the seafloor is what controls its direction and intensity of propagation, in Figure 3.4 a demonstration of how loud seismic pulses are in regard to the topographic profile below the seismic vessel is provided.

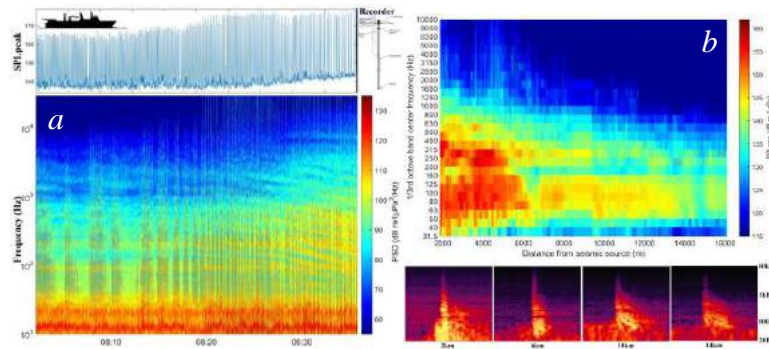


Figure 3.3. a) Spectrogram of the acoustic noise as the seismic vessel approaches the recorder and b) 1/3 octave bands of each individually detected seismic pulse with distance to the seismic vessel and corresponding spectrograms.

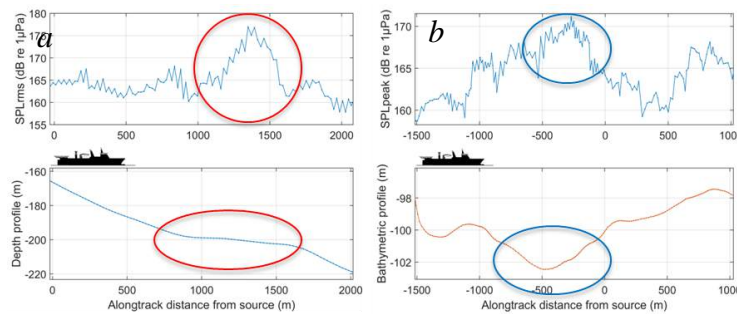


Figure 3.4. The effect of the bathymetric profile on the recorded seismic noise along the axis of the seismic vessel.

3.2 Anthropophony and Biophony of the ambient soundscape

The soundscape in West Patraikos was analyzed during the ambient noise monitoring phases. It was realized that the anthropophony of the area is dominated by fishing and liner passenger vessels, as well as sea-farm coastal noises. Figure 3.5.a shows a characteristic spectrogram of a liner ship passing about 4 km away from Oxia station, while Figure 3.5.b provides a comparison of SPLrms between the ambient noise, the seismic activity (integrated over time unit or detected impulse) and the traffic in the same area. It is clear that the traffic noise adds on average 20 dB to the ambient noise while the seismic pulses adds about just 10 dB more. Integration per time unit (1s) over the full seismic activity period, resulted in 10 dB less than the traffic noise equivalent.

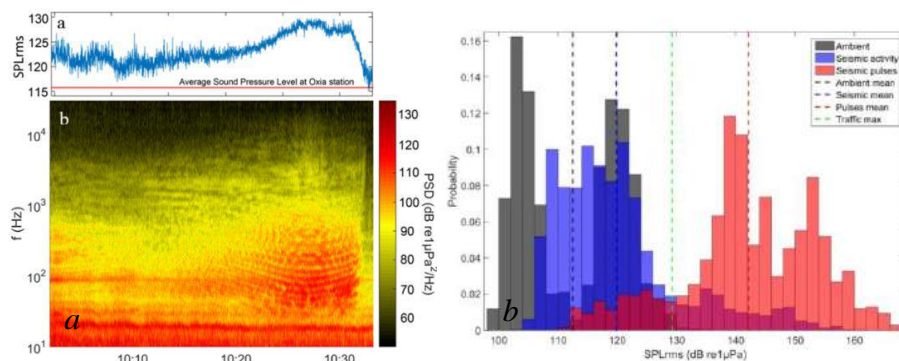


Figure 3.5. a) Noise from a liner ship and b) Comparison between ambient, traffic and seismic noise.

Fortunately, biophony was also a strong component of the soundscape in the area. Crustaceans produced their characteristic click sounds, mostly produced by snapping shrimps, and dolphin whistles were recorded in a dozen of instances (Figure 3.6.a). Measuring benthic habitats through passive acoustics is a popular scientific topic nowadays [5,6] and drifting hydrophones could potentially greatly aid towards quantitative habitat mapping, as demonstrated in [7] and implied in the high SPLs over the reef in Figure 3.6.b.

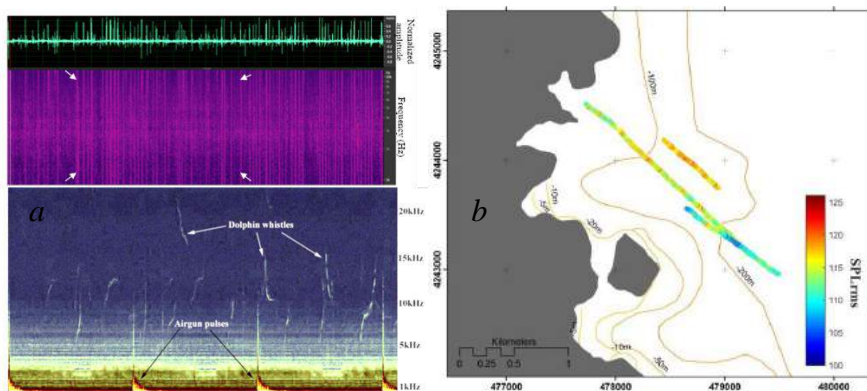


Figure 3.6. a) Snapping shrimps and dolphin whistles and b) high SPLs over a reef.

4. Conclusion

The data collected, and the methods used for the seismic and ambient noise monitoring during the MSS in West Patraikos Gulf, were proved to be important both for investigating the induced seismic noises as well as other anthropogenic disturbances that dominate the soundscape of the area. The seismic monitoring results showed a very good agreement between the modelled and the recorded SPLs in the exclusion zone. The seismic noise was proved to have always been lower than the nominated limits, especially outside the exclusion zone but it was also realized that

the ambient soundscape of west Patraikos Gulf experiences quite high and insistent anthropogenic disturbances. Other interesting findings regarded: 1) the complexity under which the seafloor topography affects seismic pulse SPLs, 2) the change of the sound frequency content of the seismic pulses as a function of distance from the seismic source and 3) the diversity of anthropophony and biophony in West Patraikos, spanning from dolphin whistles and snapping shrimps, to “deafening” liner ships and sea farm noise. The above findings need to be supplemented by ecoacoustic indices and acoustic modelling techniques to be fully understood and quantitatively analyzed.

5. References

- [1] ACCOBAMS, “Cetaceans of the Mediterranean and Black seas,” *G. Notarbartolo di Sciara (Ed.), Cetaceans Mediterr. Black Seas state Knowl. Conserv. Strateg. A Rep. to ACCOBAMS Secr. Monaco, Febr. 2002*, p. Section 14, 7p. (2002).
- [2] JNCC, “Guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys, August (2017)
- [3] OSPAR, “Assessment of the environmental impact of underwater noise 2009,” *Comm. Rep.*, vol. Biodiversi, pp. 1–44, (2009)
- [4] N. D. Merchant, K. M. Fristrup, M. P. Johnson, P. L. Tyack, M. J. Witt, P. Blondel, and S. E. Parks, “Measuring acoustic habitats,” *Methods Ecol. Evol.*, **6**, no. 3, pp. 257–265, (2015).
- [5] P. Blondel and A. A. Z. Hatta, “Acoustic Soundscapes and Biodiversity-Comparing Metrics, Seasons and Depths with Data from the NEPTUNE Ocean Observatory offshore British Columbia,” in *UACE2017 - 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, 2017, pp. 763–768. (2017)
- [6] D.M. Wisniewska, L.A. Kyhn, J.Tougaard, M. Simon, Y.T Lin, A. Newhall, K. Beedholm, J.F. Lynch “*Propagation of airgun pulses in Baffin Bay 2012*”. Scientific Report from Danish Centre for Environment and Energy (2014)
- [7] A. Lillis, F. Caruso, T. A. Mooney, J. Llopiz, D. Bohnenstiehl, and D. B. Eggleston, “Drifting hydrophones as an ecologically meaningful approach to underwater soundscape measurement in coastal benthic habitats,” *J. Ecoacoustics*, vol. 2, p. STBDH1, 2018.
- [8] ANSI S1.6 : 1984 “*Preferred frequencies and filter band center frequencies for acoustical measurements*” Acoust. Soc. Am., (1984)
- [9] Welch, P. D. “The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, AU-15 (2), pp. 70–73 (1967)

Ειδικός ακουστικός σχεδιασμός για την αντιμετώπιση κραδασμών από μετασχηματιστές σε υπόγειο κτιρίου γραφείων

Θεόδωρος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός
Σύμβουλος Ακουστικής
στην ΑΛΦΑ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΕ.
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 τη μελέτη, την αξιολόγηση, καθώς και την αντιμετώπιση των κραδασμών που δημιουργούνται από τη λειτουργία μετασχηματιστών στο υπόγειο κτιρίου γραφείων στην Αθήνα. Πρωταρχικό στάδιο για την εκτίμηση και διερεύνηση του προβλήματος αποτέλεσε η αρχική μέτρηση κραδασμών. Στη συνέχεια ακολούθησε ο σχεδιασμός ειδικού συστήματος αντικραδασμικής προστασίας, η αποτελεσματικότητα του οποίου διαπιστώθηκε με μία σειρά μετρήσεων κραδασμών μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των μεθόδων εντοπισμού και περιορισμού του κτυπογενούς θορύβου που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες άνεσης των εργαζομένων σε κτίρια γραφείων αλλά και την ακουστική άνεση των πλησιέστερων στην ηχητική πηγή κατοικιών.

Specialised antivibration system design for mechanical equipment's vibration isolation in an office building

ABSTRACT

The study is concerned with the estimation and control of vibration caused by transformers located at the basement of an office building in Athens Greece. After thorough examination and on-site measurements of the vibration, we proceeded to design a specialized antivibration system the efficiency of which was estimated by a post-implementation set of measurements.

The scope of this paper is to investigate methods of tracking and eliminating vibrations transmission that has a very significant effect not only on employees health and ability to work in an office building but also to the nearest residences acoustic comfort.

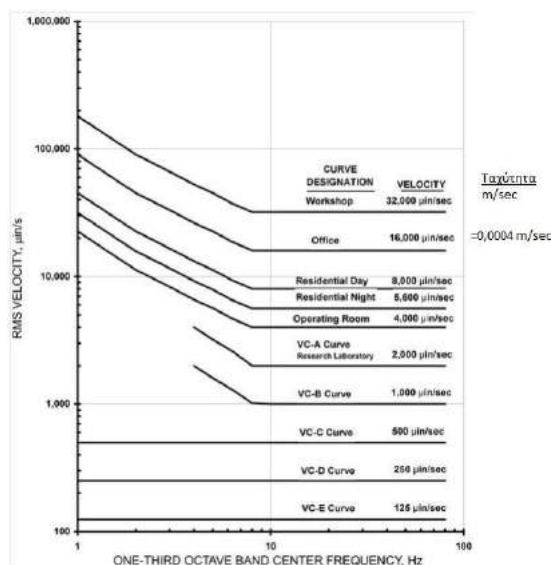
Εισαγωγή

Η εργασία αυτή αφορά τη μελέτη, την αξιολόγηση, καθώς και την αντιμετώπιση των κραδασμών που δημιουργούνται από τη λειτουργία μετασχηματιστών στο υπόγειο κτιρίου γραφείων στην Αθήνα.

Πρωταρχικό στάδιο για την εκτίμηση και διερεύνηση του προβλήματος αποτέλεσε η αρχική μέτρηση κραδασμών. Στη συνέχεια ακολούθησε ο σχεδιασμός ειδικού συστήματος αντικραδασμικής προστασίας, η αποτελεσματικότητα του οποίου διαπιστώθηκε με μία σειρά μετρήσεων κραδασμών μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των μεθόδων εντοπισμού και περιορισμού του κτυπογενούς θορύβου που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις συνθήκες άνεσης των εργαζομένων σε κτίρια γραφείων αλλά και την ακουστική άνεση των πλησιέστερων στην ηχητική πηγή κατοικιών.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και λόγω της μέχρι τώρα έλλειψης θέσπισης Νομοθετημένων ορίων κραδασμών σε κτίρια με στόχο την ακουστική άνεση στις πλησιέστερες κατοικίες, χρησιμοποιήθηκε το εγχειρίδιο «ASHRAE-HANDBOOK-Sound and Vibration Control» [1], καθώς και το πρότυπο DIN 4150-2[3].

1. Βασικές πληροφορίες από τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα



Σχήμα 1.4. Διάγραμμα ορίων ταχύτητας κραδασμού ανάλογα με χρήση του κτιρίου[1]

Στο εγχειρίδιο της ASHRAE, τα κριτήρια για τους κραδασμούς διαμορφώνονται ανάλογα με την ανθρώπινη απόκριση στον κραδασμό, τα επίπεδα του κραδασμού στο κτίριο και την ένταση του κραδασμού του μηχανήματος. Στο κεφάλαιο 48, «NOISE AND VIBRATION CONTROL», προτείνεται η χρήση συγκεκριμένων ορίων (τιμών ταχύτητας μετρούμενων σε ζώνες τριτοοκταβικών συχνοτήτων) ανάλογα με τη χρήση

του κάθε κτιρίου, όπως φαίνεται στην Σχήμα 1.4. Τα όρια αυτά βασίζονται σε οδηγίες που αναφέρονται στα πρότυπα ANSI S2.71-1983 και ISO Standard 2631-2.

Επίσης, στο πρότυπο DIN 4150-2, συμπεριλαμβάνεται η μεθοδολογία αξιολόγησης της κλίμακας των δονήσεων έκθεσης των ατόμων, και ορίζονται οι ανώτερες τιμές στιγμιαίας σταθμισμένης ταχύτητας ταλάντωσης δόνησης ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου, όπως φαίνονται στην Εικόνα 1.2.

	Χαρακτηρισμός της θέσης της κατοικίας	Ημέρα (6:00 – 22:00 ώρα)			Νύχτα (22:00 – 6:00 ώρα)		
		A_{min}	A_{max}	A_v	A_{min}	A_{max}	A_v
		[mm/s]					
1	Αποκλειστικά βιομηχανικές περιοχές (Μόνο κατοικίες για την εξυπηρέτηση των αναγκών του βιομηχανικού στοιχείου (φύλακες, διοικητικό προσωπικό κλπ.)	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Κυρίως βιομηχανικές περιοχές	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Περιοχές, που το βιομηχανικό στοιχείο είναι ίσο με το αστικό	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Κυρίως ή αποκλειστικά αστικές περιοχές	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Θέσεις, που χρήζουν προστασίας (νοσοκομεία, σανατόρια κλπ.)	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

Όπου:

A_{min}

A_{max}

A_v

$v(t)$

ελάχιστο όριο στιγμιαίας σταθμισμένης ταχύτητας ταλάντωσης δόνησης
 μέγιστο όριο στιγμιαίας σταθμισμένης ταχύτητας ταλάντωσης δόνησης
 μέγιστο όριο μέσης σταθμισμένης ταχύτητας ταλάντωσης δόνησης για χρόνο αξιολόγησης: α) ημέρα (6:00 – 22:00 ώρα), β) νύχτα (22:00 – 6:00 ώρα)
 ταχύτητα ταλάντωσης δόνησης, μετρούμενο μέγεθος (χωρίς στάθμιση), $v_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

Σχήμα 1.2 Όρια ταχύτητας κραδασμού ανάλογα με χρήση του κτιρίου με βάση το πρότυπο DIN 4150

2. Μεθοδολογία μέτρησης κραδασμών

Οι μετρήσεις κραδασμών έγιναν με εξειδικευμένο μετρητικό σύστημα μέτρησης κραδασμών (το οποίο ικανοποιεί το διεθνές πρότυπο ISO 8041:2005). Πραγματοποιήθηκε χρονική καταγραφή των κραδασμών με και χωρίς τη λειτουργία της πηγής κραδασμικής διέγερσης (2 μετασχηματιστές στο υπόγειο του κτιρίου) με σκοπό τη συγκριτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων πριν και μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αντικραδασμικής προστασίας.

Το μετρητικό όργανο κατέγραψε τους κραδασμούς ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες, X, Y (οριζόντιοι άξονες) και Z (κατακόρυφος άξονας). Για την πιο στοχευμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται οι καταγραφές μόνο της μετρηθείσας ταχύτητας κραδασμών (m/s) όπως αυτές μετρήθηκαν στον κατακόρυφο άξονα Z.

Πίνακας 1.1 Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις δονήσεων

Όργανο μέτρησης	SVAN 958 Four Channel Analyser according to IEC 61672
Αισθητήρες μέτρησης	SV 207A_SO Building Vibration Measurement Set (3233A, SC242). Triaxial accelerometer 100 mV/g sensitivity
Λογισμικό επεξεργασίας σημάτων δονήσεων	SvanPC++ ver. 1.4.6

Οι μετρήσεις πριν τις επεμβάσεις, έγιναν σε απόσταση 1 μέτρο εξωτερικά του τοίχου του χώρου όπου βρίσκονται οι μετασχηματιστές στο υπόγειο του κτιρίου επί της οδού Κηφισίας 280.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η μέση καταγραφή της τιμής της μετατόπισης (displacement), της επιτάχυνσης και της ταχύτητας λόγω κραδασμών στον κατακόρυφο άξονα z.

Πίνακας 2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων δονήσεων πριν τις επεμβάσεις

α/α	Μέση Καταγραφόμενη Μετατόπιση (mm)	Μέση Καταγραφόμενη Επιτάχυνση (mm/sec ²)	Μέση Ταχύτητα (mm/sec)	Σχόλια/Παρατηρήσεις
1	0,295	545,9	15,5	Μετασχηματιστές εντός κανονικής λειτουργίας
2	0,039	510,2	14,49	Μετασχηματιστής 1 εκτός λειτουργίας Μετασχηματιστής 2 εντός κανονικής λειτουργίας
3	0,024	297,3	8,5	Μετασχηματιστής 1 εντός λειτουργίας Μετασχηματιστής 2 εκτός κανονικής λειτουργίας
4	0,018	18,3	0,52	Μετασχηματιστές εκτός λειτουργίας

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αρχικών μετρήσεων, κρίθηκε αναγκαίο να ληφθούν αντικραδασμικά μέτρα προστασίας για την αντιμετώπιση των κραδασμών, καθώς παρουσιάστηκε μια αυξημένη στάθμη κραδασμών. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρήσαμε τα εξής:

Υπαρξη κραδασμικής έντασης κατά τη διάρκεια λειτουργίας των μετασχηματιστών, η οποία υπογραμμίζεται από την καταγραφή υψηλών μετατοπίσεων στις χαμηλές συχνότητες (0,8-1 Hz) και υψηλές επιταχύνσεις που φτάνουν ακόμα και τα 838mm/sec².

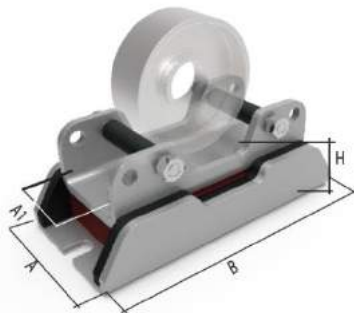
Οι κραδασμοί μειώνονται σε μικρό ποσοστό όταν ο μετασχηματιστής 1 είναι εκτός λειτουργίας, αλλά μειώνονται σε αξιόλογο βαθμό όταν ο μετασχηματιστής 2 είναι εκτός λειτουργίας. Αυτό μπορεί να προκύπτει λόγω κάποιας ηχογένεφρας που μεταδίδει τον παραγόμενο κραδασμό στο δάπεδο του κτιρίου. Η μέγιστη διαφορά όπως ήταν αναμενόμενο καταγράφεται όταν και οι δύο μετασχηματιστές είναι εκτός λειτουργίας.

Πρέπει ακόμα να τονιστεί πως παρατηρήθηκε υπέρβαση του ορίου όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω (εγχειρίδιο της ASHRAE και DIN 4150) όταν ο μετασχηματιστής είναι σε λειτουργία. Για την ακρίβεια καταγράφεται μέση ταχύτητα 15,5mm/sec ενώ το όριο είναι 4mm/sec σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ASHRAE και 5mm/sec με βάση το DIN 4150.

3. Μέτρα αντικραδασμικής προστασίας

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των κραδασμών από τη λειτουργία των μετασχηματιστών, προχωρήσαμε στον σχεδιασμό και την δημιουργία ενός νέου, ειδικού αντικραδασμικού κατάλληλου για ηλεκτρικούς μετασχηματιστές με την τεχνολογία του κυλίνδρου μεταφοράς.

Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μία αντικραδασμική βάση που προτείνεται να τοποθετηθεί στα σημεία έδρασης του κάθε μετασχηματιστή, ενδιάμεσα της πλάκας σκυροδέματος (πάνω στην οποία ήταν αρχικά εδρασμένοι οι μετασχηματιστές) και των μετασχηματιστών, με σκοπό την απορρόφηση των κραδασμών στον μέγιστο βαθμό. Η βάση αυτή περιλαμβάνει δύο μεταλλικά προφίλ, και ανάμεσα τους παρεμβάλλεται ελαστομερές στοιχείο που αποτελείται από υψηλής ποιότητας αφρό πολουρεθάνης. Στο πάνω τμήμα του διαθέτει δύο οριζόντιους άξονες επενδυμένους με ελαστικό (αποφυγή ηχογένεφρας) για την εξασφάλιση της αποφυγής ολίσθησης του κυλίνδρου μεταφοράς. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η βέλτιστη απορρόφηση των κραδασμών. Παράλληλα όμως προσφέρεται και προστασία του μετασχηματιστή από οριζόντιες μετατοπίσεις από εξωγενείς παράγοντες (σεισμική διέγερση κλπ)



Σχήμα 3.1. Τρισδιάστατη απεικόνιση της αντικραδασμικής βάσης που τοποθετήθηκε στην έδραση των μετασχηματιστών.

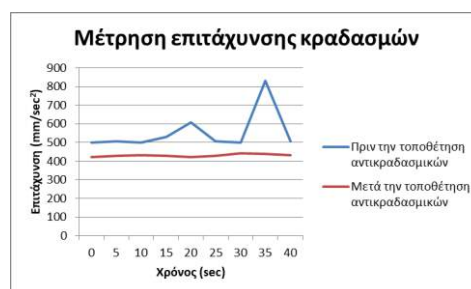
4. Αποτελέσματα μετρήσεων



Σχήμα 4.1. Μέτρηση των κραδασμών μετά την τοποθέτηση των αντικραδασμικών πελμάτων στη βάση του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.2. Λεπτομέρεια εφαρμογής τεσσάρων αντικραδασμικών πελμάτων στη βάση του μετασχηματιστή.



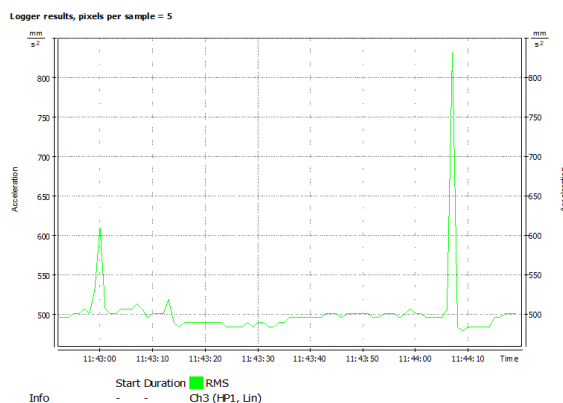
Σχήμα 4.3. Συγκριτικό διάγραμμα επιτάχυνσης κραδασμών πριν και μετά την τοποθέτηση αντικραδασμικών πελμάτων

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κραδασμών σε συγκριτικά διαγράμματα με και χωρίς τη λειτουργία της πηγής

κραδασμικής διέγερσης (μετασχηματιστές στο υπόγειο του κτιρίου), πριν και μετά την τοποθέτηση της αντικραδασμικής προστασίας.

Στη θέση αυτή πραγματοποιήθηκε μία συγκριτική μέτρηση κραδασμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, όπου μετρήθηκαν οι κραδασμοί που προέρχονται από τη λειτουργία των μετασχηματιστών.

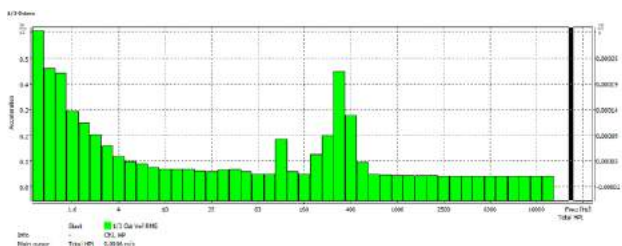
Η χρονική καταγραφή των κραδασμών (ως προς την επιτάχυνση στον άξονα Z) και η ανάλυση Fourier αυτών παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.4 (α) - (γ).



Σχήμα 4.4 (α)



Σχήμα 4.4 (β)



Σχήμα 4.4 (γ)

Γράφημα 4.4 : Χρονική καταγραφή μέτρησης κραδασμών στους μετασχηματιστές (α) πριν τη λήψη μέτρων αντικραδασμικής προστασίας στον άξονα Z, (β) μετά τη λήψη μέτρων αντικραδασμικής προστασίας στον άξονα Z, και Φασματική ανάλυση κραδασμών μετά τη λήψη μέτρων και (γ) της ταχύτητας στον άξονα z).

5. Συμπεράσματα

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, συμπεραίνουμε πως η λήψη των προταθέντων αντικραδασμικών μέτρων προστασίας συνέβαλε στη μείωση της στάθμης των κραδασμών και της στερεόφερτης μετάδοσης του θορύβου από τη λειτουργία των μετασχηματιστών.

Ιδιαίτερη ήταν η μείωση που παρατηρήθηκε στη μετατόπιση και στην ταχύτητα κραδασμών μετά την τοποθέτηση των αντικραδασμικών στη βάση των μετασχηματιστών.

Σε όλες τις μετρήσεις, μετά την υλοποίηση των αντικραδασμικών επεμβάσεων, η ταχύτητα RMS που μετρήθηκε ήταν μικρότερη από το κριτήριο που αναφέρεται στο εγχειρίδιο «ASHRAE-HANDBOOK-Sound and Vibration Control» και το DIN 4150.

6. Βιβλιογραφία

[1] ASHRAE “ASHRAE HANDBOOK – HVAC APPLICATIONS”, chapter 48 (2015)

[2] BS6472:1 -1992 “Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80 Hz)”

[3] Department of Environment and Conservation NSW, “Environmental Noise Management – Assessing vibration: A technical guideline”, NSW, Sydney, page 26 (2000)

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4: Επεξεργασία ομιλίας και λόγου

Διερεύνηση Τεχνικών Διπλής Συμπίεσης για την Ανίχνευση Παρουσίας Πολλαπλών Καταγραφών σε Αρχείο Ήχου

N. Βρύζας
Υπ.Δρ.
nvryzas@jour.auth.gr

A. Κατσαουνίδου
Υπ.Δρ.
akatsaounidou@gmail.com

P. Κωτσάκης
ΕΔΙΠ
rkotsakis@gmail.com

X. Δημούλας
Επικ.Καθηγητής
babis@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας είναι ο εντοπισμός διαφορετικών καταγραφών σε αρχεία ήχου που έχουν δημιουργηθεί από σύμπτυξη, ή εισαγωγή τμημάτων. Χρησιμοποιήσαμε αρχεία ήχου, τα οποία έχουν κωδικοποιηθεί με διαφορετικά πρότυπα (WAV, MP3, AAC), και με διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων / λόγους συμπίεσης. Τμήματα των αρχείων έχουν αντικατασταθεί από τα αντίστοιχα τμήματα διαφορετικής κωδικοποίησης, με τρόπο τυχαίο και αυτοματοποιημένο. Η μέθοδος που προτείνεται και εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι η εκ νέου συμπίεση / κωδικοποίηση του παραγόμενου αρχείου. Στα σημεία όπου έχει προηγηθεί απωλεστική συμπίεση και έχει ήδη χαθεί μέρος της πλεονάζουσας πληροφορίας, η απώλεια πληροφορίας λόγω της καινούργιας συμπίεσης θα είναι μικρότερη. Για κάθε παράθυρο παρατήρησης εξάγεται ένα διάνυσμα ηχητικών χαρακτηριστικών, τόσο από το αρχικό αρχείο πολλαπλών καταγραφών, όσο και από το διπλά συμπιεσμένο αρχείο και υπολογίζεται το διάνυσμα των διαφορών. Μέσω της παραγωγού του διανύσματος διαφορών, εντοπίζονται τα σημεία που δημιουργούνται τοπικά ακρότατα που ενδεχομένως υποδεικνύουν διπλή συμπίεση.

Investigation of Double Compression Techniques for the Detection of Multiple Recordings in Audio Content

ABSTRACT

The goal of the current work is the tracking of different recordings within an audio file that was created from audio slicing or inserting segments of different files. We used audio files encoded in different formats (WAV, MP3, AAC) and different bitrates / compression ratios. Several audio segments are replaced with the same segments with different encoding in an automated and random way. In the proposed method under investigation the resulting files are recompressed. In the inserted segments where lossy compression has already taken place, redundant information has already been lost, so the information loss caused by the new compression process should be smaller. For every time window, an audio-feature vector is extracted from both files, the initial/tampered file and the double compressed file and the differences vector is calculated. The derivative of this vector is used to find where local maxima/minima

are located, which possibly indicate the segments, where double compression has taken place.

Εισαγωγή

Οι τεχνικές επαλήθευσης της αυθεντικότητας ακουστικού περιεχομένου έχουν πρωτοπαρουσιαστεί ως κομμάτι της Ψηφιακής Εγκληματολογίας, και οι πρώτες τους εφαρμογές ήταν προσανατολισμένες στη διαμόρφωση σχετικών πορισμάτων [1]-[2]. Ωστόσο, οι συγκυρίες της παρούσας περιόδου έχουν διευρύνει το πεδίο εφαρμογών. Η ποιότητα και εγκυρότητα του συνεχώς αυξανόμενου όγκου πληροφορίας γίνεται όλο και πιο δύσκολο να ελεγχθεί, ενώ όλο και περισσότερο διανέμεται ψευδής ή κακόβουλα επεξεργασμένη πληροφορία. Οι φυσικές ιδιαιτερότητες του ήχου, καθώς και το γεγονός ότι αποτελεί μεγάλο κομμάτι αυτής της πληροφορίας, είτε αυτόνομα, είτε σε συνάρτηση με την εικόνα (βίντεο) καθιστά τη μελέτη τεχνικών επαλήθευσης της αυθεντικότητας σημαντικό πεδίο έρευνας.

Μια βασική προτεινόμενη κατηγοριοποίηση αυτών των τεχνικών είναι η κατάταξη τους σε τεχνικές που αφορούν τη μελέτη των χαρακτηριστικών του αρχείου ήχου, όπως μεταδεδομένα, περιγραφείς κλπ. και σε αυτές που αφορούν τη μελέτη του ηχητικού περιεχομένου (content-based techniques) [3], [4].

Τέτοιες τεχνικές μπορεί να περιλαμβάνουν την εξαγωγή του ίχνους της Συχνότητας Ηλεκτρονικού Δικτύου (Electronic Network Frequency – ENF), η οποία καταγράφεται ακούσια από τους ηλεκτρονικούς καταγραφείς ήχου [5]-[8]. Σε άλλες περιπτώσεις, γίνεται προσπάθεια απομόνωσης του ήχου περιβάλλοντος/ φόντου [9], [10]. Η συσκευή καταγραφής μπορεί επίσης να έχει διακριτό ίχνος, που οφείλεται στην απόκριση και τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για τον εντοπισμό σημείων παραποίησης μέσω της αναγνώρισης διαφορετικών μοντέλων μικροφώνων [3], [11]-[13].

Μία δημοφιλής οικογένεια τεχνικών ανίχνευσης παραποίησης περιεχομένου, με εφαρμογές τόσο στον ήχο, όσο και στην εικόνα [14] έχει ως αντικείμενο τον εντοπισμό διαφορετικών προτύπων συμπίεσης και κωδικοποίησης, που υποδεικνύουν την ασυνέχεια ενός αρχείου [15]-[21].

1. Διπλή συμπίεση και ανίχνευση πολλαπλών καταγραφών

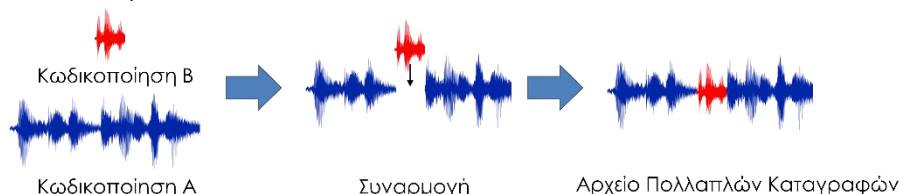
1.1 Παρουσία πολλαπλών καταγραφών διαφορετικής συμπίεσης σε αρχεία ήχου

Τα συνήθη πρότυπα κωδικοποίησης αρχείων ήχου (MP3, AAC) που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ήχου στην μαζική επικοινωνία και στο διαδίκτυο αξιοποιούν πρότυπα απωλεστικής συμπίεσης [15]. Η συμπίεση αυτή βασίζεται στη χρήση ψυχοακουστικών μοντέλων για την απόρριψη πλεονάζουσας ηχητικής πληροφορίας, με κριτήρια ακουστότητας. Μεγαλύτεροι λόγοι συμπίεσης οδηγούν σε μεγαλύτερη απόρριψη πληροφορίας, κάνοντας τη συμπίεση περισσότερο αντληπτή. Έχουν προταθεί βιβλιογραφικά τεχνικές αναγνώρισης της συμπίεσης ακόμη και σε περιπτώσεις που δεν είναι αισθητή από τους ακροατές αξιοποιώντας τη στατιστική συμπεριφορά ηχητικών χαρακτηριστικών [16]-[19] και εκπαιδεύοντας τοπολογίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων [20], [21].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, κατά τη συνένωση αρχείων διαφορετικών κωδικοποιήσεων, με διαφορετικούς λόγους συμπίεσης, προκύπτει ένα νέο αρχείο, το

οποίο έχει ενιαία κωδικοποίηση, αποτελείται όμως από τμήματα που έχουν υποστεί διαφορετικές συμπίεσεις στο παρελθόν.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση τεχνικών για τον εντοπισμό διαφορετικών καταγραφών, αξιοποιώντας τα ίχνη των διαφορετικών κωδικοποιήσεων.



Σχήμα 6 Συναρμογή δύο αρχείων διαφορετικής κωδικοποίησης σε ενιαίο αρχείο.

1.2 Μέθοδος διπλής συμπίεσης

Η μέθοδος που εφαρμόζεται και εξετάζεται πειραματικά είναι αυτή της διπλής συμπίεσης του υπό διερεύνηση αρχείου. Η ερευνητική υπόθεση στην οποία βασιζόμαστε είναι η εξής:

Η απώλεια ηχητικής πληροφορίας κατά την απωλεστική συμπίεση ενός αρχείου ή τμήματος αρχείου ήχου θα είναι μικρότερη όσο μεγαλύτερη απωλεστική συμπίεση έχει υποστεί το συγκεκριμένο αρχείο στο παρελθόν.

Με αυτή την αφετηρία, εργαζόμαστε ως εξής:

1. Εφαρμόζουμε στο υπό διερεύνηση αρχείο ήχου απωλεστική συμπίεση. .
2. Εξάγουμε τα διανύσματα ηχητικών χαρακτηριστικών με κάποιο παράθυρο παρατήρησης από το αρχικό και το ξανά συμπιεσμένο αρχείο που δημιουργήσαμε $X_i(t)$, όπου το $i=1,2$ αναφέρεται στα δύο αρχεία
3. Για κάθε χρονική στιγμή, υπολογίζουμε την Ευκλείδεια απόσταση των διανυσμάτων $D(t)$.
4. Υπολογίζουμε ως μέτρο της παραγωγού της χρονοσειράς $D(t)$ την καινούργια χρονοσειρά $D'(t)=D(t)-D(t-1)$.
5. Η $D'(t)$ θα εμφανίζει ακραίες τιμές στα χρονικά παράθυρα για τα οποία η απόσταση των διανυσμάτων ηχητικών χαρακτηριστικών $X_i(t)$ θα παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με το προηγούμενο παράθυρο παρατήρησης.

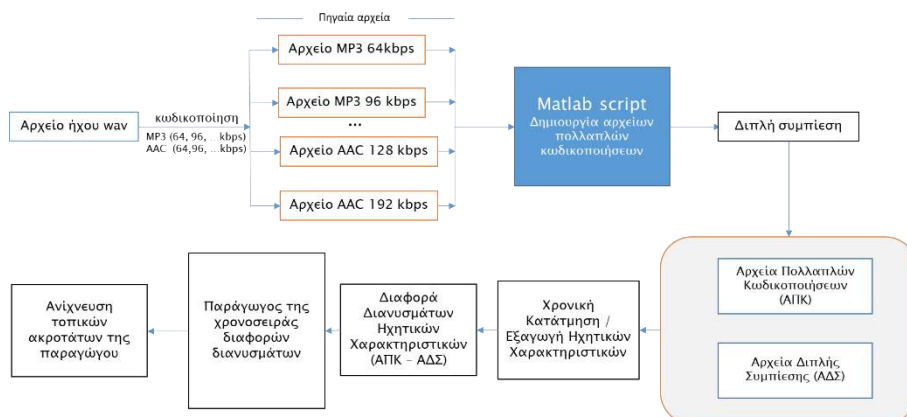
2. Πειραματική Διαδικασία

2. Δημιουργία βάσης δεδομένων και υλοποίηση της μεθόδου διπλής συμπίεσης

Ένα από τα βασικά προβλήματα στην έρευνα σχετικά με την αυθεντικότητα ηχητικού περιεχομένου είναι η έλλειψη βάσεων δεδομένων με επισημειωμένα αρχεία, αλλά και η δυσκολία δημιουργίας. Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, αξιοποιήσαμε μια διαδικασία αυτοματοποιημένης παραγωγής βάσης παραποιημένων αρχείων ήχου που έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα Matlab και διατίθεται δημόσια στο διαδίκτυο [19]. Δίνοντας ως είσοδο στην εφαρμογή πηγαία αρχεία ήχου, δημιουργεί καινούργια αρχεία που προκύπτουν από συναρμογή τμημάτων των πηγαίων αρχείων σε τυχαίες θέσεις.

Καθώς μας ενδιαφέρει η διερεύνηση της ανίχνευσης διαφορετικών κωδικοποιήσεων, χρησιμοποιήσαμε ως πηγαία αρχεία την ίδια ηχογράφηση με

διαφορετικές κωδικοποιήσεις και λόγους συμπίεσης. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τα πρότυπα MP3 (64,96,128,192kbps) και AAC (64,96,128,192kbps). Η ηχογράφηση που χρησιμοποιήθηκε είναι από το αρχείο του Εργαστηρίου Ραδιοηλεκτρονικής Παραγωγής του Τμήματος Δημοσιογραφίας και ΜΜΕ του ΑΠΘ. Χρησιμοποιώντας την ίδια ηχογράφηση εξασφαλίζεται ότι το περιεχόμενο της καταγραφής παραμένει σταθερό, οπότε εξετάζεται μόνο η περίπτωση εναλλαγής κωδικοποιήσεων.



Σχήμα 7 Μπλοκ Διάγραμμα της πειραματικής διαδικασίας που υλοποιεί τη μέθοδο διπλής συμπίεσης για την ανίχνευση πολλαπλών καταγραφών.

Με πηγαία αρχεία τη συγκεκριμένη ηχογράφηση κωδικοποιημένη σε όλα τα παραπάνω πρότυπα και μέσω της εφαρμογής, δημιουργήσαμε παραπονημένα αρχεία για κάθε συνδυασμό κωδικοποιήσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Έπειτα, εφαρμόσαμε διπλή συμπίεση στα παραπονημένα αρχεία, δημιουργώντας δύο σύνολα αρχείων: τα αρχικά παραπονημένα Αρχεία Πολλαπλών Κωδικοποιήσεων (ΑΠΚ) που έπειτα από την καινούργια συμπίεση δημιουργούν το σύνολο των Αρχείων Διπλής Συμπίεσης (ΑΔΣ).

Πίνακας 3 Διάνυσμα Ηχητικών Χαρακτηριστικών

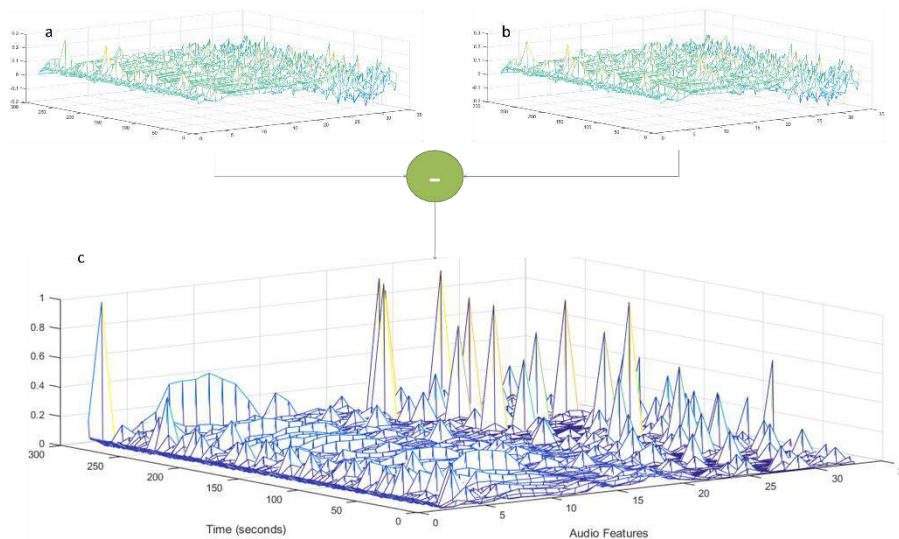
Time Domain Features	rms,zerocross
Frequency Domain Features	Bright _i , i=500,1000,1500,2000 Rolloff _i , i= 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9 Spectral Centroid, Spread, Skewness, Kurtosis, Flatness
Cepstral Domain Features	MFCC _i , i=1,2,...13

3. Εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών

Για κάθε ζεύγος αρχείων (ΑΠΚ και ΑΔΣ), έγινε εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών για μη επικαλυπτόμενα παράθυρα παρατήρησης μήκους ενός δευτερολέπτου. Το διάνυσμα ηχητικών χαρακτηριστικών για κάθε χρονική στιγμή διαμορφώθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Η επιλογή και αξιολόγηση των χαρακτηριστικών σε σχέση με την αποδοτικότητα τους για εντοπισμό ενδεχόμενης παραποίησης έχει τεκμηριωθεί πειραματικά στο [19].

Έπειτα από την εξαγωγή των διανυσμάτων ηχητικών χαρακτηριστικών για κάθε παράθυρο παρατήρησης, προκύπτει για κάθε αρχείο ήχου ένας διδιάστατος πίνακας που εκφράζει την εξέλιξη του διανύσματος για κάθε χρονική στιγμή.

4. Πειραματικά Αποτελέσματα

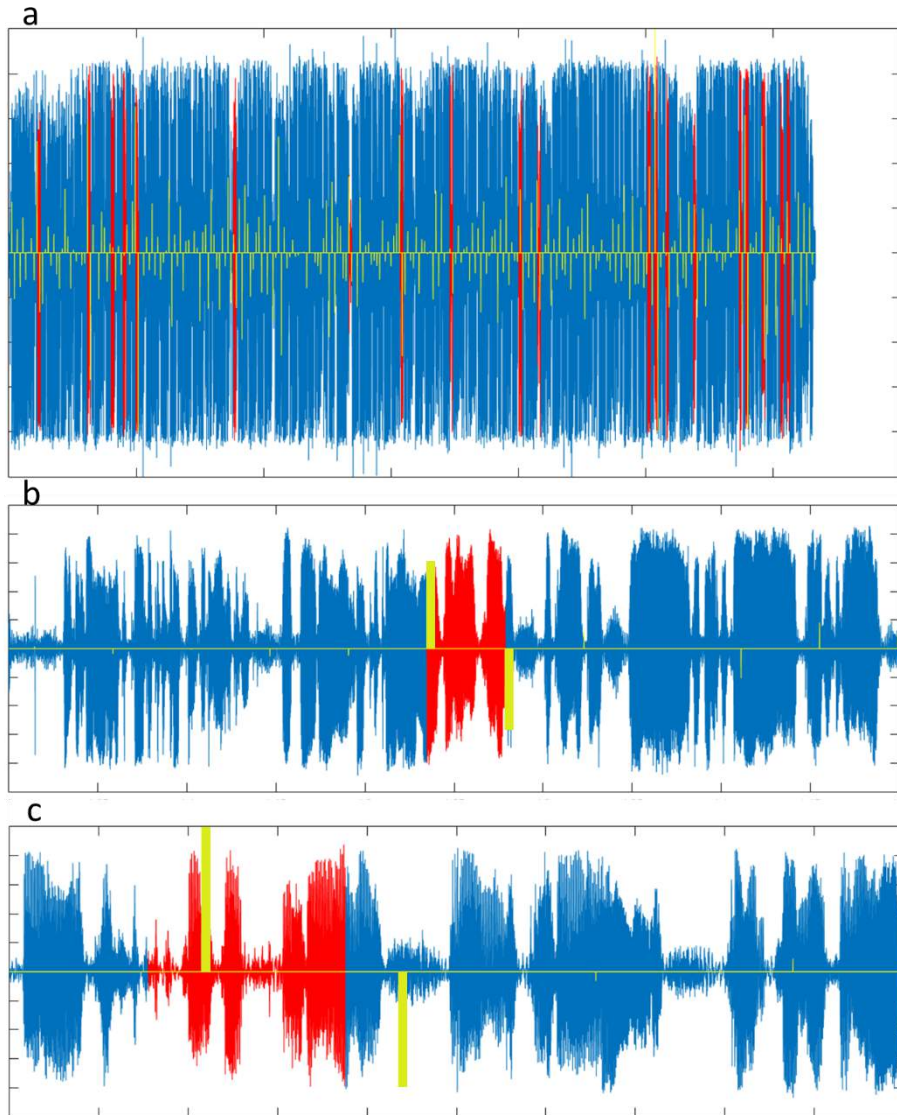


Σχήμα 3 Τρισδιάστατα πλέγματα που παρουσιάζουν την εξέλιξη του διανύσματος ηχητικών χαρακτηριστικών (a) του υπό διερεύνηση αρχείου, (b) του διπλά συμπιεσμένου αρχείου και (c) της διαφοράς τους..

Όπως παρουσιάζεται εποπτικά στο Σχήμα 3, υπολογίζουμε τη διαφορά των διανυσμάτων ηχητικών χαρακτηριστικών του υπό διερεύνηση αρχείου και του διπλά συμπιεσμένου αρχείου για κάθε χρονική τιμή. Ο διδιάστατος πίνακας που προκύπτει εκφράζει την απώλεια ηχητικής πληροφορίας κατά τη νέα συμπίεση, όπως εκφράζεται στα διάφορα ηχητικά χαρακτηριστικά για κάθε χρονική στιγμή.

Συγκεκριμένα ηχητικά χαρακτηριστικά και ομάδες ηχητικών χαρακτηριστικών παρουσιάζουν ακραίες τιμές για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι ακραίες τιμές εμφανίζονται στα παράθυρα όπου ανιχνεύονται καταγραφές με διαφορετικό ιστορικό συμπίεσης. Παρατηρούμε επίσης ότι τα ηχητικά χαρακτηριστικά που έχουν κυρίαρχο ρόλο δεν είναι σε κάθε περίπτωση τα ίδια. Σε κάθε περίπτωση, ακραίες τιμές εμφανίζουν τα ηχητικά χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν καλύτερα την ηχητική πληροφορία που χάθηκε κατά τη δεύτερη απωλεστική συμπίεση στο συγκεκριμένο σημείο.

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η λειτουργία της παραγώγου $D'(t)$ στην υπόδειξη πιθανών σημείων παραποίησης. Στο 4a παρουσιάζεται η παράγωγος για ολόκληρη την καταγραφή. Στο 4b παρουσιάζεται η ειδική περίπτωση όπου το παράθυρο παρατήρησης ενός δευτερολέπτου συμπίπτει με το σημείο παραποίησης με αποτέλεσμα να υποδεικνύεται το ακριβές σημείο.



Σχήμα 4 Υπολογισμός της παραγώγου $D'(t)$. Με μπλε χρώμα σημειώνεται το αυθεντικό αρχείο, με κόκκινο τα εμβόλιμα σημεία διαφορετικής κωδικοποίησης και με κίτρινο οι τιμές της $D'(t)$ για τις περιπτώσεις: (a) ολόκληρης της καταγραφής (b) εντοπισμού παραποίησης στην ειδική περίπτωση που το παράθυρο ελέγχου συμπίπτει χρονικά με το σημείο παραποίησης (c) στη γενική περίπτωση που το παράθυρο ελέγχου δε συμπίπτει χρονικά με το σημείο παραποίησης.

Στη χρονική στιγμή t που παρατηρείται διαφορετική κωδικοποίηση, η παράγωγος $D'(t)$ ισούται με τη διαφορά των αποστάσεων $D(t)-D(t-1)$. Εφόσον στο σημείο αλλαγής κωδικοποίησης θα είναι $D(t)>D(t-1)$ θα έχουμε ένα τοπικό θετικό μέγιστο. Στη χρονική στιγμή $t+1$ που τελειώνει η παρουσία διαφορετικής κωδικοποίησης, η απόσταση των διανυσμάτων αναμένεται μικρότερη και πάλι, δηλ. $D(t+1)<D(t) \Rightarrow D'(t+1)<0$. Πράγματι φαίνεται ότι με το πέρας του εμβόλιμου τμήματος εμφανίζεται μια αρνητική ακραία τιμή.

Στο σχήμα 4c παρουσιάζεται η γενική περίπτωση όπου το παράθυρο παρατήρησης δεν συμπίπτει με το σημείο παρατήρησης. Η διακριτική ικανότητα της μεθόδου εξαρτάται από το μήκος του παραθύρου. Υπάρχει ωστόσο πάντα ένα αντιστάθμισμα ανάμεσα στο μήκος του παραθύρου εξαγωγής ηχητικών χαρακτηριστικών (και άρα στη διακριτική ικανότητα της μεθόδου) και στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

5. Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά

Όπως σχολιάστηκε στην εισαγωγή, οι μέθοδοι ελέγχου αυθεντικότητας ηχητικού περιεχομένου ανταποκρίνονται στις διαφορετικές περιπτώσεις παραποίησης. Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η μέθοδος διπλής συμπίεσης για την περίπτωση εντοπισμού καταγραφών διαφορετικής κωδικοποίησης.

Η μέθοδος μπορεί να παρέχει εποπτικά εργαλεία στον αναλυτή σχετικά με τα πιθανά σημεία παραποίησης. Αποδεικνύεται ταυτόχρονα ότι η συμπεριφορά της παραγωγού D' των αποστάσεων διανυσμάτων ηχητικών χαρακτηριστικών του υπό διερεύνηση και διπλά συμπίεσμένου αρχείου φέρει πληροφορία σχετική με την πιθανότητα εισαγωγής τμήματος διαφορετικής κωδικοποίησης σε συγκεκριμένο σημείο. Κατά συνέπεια, είναι ένα μέγεθος που μπορεί να εξαχθεί σαν ηχητικό χαρακτηριστικό αρχείου ήχου για την εκπαίδευση συστημάτων μηχανικής μάθησης και νευρωνικών δικτύων «Βαθιάς Γνώσης» (Deep Learning), ώστε να αυτοματοποιηθεί σε επόμενο βήμα η διαδικασία, κα να ποσοτικοποιηθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

6. Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε μερικώς από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ), αρ.υποτρ.1900 (Ν.Βρύζας) και το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών ΙΚΥ (Α.Κατσαουνίδου).

7. Αναφορές

[1] R. Maher «Audio forensic examination.» *Signal Processing Magazine, IEEE* , **26**, pp 84-89 (2009).

[2] B.E. Koenig «Authentication of forensic audio recordings» *J.Acoust. Soc.* **38**, pp 3-33 (1990).

[3] M. Zakariah, M.K. Khan, and H. Malik, «Digital multimedia audio forensics: past, present and future» *Multimedia Tools and Applications* **77**, 1, pp. 1009-1040 (2018).

- [4] S. Gupta, S. Cho, and C.C.J. Kuo «Current developments and future trends in audio authentication» IEEE MultiMedia **19**, pp.50–59 (2012).
- [5] D.P.N. Rodríguez, J.A. Apolinário, and L.W.P. Biscainho «Audio authenticity: detecting ENF discontinuity with high precision phase analysis» IEEE Transactions on Information Forensics and Security **5**, pp.534–543 (2010).
- [6] C. Grigoras, «Applications of ENF analysis in forensic authentication of digital audio and video recordings» J Audio Eng. Soc. **57**, pp.643–661 (2009)
- [7] E.B. Brixen, «Techniques for the authentication of digital audio recordings.» Audio Engineering Society Convention 122 (2007).
- [8] G. Hua, Y. Zhang, J. Goh, and V.L. Thing, «Audio authentication by exploring the absolute-error-map of ENF signals.» IEEE Transactions on Information Forensics and Security **11**,5, pp. 1003-1016 (2016).
- [9] H. Malik, and H. Farid «Audio forensics from acoustic reverberation» Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2010 I.E. International Conference on, pp 1710–1713 (2010).
- [10] H. Zhao, and H. Malik «Audio recording location identification using acoustic environment signature» IEEE Transactions on Information Forensics and Security **8**,11, pp. 1746-1759 (2013).
- [11] R. Buchholz, C. Kraetzer, and J. Dittmann, « Microphone classification using Fourier coefficients.» Information hiding pp. 235–246 (2009).
- [12] D. Garcia-Romero, and C.Y. Espy-Wilson «Automatic acquisition device identification from speech recordings» 2010 I.E. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 1806–1809 (2010).
- [13] A. Hafeez, H. Malik, and K. Mahmood «Performance of Blind Microphone Recognition Algorithms in the Presence of Anti-Forensic Attacks» Audio Engineering Society Conference: 2017 AES International Conference on Audio Forensics (2017).
- [14] I. Amerini, T. Uricchio, L. Ballan, and R. Caldelli «Localization of JPEG double compression through multi-domain convolutional neural networks.» Proc. of IEEE CVPR Workshop on Media Forensics (2017).
- [15] Brandenburg, K. «MP3 and AAC explained.» Audio Engineering Society Conference: 17th International Conference: High-Quality Audio Coding (1999)
- [16] M. Qiao, A.H. Sung, and Q. Liu «Improved detection of MP3 double compression using content independent features.» 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC), pp. 1-4 (2013).
- [17] R. Yang, Y.Q. Shi, and J. Huang «Detecting double compression of audio signal» Media Forensics and Security II, International Society for Optics and Photonics **7541** (2010).
- [18] D. Gärtner, C. Dittmar, P. Aichroth, L. Cuccovillo, S. Mann, and G. Schuller, «Efficient cross-codec framing grid analysis for audio tampering detection.» Audio Engineering Society Convention 136 (2014).
- [19] Vryzas, N., Katsaounidou, A., Kotsakis, R., Dimoulas, C. A., & Kalliris, G. «Investigation of Audio Tampering in Broadcast Content» Audio Engineering Society Convention 144 (2018).
- [20] D. Seichter, L. Cuccovillo, and P. Aichroth, «AAC encoding detection and bitrate estimation using a convolutional neural network.» IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (2016) .

- [21] R.Hennequin, J. Royo-Letelier, and M. Moussallam «Codec independent lossy audio compression detection.» 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) pp. 726-730 (2017).

Speech enhancement on the cloud by means of adaptive Wavelet-domain Wiener filtering

Vagias Christos
Dipl. Candidate
chris.actondev@gmail.com

Vrysis Lazaros
Dipl. Eng. /MSc., PhD Candidate
lvrysis@auth.gr

Dimoulas Charalampos
Dr. Eng., Assist. Prof.
babis@eng.auth.gr

Papanikolaou George
Dr. Eng., Prof.
pap@eng.auth.gr

Aristotle University of Thessaloniki

ABSTRACT

The current work focuses on the implementation of an online wavelet domain Wiener Filter denoiser (on the cloud), that is proposed for speech enhancement purposes. The outmost goal of the current project is to provide a quick and easy way to real-world speech denoising, with the easiest and most direct way feasible. Optimum configuration and adaptation aspects are thoroughly investigated, while multilevel performance analysis is conducted, using state of the art speech intelligibility metrics and criteria.

Αποθουβοποίηση φωνής στο σύννεφο με χρήση φίλτρου Wiener στο πεδίο των κυματιδίων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά την υλοποίηση μιας διαδικτυακής (web) αποθουβοποίησης ηχογραφήσεων ομιλίας με χρήση παραμετρικού φίλτρου Wiener στο πεδίο των κυματιδίων. Στόχος της εφαρμογής είναι να προσφέρει αυτή τη δυνατότητα σε μη ειδικούς, με τον πιο γρήγορο και εύκολο τρόπο. Πραγματοποιείται ανάλυση και ρύθμιση των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών, βελτιστοποιώντας τη μέθοδο με βάση μετρικές και δείκτες ποιοτικής και ποσοτικής αξιολόγησης της απόδοσης της προτεινόμενης υλοποίησης.

Introduction

Background noise in audio recordings is a problem found often: from old music recordings, to buzz noise caused from interference, or just background noise present in the place of the recording. There is a plethora of applications offering audio denoising. Notable applications for audio denoising are “Audacity” and “Izotope RX” to name few. The first is an open source application being offered for free, the second considered the industry standard for audio repair and both are available as desktop applications.

In recent years, with the evolution of portable devices such as smartphones & tablets, web services are on the rise, making them the go-to platform for delivering user-friendly applications. Therefore, a need arises for having such denoising solutions in those devices as well, enabling for example recording & denoising on the go.

The goal of this project is to develop a tool that is easy to use and access, being available from PCs but smartphones as well, but that is also in par in terms of quality of the end result with the other applications that are available.

1. Problem definition and Background (on audio denoising)

Noise contamination refers to the incorporation of unwanted noise components into useful audio signals, due to various technical reasons (e.g. thermal noise of the sensors and/or the recording equipment, ambient acoustic /environmental noise, etc.) [1] [2] [3]. The traditional way to approach the problem has been spectral subtraction usually applied on the Fourier domain, using the Short Time Fourier Transform. This approach has its limitations, cause of the nature of the STFT, having to select between time accuracy vs frequency accuracy. Other approaches to the problem include statistical-model based algorithms and, more recently, deep learning [4].

2. The proposed framework

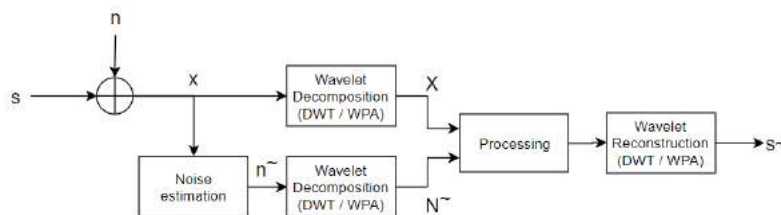


Figure 0.1 The denoising process overview (*s*: source signal, *n*: noise signal, *ñ*: noise estimation, *x*: available/noised signal, *s̃*: source estimation)

2.1 Wavelet Domain Wiener Filtering Speech Enhancement

Wavelets are families of functions generated from the *mother wavelet* $\psi(t)$, after time shifting and scaling/dilating (i.e. stretching or compressing) it. In our process, since we are working with discrete/digital signals we will be working with the Discrete Wavelet Transform (DWT) and *Wavelet Packet Analysis (WPA)*, whose definition is out of the scope of this paper.

Let's go through some definitions to give the description of the denoising process. We define as $P_{x;a}(k, w)$ the α -weighted, time-smoothed power spectrum of X:

$$P_{x;a}(k, w) = d \cdot |X(k, w)|^a + (1 - d) \cdot P_{x;a}(k, w - 1) \quad (0.1)$$

Where k denotes the band k (corresponding to the scale of the mother wavelet) and w to the time index (corresponding to the time shifting). Assuming a stationary noise footprint, its footprint is defined as

$$P_{nFP;a}(k) = \sum_w |N_{FP}(k, w)|^a \quad (0.2)$$

Now, to construct our wavelet-domain wiener filter:

$$H_{WDF}(k, w) = \begin{cases} \left(1 - c \cdot A_k \cdot \frac{P_{nFP;a}(k)}{P_{x;a}(k, w)}\right)^b, & \text{if } c \cdot A_k \cdot \frac{P_{nFP;a}(k)}{P_{x;a}(k, w)} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (0.3)$$

where A_k is a weighting filter, inspired by the psychoacoustics filters emulating the human auditory system. Note the parameters \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} , \mathbf{d} used so far, which are used as input parameters in the software implementation.

2.2 Noise footprint estimation

The noise footprint estimation works on the time domain and is constructed by two ways: either by using a time region specified by the user, or calculating it programmatically. In case of user-specified noise region, the given region is looped to match the input signal. In case of automatic noise estimation, the input signal is split in windows of same time duration and sorted by their RMS in order to calculate the Percentile Level L_n which is used to calculate the RMS threshold. Windows with RMS lower than this threshold are considered as noise and are used to build the noise estimation signal.

2.3 Algorithm implementation and testing

The software implementation is done in Python, which makes use of the *pywt* (for the wavelet analysis) and *numpy* (for manipulating numerical arrays) packages among others. The way to use the program is through command line, and passing the arguments needed through the console. The user can select between various options like:

- Mother wavelet (i.e. Daubechies, Symlets, Coiflets wavelet families),

- Wavelet analysis method (Discrete Wavelet Transform or Wavelet Packet Analysis),
- Noise estimation (i.e. manual selection of the noise region or automatic noise estimation)
- Fine-tune the parameters that are used in the algorithm (a,b,c,d)

The complete source code and documentation of the program's usage can be found in github [5].

2.4 Implementation on the web

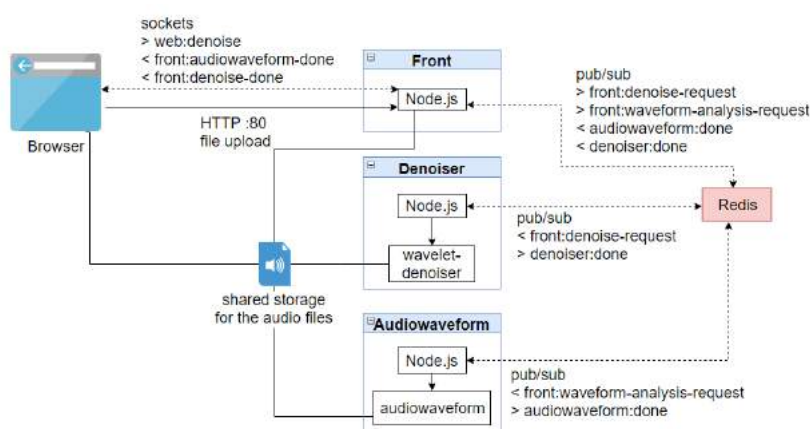


Figure 0.1 The overview of the web infrastructure.

The web implementation uses a microservice architecture, each doing one thing. The denoiser application is wrapped around a *Node.js* server which uses the pub/sub pattern [6] to communicate with the rest of the parts of the infrastructure. All the services are running inside docker containers, making them portable between different machine environments.

3. Performance analysis

3.1 The NOIZEUS dataset

For the application's results evaluation the NOIZEUS [7] dataset was chosen in order to provide a common dataset and evaluation strategy for future work comparison. The dataset consists of phrases recorded by three male & female speakers, with both the clean speech as well as corrupted versions of the recordings with eight different real-world noises at different SNRs. [8]

3.2 Parameter optimization

In a first phase, we apply the denoising algorithm for a combination of values per variable, to find the what seems to be the optimum parameter values.

Table 0.1 Values used in order to fine-tune the used parameters

Parameter	Description	Given values
α	α -weighted power spectrum	2, 4
b	b-weighted power of “spectral-subtraction”	1, 2
c	Threshold factor	1
d	Exponential moving average factor	0.1, 0.3
akg (grad)		2, 4
ako (offset)	Weight filter parameters	2, 4
aks (slope)		asc, desc
filter type	Processing algorithm selection	1, 2, 3

The parameters a, b, c, d are the ones used in the equations 2.1 – 2.3. The akg, ako and aks parameters are used to fine-tune the weight filter A_k . The filter type is used to select between processing algorithm variations. When given type 1 the algorithm as presented in paragraph 2.1 is used. Type 2 algorithm feeds the source signal estimation output of type 1 back to the algorithm. Type 3 is a hybrid between type 1 & 2. [1]

A simple metric to evaluate the result of each parameter value combination is the Pearson Correlation Coefficient (PCC), which gives a maximum value of 1 when the compared signals are a perfect match. The denoising is applied 192 times for all the above combinations, using as noised input the *sp01_car_sn5.wav* file of the dataset.

Table 0.2 A subset of the 192 PCC calculated metrics, after being sorted

α	b	d	akg	ako	aks	Filter type	PCC metric
2	2	0.3	2	2	asc	1	0.942
4	2	0.3	4	4	asc	1	0.94
4	2	0.3	4	4	asc	1	0.94
4	2	0.3	4	2	desc	1	0.94
2	1	0.1	4	2	asc	1	0.936
4	1	0.1	4	2	asc	2	0.934

Even though $d=0.3$ seemed to give better results, $d=0.1$ was chosen for subjective reasons (introduction of background noise distortion seems to occur with $d=0.3$). So, we will continue our tests with $a=2, b=1, c=1, d=0.1, akg=4, ako=2, aks=asc, type=1$.

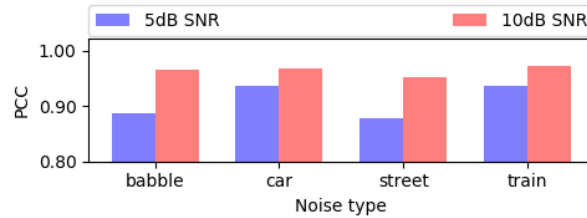


Figure 0.2 The PCC metric of the denoised VS the original file using the predefined parameter values. As probably expected, results are better on stationary-like noises (car, train) (files used: *sp01_{noise}_sn{5,10}.wav* - male speaker).

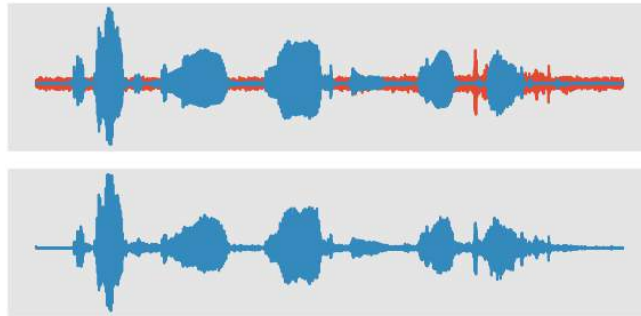


Figure 0.3 Waveform of noised file (*sp01_car_sn10.wav*) with the source and noise signal (above) and its denoised version (below)

3.3 Evaluation metrics, perceptual criteria & third-party tools comparison

While the Pearson Correlation Coefficient (PCC) gives us a first glance over the results, it is not able to depict differences that a normal listener would notice. In order to counteract this, two more metrics are used, the BSS_EVAL TOOLBOX (BSS) [9] [10] and the Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) [11]. The BSS toolbox, when given the source signal, as ground truth, the noise and the estimated source, decomposes the signal into the target source that is present in the estimated source and artifacts introduced by the processing algorithm. It gives a metric named Source to Distortion Ratio (SDR). The PESQ measure, is a standard recommended by ITU-T for objective speech quality assessment of handset telephony. By getting metrics from all these methods, a more complete view of the proposed algorithm's performance might be formed.



Figure 0.4 Evaluation metrics comparison between proposed framework and third-party tools. (file used: sp01_car_sn10.wav). Highest score is better.

4. Conclusions

From the objective results it can be seen that the proposed framework can compete with available third-party tools. Extensive subjective tests should be performed though, since these metrics cannot quite capture what a person might find better or worse sounding. Also, more research could be done for the parameters used by the processing algorithm, for example using an adaptive exponential averaging factor (d). Likewise, exponential averaging can be used in the noise estimation process to include smart criteria, i.e. to update noised footprint from the nearest /past values (in each band). Concerning software engineering aspects, code modifications could enable the processing to be applied real-time, and to share the computing tasks on worker processes in a distributed architecture.

5. References

- [1] C. Dimoulas, G. Kalliris, G. Papanikolaou and A. Kalampakas, "Novel wavelet domain Wiener filtering de-noising techniques: application to bowel sounds captured by means of abdominal surface vibrations," *Biomedical Signal Processing and Control*, pp. 177-218, 2006.
- [2] E. Tsardoulis, A. Thallas, A. Symeonidis and P. Mitkas, "Improving Multilingual Interaction for Consumer Robots through Signal Enhancement in Multichannel Speech," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 64, no. 7/8, pp. 514-524, 2016.
- [3] M. A. B. Messaoud and A. Bouzid, "Speech Enhancement Based on Wavelet Transform and Improved Subspace Decomposition," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 63, no. 12, pp. 990-1000, 2016.
- [4] W. Han, C. Wu, X. Zhang, M. Sun and G. Min, "Speech enhancement based on improved deep neural networks with MMSE pretreatment features," in *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, 2016, pp. 1140-1145.

- [5] C. Vagias, "A wavelet audio denoiser done in python," 2018. [Online]. Available: <https://github.com/actonDev/wavelet-denoiser>.
- [6] E. T. Patrick, P. A. Felber, G. Rachid and A.-M. Kermarrec, "The many faces of publish/subscribe," *ACM Comput. Surv.*, vol. 35, no. 2, pp. 114-131, 2003.
- [7] "Noizeus dataset," [Online]. Available: <https://ecs.utdallas.edu/loizou/speech/noizeus/>.
- [8] Y. Hu and P. C. Loizou, "Subjective evaluation and comparison of speech enhancement algorithms," *Speech Communication*, no. 49, pp. 588-601, 2007.
- [9] C. Févotte, R. Gribonval and E. Vincent, "BSS_EVAL Toolbox User Guide -- Revision 2.0," 2005.
- [10] "BSS Eval," [Online]. Available: http://bass-db.gforge.inria.fr/bss_eval/.
- [11] Y. Hu and P. Loizou, "Evaluation of objective quality measures for speech enhancement," *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 229-238, 2008.

Σωματοαισθητική Εκπαίδευση της Λυρικής Φωνής μέσω Ακουστικής Ανάλυσης σε Διαδραστικό Περιβάλλον

Ευάγγελος Αγγελάκης
Υπ. Διδάκτωρ / Εργαστήριο Μουσικής
Ακουστικής & Τεχνολογίας, Ε.Κ.Π.Α.
angelakisv@gmail.com

Αναστασία Γεωργάκη
Αν. Καθηγήτρια / Εργαστήριο Μουσικής
Ακουστικής & Τεχνολογίας, Ε.Κ.Π.Α.
georgaki@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εποχή του διαδικτύου και των ψηφιακών μέσων, η εκπαίδευση των λυρικών τραγουδιστών τείνει να υιοθετήσει νέες τεχνικές και τεχνολογίες που συνδέονται με την ακουστική και αισθητική αντίληψη της φωνής. Η παρούσα εργασία προτείνει μια καινοτόμο μέθοδο εκσυγχρονισμού της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο τραγούδι με τη χρήση νέων τεχνολογιών. Πιο ειδικά, θα παρουσιάσουμε τη λειτουργία και την πειραματική αξιολόγηση μιας ψηφιακής εφαρμογής, που αναπτύξαμε στο LabMAT, η οποία επικεντρώνει στην ανατροφοδότηση της φωνής, και στον σωματοαισθητικό, έναντι του υποκειμενικότερου, ακουστικού ελέγχου του φωνητικού οργάνου.

Somatosensory Training of the Lyric Voice by means of Acoustic Analysis in Interactive Environments

ABSTRACT

In this era of multimedia and internet, lyric singing education tends to incorporate new techniques and technologies connected to the acoustic and aesthetic perception of the voice. This paper introduces a novel method of modernizing singing training. We will present an application developed in LabMAT and its experimental evaluation. This software tool focuses on the feedback of the voice and somatosensory versus the more subjective auditory control of the vocal instrument.

Εισαγωγή

Σύμφωνα με μουσικοκριτικούς, μαέστρους και επιφανείς δασκάλους του λυρικού τραγουδιού, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια πτώση επιπέδου στην απόδοση των λυρικών τραγουδιστών, η οποία εστιάζεται στην τεχνική ακρίβεια, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου, στη δυνατότητα επιτέλεσης των «βαρύτερων» ρόλων του ρεπερτορίου, στην επάρκεια όγκου και έντασης ήχου για τα μεγάλα θέατρα, και στο χρόνο διατήρησης μιας υγιούς φωνής [1-3]. Η διαπίστωση αυτή έχει αποτυπωθεί σε άρθρα και εργασίες από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 [1], συμπίπτοντας χρονικά με την σταδιακή αποχώρηση από τη σκηνή της γενιάς των τραγουδιστών που είχαν γεννηθεί μέχρι το 1920 περίπου. Οι αλλαγές του τρόπου ζωής των τελευταίων 100 χρόνων, όπως και τα νέα ακουστικά ερεθίσματα του σύγχρονου ηχοτοπίου, φαίνεται να έχουν παίξει ρόλο σε αυτό, όπως και ο τρόπος που εκπαιδεύονται οι λυρικοί τραγουδιστές. Έτσι, μεγάλο τμήμα της μουσικής κοινότητας κάνει λόγο για επιτακτική ανάγκη αναδιάρθρωσης της φωνητικής παιδαγωγικής διαδικασίας [1-5].

1. Από το ωδειακό μοντέλο διδασκαλίας στην σωματοαισθητική εκπαίδευση με νέες τεχνολογίες

Σημαντικό ρόλο φαίνεται να έπαιξε η αλλαγή που επήλθε στο μοντέλο διδασκαλίας του λυρικού τραγουδιού κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα. Η εφαρμογή του «κονσερβατοριακού μοντέλου» διδασκαλίας του τραγουδιού, το οποίο περιλαμβάνει μια ώρα μαθήματος φωνητικής εξάσκησης ανά εβδομάδα, δεν μπόρεσε να αντικαταστήσει επαρκώς τον προηγούμενο τρόπο εκπαίδευσης. Ο τρόπος αυτός βασιζόταν σε ένα πρόγραμμα καθημερινών μαθημάτων φωνητικής εξάσκησης, και παρείχε τον πλήρη έλεγχο του ήχου των σπουδαστών στον καθηγητή τραγουδιού [3]. Η μετάβαση μεταξύ των δύο αυτών εμπειρικών μοντέλων διδασκαλίας του λυρικού τραγουδιού δείχνει να έχει σημαντικές γνωσιακές επιπτώσεις πάνω στους ασκούμενους τραγουδιστές, και κυρίως πάνω στην ακρίβεια του σωματοαισθητικού ελέγχου της φωνής, και τη δυνατότητα ανεξάρτησης από την ακουστική τους ανατροφοδότηση. Η υποκειμενικότητα της ακουστικής ανατροφοδότησης, που προκύπτει λόγω της σύγκλισης του εξωτερικού κύματος της φωνής στον κοχλία του εσωτερικού αυτιού, με αυτό της οστέινης οδού, έχει συχνά ως αποτέλεσμα τον λανθασμένο έλεγχο του οργάνου.

Ο βαθμός εκπαίδευσης και καταξίωσης ενός λυρικού τραγουδιστή, φαίνεται να σχετίζεται με την ικανότητά του να αντικαθιστά την ακουστική καθοδήγηση της φωνής του, με τον σωματοαισθητικό έλεγχο της [6-9]. Αυτή, όμως, η δεξιότητα δεν αναπτύσσεται πλέον μέσω ενός συγκεκριμένου τρόπου εκπαίδευσης, αλλά είναι μια

ασυνείδητα αναπτυσσόμενη δυνατότητα φωνητικού ελέγχου, την οποία ένας τελειόφοιτος λυρικού τραγουδιού δεν έχει ακόμη αποκτήσει. Η επιστροφή σε ένα μοντέλο διδασκαλίας με καθημερινά μαθήματα είναι πλέον αδύνατη. Οι λύσεις πρέπει να αναζητηθούν στον εκσυγχρονισμό της, αυστηρά εμπειρικής, παιδαγωγικής του τραγουδιού, με την εφαρμογή νέων τεχνολογικών συστημάτων και επιστημονικών μεθόδων [5], τα οποία θα προωθούν τη συστηματική εκπαίδευση του σωματοαισθητικού ελέγχου του φωνητικού μηχανισμού.

Οι εξελίξεις της διεπιστημονικής έρευνας γύρω από την κατανόηση της λειτουργίας, και την ανάλυση του μηχανισμού της άδουσας φωνής, καθώς και οι γνωσιακές μελέτες σχετικά με τον έλεγχο της φωνής στο τραγούδι, έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη νέων εργαλείων, τα οποία μπορούν να υποβοηθήσουν την εκπαίδευση του λυρικού τραγουδιού. Σημαντικές έρευνες γύρω από την ακουστική και την ανατομοφυσιολογία της άδουσας φωνής, καθώς και ζητήματα που άπτονται της φωνολογίας και μουσικολογίας μελετούν θέματα που έχουν σχέση με τον ακριβή έλεγχο του τονικού ύψους και των χαρακτηριστικών των λυρικών φωνών, μέσω της αναπνευστικής και μυϊκής δραστηριότητας [10-11]. Μόνο στον τομέα της ακουστικής της φωνής έχουν γίνει πάνω από 750 επιστημονικές μελέτες μετά το 1950 [12], ενώ ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί επίσης στη διερεύνηση των ψυχοακουστικών και γνωσιακών ιδιαιτεροτήτων της φωνής στο τραγούδι. [6-9]

Ωστόσο, η γνώση και η τεχνολογία που έχει προκύψει, δεν έχει ακόμη ενσωματωθεί συστηματικά στη πλειοψηφία του εκπαιδευτικού συστήματος του τραγουδιού. Η ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων ακουστικής ανάλυσης της φωνής με εφαρμογές στην εκπαίδευση σύμφωνα με αυτές τις έρευνες έχουν δώσει θετικά δείγματα, όσον αφορά στην αποτελεσματικότητά τους στο τραγούδι [13-15]. Όμως, το μεγαλύτερο μέρος των εργαλείων αυτών, αφορά στην εκπαίδευση παιδιών στο τραγούδι, ή στην διευκόλυνση και βελτίωση της φωνής ερασιτεχνών, και όχι στην ανάπτυξη της τεχνικής ενός επίδοξου επαγγελματία λυρικού τραγουδιστή. Ακόμη, κενό πεδίο εφαρμογής της έρευνας φαίνεται να υπάρχει, απ' όσο μπορούμε να γνωρίζουμε, στην εκπαίδευση του τραγουδιού μέσω της ακουστικής ανάλυσης του ηχοχρώματος της φωνής, αφού το βάρος των σημερινών λογισμικών δίνεται κυρίως στην τονική ακρίβεια, και δευτερευόντως σε άλλα χαρακτηριστικά.

2. Αρχιτεκτονική του λογισμικού MYOV για τον σωματοαισθητικό έλεγχο της φωνής

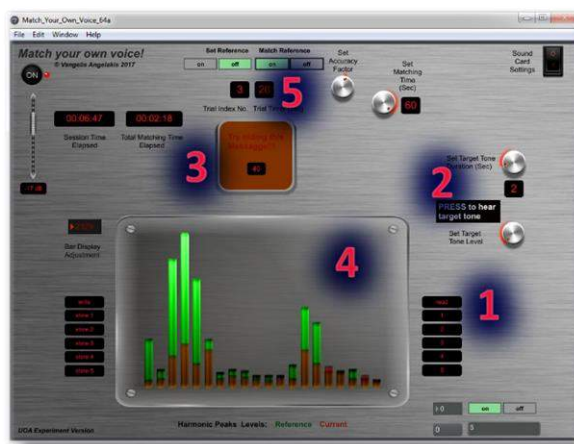
Στην προσπάθεια συμβολής στην κάλυψη αυτού του κενού αναπτύξαμε ένα νέο λογισμικό για την εκπαίδευση των λυρικών τραγουδιστών, στο πλαίσιο μεταπτυχιακού προγράμματος, στο Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής και Τεχνολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το λογισμικό αυτό λέγεται «Match Your Own Voice!» (MYOV), είναι γραμμένο σε περιβάλλον Max/MSP, ενεργεί συμπληρωματικά σε μαθήματα φωνητικής, και έχει στόχο να γεφυρώσει το κενό μεταξύ μαθήματος και ανεπίβλεπτης μελέτης, παρέχοντας οπτική ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο, για την ακρίβεια του φωνητικού ηχοχρώματος, καθώς και ένα σύστημα «αντικειμενικοποίησης» της μελέτης.

Η λειτουργία του MYOV βασίζεται στη φασματική ανάλυση, μέσω FFT, και γίνεται σε δύο διακριτά στάδια:

Α) Στο **μάθημα τραγουδιού** ο καθηγητής επιλέγει τους «ορθότερους» ήχους του σπουδαστή, και οι αρμονικές κορυφές του ηχητικού τους φάσματος (0 – 5000Hz) αποθηκεύονται σε μια Τράπεζα Δειγμάτων Αναφοράς (ΤΔΑ). Η ΤΔΑ (εικόνα 2. – ένδειξη 1) μπορεί να συμπεριλάβει Δείγματα Αναφοράς (ΔΑ) έως 36 διακριτών τόνων, και με ξεχωριστό ΔΑ για καθένα από τα 5 φωνήεντα της Ελληνικής ανά τόνο. Αυτό αποτελεί και το πρώτο επίπεδο βοήθειας στον σπουδαστή, παρέχοντας σημείο αναφοράς για τη μελέτη του.

Β) Κατά την **ανεπίβλεπτη μελέτη** του, ο σπουδαστής επιλέγει ένα αποθηκευμένο ΔΑ. Το φάσμα του ΔΑ απεικονίζεται σε πεδίο της εφαρμογής, ενώ παράλληλα η εφαρμογή ανασυνθέτει τις 10 πρώτες αρμονικές κορυφές του ΔΑ, έτσι ώστε να επιτευχθεί η αναπαραγωγή του ακριβούς τόνου (εικόνα 2. – ένδειξη 2), αλλά όχι του συγκεκριμένου ηχοχρώματος. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ακουστική μίμηση του ηχοχρώματος και προωθείται η απεξάρτηση από την ακουστική ανατροφοδότηση. Στη συνέχεια, ο σπουδαστής δοκιμάζει διάφορα ηχοχρώματα του ήχου αυτού, ακολουθώντας τις σωματικές-τεχνικές οδηγίες του καθηγητή του. Η εφαρμογή παρέχει το δεύτερο επίπεδο βοήθειας στον χρήστη, με τη μορφή ενός χρωματιστού πεδίου (εικόνα 2. – ένδειξη 3), το οποίο αλλάζει χρωματισμούς δυναμικά και σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την προσέγγιση των τιμών των αρμονικών κορυφών του τρέχοντος ήχου του χρήστη, στις αντίστοιχες του επιλεγμένου ΔΑ. Ο χρωματισμός του πεδίου αλλάζει βαθμιαία από πράσινο σε κίτρινο και τέλος σε κόκκινο, όταν οι τιμές συχνότητας αρμονικών κορυφών τρέχοντος ήχου και ΔΑ είναι πολύ κοντά.

Σε αυτό το σημείο ενεργοποιείται αυτόματα το τρίτο επίπεδο βοήθειας προς τον χρήστη με τη μορφή γραφήματος των φασματικών κορυφών (εικόνα 2.1 – ένδειξη 4). Συγκεκριμένα, οι φασματικές κορυφές του τρέχοντος ήχου εμφανίζονται σε ημιδιαφανές γράφημα, το οποίο εφάπτεται διαστρωματωμένο επάνω από το γράφημα των αντίστοιχων κορυφών του ΔΑ. Με τον τρόπο αυτόν συνυπολογίζονται και οι τιμές πλατών των αρμονικών κορυφών, και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα της άμεσης σύγκρισης μεταξύ των φασμάτων, και κατ' επέκταση των ηχοχρωμάτων των δύο ήχων του (ΔΑ και τρέχων ήχος).



Εικόνα 2.1 Εικόνα του MYOV σε κατάσταση λειτουργίας στο στάδιο Β

Τα δύο παραπάνω επίπεδα οπτικής υποβοήθησης και καθοδήγησης του σπουδαστή του δίνουν τη δυνατότητα αντικατάστασης της υποκειμενικής του κρίσης και της ηχητικής ανατροφοδότησης του ήχου του, με ένα εξωτερικό, αντικειμενικότερο σύστημα στοχοθέτησης της φωνητικής μελέτης. Ακόμη, για να επιτύχει τους οπτικούς στόχους, που το λογισμικό θέτει, ο σπουδαστής αναγκάζεται να καταφύγει στη δοκιμή των σωματικών οδηγιών, που έχει λάβει από τον καθηγητή του κατά το στάδιο Α (π.χ. διαφραγματική τεχνική, στάση σώματος, διαχείριση μυϊκού συστήματος λάρυγγα και αρθρώτων του φωνητικού αντηχείου). Έτσι αρχίζει να αποκτά σύντομα έναν πιο συνειδητό και εξασκημένο σωματοαισθητικό έλεγχο της φωνητικής του λειτουργίας.

3. Πειραματική Εφαρμογή του ΜΥΟΒ

Προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση που μπορεί να έχει στην εξέλιξη των σπουδαστών τραγουδιού το ΜΥΟΒ, διεξάγαμε μια προκαταρκτική αξιολόγηση και ένα διαμήκες πείραμα. Στην προκαταρκτική αξιολόγηση [16] έλαβαν μέρος οι 11 συμμετέχοντες εργαστηρίου τραγουδιού του πρώτου συγγραφέα της παρούσας. Την 9^η ημέρα του σεμιναρίου έγινε εφαρμογή του σταδίου Α του λογισμικού, και αποθηκεύτηκαν 4 ΔΑ για κάθε συμμετέχοντα. Την επόμενη ημέρα οι συμμετέχοντες προσπάθησαν να επιτύχουν τη σύγκλιση του ήχου τους με τα 4 ΔΑ τους, πρώτα χωρίς, και έπειτα με οπτική βοήθεια από το λογισμικό. Η παρατήρησή μας έδειξε αρκετά μεγαλύτερο βαθμό σύγκλισης των ήχων των συμμετεχόντων με τα ΔΑ τους όταν δέχονταν τη βοήθεια της οπτικής ανατροφοδότησης από την εφαρμογή (84%), συγκριτικά με την πρώτη δοκιμή τους, κατά την οποία χρειάστηκαν να στηριχτούν αποκλειστικά στην ακουστική τους μνήμη και ανατροφοδότηση (11%). Επιπλέον, με τη χρήση της εφαρμογής είχαμε περίπου 50% ταχύτερη επίτευξη σύγκλισης με τα ΔΑ, και όλοι οι συμμετέχοντες κατάφεραν να επιτύχουν κάποιο βαθμό σύγκλισης σε σημαντικό ποσοστό των ΔΑ τους.

Η διαμήκης μελέτη αξιολόγησης του λογισμικού είχε τη μορφή δίμηνου κύκλου μαθημάτων τραγουδιού με τον πρώτο συγγραφέα, ειδικά σχεδιασμένο για τον σκοπό του πειράματος, στον οποίο έλαβαν μέρος 24 φοιτητές (7 άρρενες) Πανεπιστημιακών σχολών της Αθήνας. Οι συμμετέχοντες είχαν ηλικίες 18-32 (διάμεσος 20), έδωσαν γραπτή συγκατάθεση, δεν είχαν πρότερη εμπειρία μαθημάτων τραγουδιού, και το 50% είχε λάβει σημαντική μουσική εκπαίδευση (> 3 ετών). Μετά από 12ωρο εισαγωγικό σεμινάριο, οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν σε δύο τμήματα, και λάμβαναν από ένα 3ωρο εβδομαδιαίο ομαδικό μάθημα τραγουδιού. Χωρίστηκαν επίσης σε 2 ομάδες ίσου αριθμού ατόμων (Πειραματική Ομάδα – ΠΟ και Ομάδα Ελέγχου – ΟΕ), τα άτομα των οποίων ισομοιράστηκαν στα δύο τμήματα, προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση των τμήματος ως μεταβλητή. Για τον ίδιο λόγο έγινε ισοκατανομή των συμμετεχόντων με βάση το φύλλο και τη μουσική εκπαίδευση.

Μετά το πέρας της πρώτης εβδομάδας μαθημάτων, όλοι οι συμμετέχοντες έλαβαν ένα ατομικό 45λεπτο μάθημα, κατά το οποίο αποθηκεύτηκαν 5 ΔΑ τους για τόνους της 1^{ης}, 3^{ης}, 4^{ης}, 5^{ης} και 8^{ης} βαθμίδας μιας, κατάλληλης για τον κάθε συμμετέχοντα, μείζονας κλίμακας. Ακολούθως, τα εβδομαδιαία μαθήματα συνεχίστηκαν έως την 7^η εβδομάδα, οπότε και πάρηκαν οι τελικές μετρήσεις. Ενδιάμεσα, όλοι οι συμμετέχοντες παρακολουθούσαν τα ομαδικά μαθήματα και έκαναν επιβεβαιωμένη ατομική εξάσκηση για δύο ημίωρα ανά εβδομάδα. Η ΠΟ χρησιμοποιούσε για τη

μελέτη της μια σχεδόν πλήρη έκδοση του λογισμικού (ΜΥΟΝπ), ενώ η ΟΕ χρησιμοποιούσε μία ειδική έκδοση (ΜΥΟΝε), η οποία δεν τους έδινε καμία βοήθεια και οπτική ή ακουστική πληροφορία, παρά μόνο κρατούσε την ΤΔΑ και χρονομετρούσε και επιβεβαίωνε τον χρόνο και ομοιομορφία της εξάσκησης τους. Το ΜΥΟΝπ έδινε τη δυνατότητα εξάσκησης μόνο με τα 3 από τα 5 ΔΑ της ΠΟ.

Με το πέρας του πειράματος, όλοι οι συμμετέχοντες αξιολογήθηκαν σε ατομική συνάντηση, όπου τους ζητήθηκε να δοκιμάσουν να προσεγγίσουν τα 5 ΔΑ τους με εμπόδιση της οπτικής ανατροφοδότησης από το ΜΥΟΝ, κάνοντας χρήση μάσκας ύπνου. Λήφθηκαν τιμές τριών δοκιμών για κάθε ΔΑ, με κλίμακα από 0 (καμία σύγκλιση) έως 4 (πλήρης ταύτιση φάσματος). Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων έγινε με το πρόγραμμα STATA 14.0.

4. Αποτελέσματα-Στατιστική ανάλυση

Τα t-test, που εφαρμόστηκαν μεταξύ των 3 μετρήσεων του κάθε ΔΑ, μας οδήγησαν να λάβουμε ως συγκρίσιμο μέγεθος του κάθε ΔΑ, τον μέσο όρο των 3 προσπαθειών του. Έτσι, καταλήξαμε σε ένα σύνολο 104 μέσων όρων, αφού αφαιρέσαμε 16 ελλείπουσες τιμές. Εφαρμόστηκε μονοπαραγοντική και πολυπαραγοντική ανάλυση με γραμμικό μοντέλο, τα αποτελέσματα των οποίων δείχνουν ότι η ηλικία, το φύλο, η μουσική εκπαίδευση και η εξάσκηση στο συγκεκριμένο ΔΑ (για την ΠΟ, η οποία εξασκούνταν μόνο στα 3 από τα 5 ΔΑ της), δεν ήταν παράγοντες στατιστικά σημαντικοί, σε επίπεδο σημαντικότητας 5%. Η μόνη στατιστικά σημαντική μεταβλητή ήταν ο διαφορετικός τρόπος εξάσκησης μεταξύ των ομάδων, με την ΠΟ να λαμβάνει μέση βαθμολογία κατά 0,8 μονάδες ψηλότερη από την ΟΕ (εύρος βαθμολογίας 0-4).

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης αξιολόγησης

Μεταβλητή	Μέση Βαθμολογία	Μέση Διαφορά	p-value
Φύλο	1,45 (θηλ.)	0.058 (αρ.)	0.84
Εξασκημένα ΔΑ	1.48 (όχι)	-0.041 (ναι)	0.75
Ομάδα	1.06 (ΟΕ)	0.819 (ΠΟ)	<0.01*

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι η μακροχρόνια χρήση του ΜΥΟΝ είχε γνωσιακή επίδραση τους συμμετέχοντες της ΠΟ. Αυτή είναι εμφανής τόσο από τη στατιστικά σημαντική διαφορά της επίδοσής τους στις πειραματικές μετρήσεις, σε σχέση με αυτούς της ΟΕ, όσο και από την σταθερότητα των επιδόσεών τους στο εύρος των ΔΑ, με την βαθμολογία τους να μένει υψηλή ακόμη και στα ΔΑ που δεν τους ήταν διαθέσιμα για εξάσκηση. Τα συμπεράσματα αυτά δείχνουν έναν αυξημένο βαθμό σωματοαισθητικού ελέγχου του φωνητικού μηχανισμού, ο οποίος συνήθως χρειάζεται χρόνια προκειμένου να αναπτυχθεί πλήρως.

5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, πιστεύουμε ότι υπάρχει η ανάγκη για μία επιστημονικά τεκμηριωμένη εκπαίδευση στο λυρικό τραγούδι, η οποία θα αξιοποιεί τις σύγχρονες

έρευνες της Ακουστικής της φωνής, της γνωσιακής επιστήμης, και της ψηφιακής τεχνολογίας, προκειμένου να προαχθεί ο σωματοαισθητικός έλεγχος. Απαραίτητη κρίνουμε ακόμη την ανάπτυξη νέων διατροφικών εκπαιδευτικών ψηφιακών εφαρμογών, όπου η ακουστική ανάλυση της φωνής θα πλαισιώνεται από πληροφορία που θα λαμβάνεται μέσω αισθητήρων από τον λάρυγγα (EGG), οπτικά μέσω κάμερας, καθώς και από το μυϊκό και αναπνευστικό σύστημα του τραγουδιστή (επιταχυνσιόμετρα, σπιρόμετρα, κλπ). Τέτοια εργαλεία μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην εκπαίδευση των λυρικών τραγουδιστών και, κατ' επέκταση, στη βελτίωση του γενικού επιπέδου του λυρικού τραγουδιού.

6. Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε για τη συνεισφορά τους στην παραπάνω έρευνα την Αρετή Ανδρεοπούλου, τον Γιώργο Κωστελέτο, τον Παναγιώτη Βελιανίτη, καθώς και τους 24 φοιτητές και τους 11 σπουδαστές τραγουδιού, που έλαβαν μέρος στην αξιολόγηση.

7. Αναφορές

- [1] C. L. Osborne, "Where Have All the Aidas Gone? The Crisis in Opera Training," *Music Educ. J.*, vol. 66, no. 2, pp. 50–53, 1979.
- [2] A. Moravcik, "Where have the Great Big Verdi Voices Gone?," in *Europaischen Musiktheater-Akademie Isolde Schmid-Reiter (Hg.), Poetischer Ausdruck der Seele* pp. 83–128, 2016. (p. 85, 83)
- [3] Chapman, J. L. (2017). *Singing and teaching singing: A holistic approach to classical voice*. Plural Publishing. (p. xviii-xix)
- [4] L. Lehmann, *How to Sing*. The Macmillan Co, 1902. (p.3, 12-13, 93)
- [5] D. R. Appelman, *The science of vocal pedagogy: Theory and application* Indiana University Press. Vol. 378, 1967.(p.9)
- [6] B. Kleber, R. Veit, C. V. Moll, C. Gaser, N. Birbaumer, and M. Lotze, "Voxel-based morphometry in opera singers: Increased gray-matter volume in right somatosensory and auditory cortices," *Neuroimage*, vol. 133, pp. 477–483, 2016.
- [7] B. Kleber, R. Veit, N. Birbaumer, J. Gruzelier, and M. Lotze, "The brain of opera singers: experience-dependent changes in functional activation," *Cereb. Cortex*, vol. 20, no. 5, pp. 1144–1152, 2009.
- [8] B. Kleber, A. G. Zeitouni, A. Friberg, and R. J. Zatorre, "Experience-dependent modulation of feedback integration during singing: role of the right anterior insula," *J. Neurosci.*, vol. 33, no. 14, pp. 6070–6080, 2013.
- [9] J. M. Zarate, S. Wood, and R. J. Zatorre, "Neural networks involved in voluntary and involuntary vocal pitch regulation in experienced singers," *Neuropsychologia*, vol. 48, no. 2, pp. 607–618, 2010.
- [10] J. Sundberg, *The Science of the singing voice*. DeKalb, IL: Northern Illinois University Press. 1987.

- [11] M. Kob, N. Henrich, H. Herzel, D. Howard, I. Tokuda, and J. Wolfe, “Analysing and understanding the singing voice: recent progress and open questions,” *Curr. Bioinform.*, vol. 6, no. 3, pp. 362–374, 2011., (p.371)
- [12] P. M. Pestana, V. F. Susana, and M. C. Manso, “Trends in Singing Voice Research: An Innovative Approach,” *J. Voice*, 2018. (p.2)
- [13] P. H. Wilson, K. Lee, J. Callaghan, and C. W. Thorpe, “Learning to sing in tune: Does real-time visual feedback help?,” *J. Interdiscip. Music Stud.*, vol. 2, 2008. (page 1)
- [14] D. Hoppe, M. Sadakata, and P. Desain, “Development of real-time visual feedback assistance in singing training: a review,” *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 22, no. 4, pp. 308–316, 2006.
- [15] J. Callaghan, W. Thorpe, and J. Van Doorn, “The science of singing and seeing,” in *Conference on Interdisciplinary Musicology - Proceedings*, 2004, pp. 1–10.
- [16] E. Angelakis, P. Velianitis, A. Andreopoulou, and A. Georgaki, ““ Match Your Own Voice!’: An Educational Tool for Vocal Training,” in *Audio Engineering Society Convention 143*, 2017.

Ερμηνευτικές διαστάσεις της προσωδιακής εκφοράς της Αττικής τραγικής ποίησης: Ακουστική και φωνολογική ανάλυση

Αναστασία Γεωργάκη
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής
& Τεχνολογίας,
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Ε.Κ.Π.Α.
georgaki@music.uoa.gr

Γεώργιος Δεδούσης
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής
& Τεχνολογίας,
Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Ε.Κ.Π.Α.
georgiosdedousis@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η προσωδιακή εκφορά αποσπάσματος, από το μέρος της Παρόδου, του τραγικού κειμένου του Αισχύλου, «Πέρσαι», μέσα από την ερμηνεία έξι έμπειρων πανεπιστημιακών καθηγητών, μουσικών και ηθοποιών. Η ερμηνείες τους βασίζονται σε επιστημονικές αναλύσεις και πειραματικά, φωνητικά και ψυχοακουστικά, δεδομένα σχετικά με τη δομή των συλλαβών, του ρυθμού, του τονισμού, της άρθρωσης και του επιτονισμού. Κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι η διερεύνηση της μουσικότητας της αρχαίας Ελληνικής γλώσσας στην Αττική τραγική ποίησης από την εξόρυξη μελωδικών και μετρικών – ρυθμικών προτύπων, μέσω ακουστικής ανάλυσης των κύριων χαρακτηριστικών παραμέτρων φωνής.

Performative aspects concerning the prosodic utterance of the ancient Attic tragedies: Acoustical and phonological analysis

ABSTRACT

This study investigates the prosodic utterance of an excerpt from the part of Parodos, Aeschylus' tragedy, The Persians (Persai), through the performance of six experienced university professors, musicians and actors. Their interpretations are based on scientific studies and experimental phonetic and psychoacoustic evidence, concerning the structure of the syllables, rhythm, accentuation, articulation and intonation. The main objective is to investigate the musicality of the ancient Greek language in Attic tragedies through the extraction of melodic and metric – rhythmic models using acoustical analysis of the main parameters of voice.

Εισαγωγή

Ορμώμενοι από το ενδιαφέρον της διεθνούς Πανεπιστημιακής κοινότητας, αλλά και σκηνοθετών και ηθοποιών, γύρω από την ορθή εκφορά της προσωδίας με

σεβασμό στο αρχαίο κείμενο, συστήσαμε στο πλαίσιο του LabMAT, τα τελευταία δύο χρόνια (2016-18), την ομάδα «προσωδιακή εκφορά της Αττικής τραγικής ποίησης». Στην ομάδα συμμετέχουν επιστήμονες διαφόρων ερευνητικών τομέων (φιλόλογοι, γλωσσολόγοι, αρχαιομουσικολόγοι, μουσικοτεχνολόγοι, μουσικοί) με σκοπό να μελετηθεί, μέσω ακουστικών αναλύσεων, η ερμηνευτική πρακτική της προσωδίας στο αττικό δράμα (τραγωδία και κωμωδία) σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, αλλά και τη λειτουργικότητα της γλώσσας, όσον αφορά τη φωνολογία και τη μετρική. Εξάλλου, η φωνολογική και η προσωδιακή εκφορά της αρχαίας Ελληνικής γλώσσας έχει απασχολήσει διαχρονικά τη διεθνή κοινότητα γλωσσολόγων, δραματουργών και αρχαιομουσικολόγων ([1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [10], [12]).

Στην παρούσα εργασία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην καταγραφή της ποσοτικής ανάλυσης των χαρακτηριστικών της προσωδίας, μελωδικών και δυναμικών περιγραμμάτων και φωνοσυντονισμών (formants) καθώς και τη μελέτη του ρυθμού και του μέτρου. Για την εργασία αυτή χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού ανάλυσης φωνής, όπως το Praat καθώς και το Cubase Pro για πιο μουσικολογικά χαρακτηριστικά. Τίθενται επίσης ερωτήματα γύρω από τη ρυθμική, μελωδική και ηχοχρωματική εκφορά των ερμηνειών.

1. Μεθοδολογική προσέγγιση

Η εργασία αυτή, όπως προειπώθηκε, είναι μέρος μεγαλύτερης έρευνας. Το απόσπασμα που εξετάζεται εδώ είναι η αρχή της Παρόδου από το έργο του Αισχύλου «Πέρσαι». Η λογοτεχνική μετρική του ανάλυση¹ φαίνεται στη σχήμα 1.1, μορφή που αντιστοιχεί σε αναπαιστικό δίμετρο, την κυριότερη μορφή που συναντάμε στην αρχαία ελληνική ποίηση, τόσο στην τραγωδία, όσο και στην κωμωδία [2].

Με οδηγό τη σήμανση του κειμένου, έξι ειδικοί στον τομέα της Αττικής αρχαίας ελληνικής ποίησης (ένας καθηγητής της αρχαίας ελληνικής γραμματείας, δύο μουσικολόγοι, δύο μουσικοί και ένας συνθέτης), ηχογραφήθηκαν σε ανάλυση 44100Hz/24bit στο στούντιο LabMAT του τμήματος Μουσικών Σπουδών, Ε.Κ.Π.Α.

$\overset{\Lambda}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\Lambda}{\text{}}$
 (ὄ ὄ -) (- -) (- -)(ὄ ὄ -)
 Τάδε μὲν Περσῶν τῶν οἰχομένων
 Τῶν Περσῶν ποῦ πῆγαν
 $\overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\Lambda}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}} \quad \overset{\overset{\circ}{\text{}}}{\text{}}$
 (- υ υ) (- -) (- υ υ) (- -) |
 Ἑλλάδ' ἔς αἴαν πιστὰ καλεῖται,
 στήν Ἑλλάδα μᾶς καλοῦνε πιστούς,
 Σχήμα 1.1 Μετρική ανάλυση κειμένου

Η ομάδα των ερμηνευτών αποτελείται από πέντε άντρες και μία γυναίκα εκ των οποίων οι πέντε έχουν ως μητρική γλώσσα την ελληνική και ένας τη γερμανική. Για την ανάλυση των ηχογραφήσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Praat στην έκδοση

¹ Η σήμανση του κειμένου έγινε σύμφωνα με τις υποδείξεις του καθηγητή αρχαίας ελληνικής μουσικής Σ. Ψαρουδάκη [1]. Οι στιγμές πάνω από τους χρόνους δηλώνουν άρση και οι παρενθέσεις ορίζουν τα όρια των αναπαιστικών ποδών. Με Α σημειώνεται η οξεία σε μακρά συλλαβή, με Λ η οξεία σε βραχεία συλλαβή, με κυρτό Λ η περισπωμένη, με δασεία τη δάσυνση του υποκειμένου φωνήεντος, με | το τέλος νοηματικής φράσης.

6.0.43 και το *Cubase Pro* στην έκδοση 9.3.0. Οι ρυθμίσεις ήταν παντού οι προκαθορισμένες από τα προγράμματα, εκτός από την ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα που μετριούνταν τα formants, ώστε να προκύπτει πιο καθαρή εικόνα (5000 Hz για τους άντρες και 5500 Hz για τις γυναίκες). Τα formants στα μονόφθογγα φωνήεντα καταγράφηκαν στο κέντρο τους (μεταξύ 30% και 70% της διάρκειας του φωνήεντος), για τις λιγότερες αποκλίσεις λόγω προηγούμενου – επόμενου συμφώνου, ενώ τα δίφθογγα μετρήθηκαν στο 20%, 50%, 80% της διάρκειάς τους για να καταγραφεί η μετατροπή από τον ένα φθόγγο στον άλλον. Τα σύμφωνα δεν είναι αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας αλλά σχολιάζονται όπου φαίνεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα.

2. Ανάλυση

2.1 Μετρική – Ρυθμική (MP)

Τα αρχεία ήχου εισήχθησαν στο *Cubase Pro* και οργανώθηκαν ώστε το πρώτο γράμμα της πρώτης συλλαβής να ξεκινάει από την αρχή του πρώτου μέτρου. Με τη βοήθεια της λειτουργίας *Merge Tempo From Taping* και με την παραδοχή ότι μια μακρά συλλαβή ισοδυναμεί με δύο βραχείες προέκυψε, σύμφωνα με το νοηματικό διαχωρισμό του αναπαιστού, το μέτρο των τεσσάρων τετάρτων. Τα στοιχεία καταχωρήθηκαν σε ένα πίνακα και υπολογίστηκε η ρυθμική αγωγή του αποσπάσματος και οι χρόνοι που αντιστοιχούν σε κάθε μέτρο (Πίνακας 2.1.1).

Πίνακας 2.1.1 Διάρκεια ρυθμικής αγωγής (MP)

Μέτρα (timecode)	1	2	3	4	Σύνολο (sec)
Hagel	1,357	1,353	1,287	1,605	5,602
Κωνσταντάκος	2,425	2,150	2,004	2,425	9,004
Ψαρουδάκης	2,527	2,520	2,623	2,813	10,483
Στρατάκης	1,766	1,507	1,474	2,192	6,939
Σπηλιωτοπούλου	1,598	1,633	1,878	1,985	7,094
Λέκκας	3,583	3,299	3,237	3,387	14,033

Σύμφωνα με τον πίνακα 2.1.1 είναι φανερή η μεγάλη απόκλιση στο ρυθμό που κρατάει εσωτερικά ο κάθε ερμηνευτής. Σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζονται πολύ μεγάλες αποκλίσεις από συλλαβή σε συλλαβή. Από την ακουστική εκτίμηση και δεδομένου ότι οι μακρές και βραχείες συλλαβές αντιστοιχίστηκαν σε αξίες τετάρτων και ογδών αντίστοιχα, παρατηρήθηκε επίσης μεγάλο εύρος χρονικής τους διάρκειας από μέρους των ερμηνευτών. Παρόλα αυτά, η αντιστοίχιση σε ρυθμικές αξίες, επαληθεύτηκε πρακτικά αφού στην τεράστια πλειοψηφία τους, κάθε δύο βραχέα είναι όντως περίπου ένα μακρύ. Από τους ερμηνευτές ο Λέκκας κρατάει τον πιο σταθερό ρυθμό ενώ οι διακυμάνσεις που έχουν οι υπόλοιποι παραπέμπουν σε μια πιο ρετσιτατίβο (ελεύθερη) μορφή απαγγελίας. Εντούτοις, σε κανένα σημείο δεν αισθάνεται κανείς ότι υπάρχουν αλλαγές στη συνολική ροή του λόγου. Αναμένεται στο μέλλον να διερευνηθεί διεξοδικότερα η μετρική εκφορά.

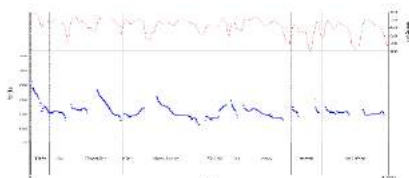
2.2 Μελωδική – Δυναμική (ΜΔ)

Στο *Cubase* επιχειρήθηκε η αυτόματη μελωδική αναγνώριση των ερμηνειών σε μορφή παρτιτούρας. Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον *Praat* για την εξόρυξη των μελωδικών και δυναμικών περιγραμμάτων. Στις εικόνες εμφανίζεται το κείμενο μαζί με το τονικό ύψος και τη μέση ένταση του κάθε ερμηνευτή.

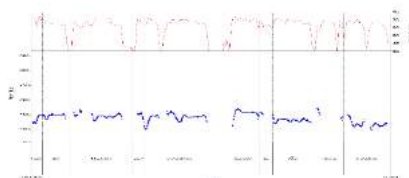
Από τα δεδομένα προκύπτει ότι ο Κωνσταντάκης και ο Ψαρουδάκης έχουν τη μικρότερη συνολική μεταβολή του τονικού ύψους, πράγμα που ίσως οφείλεται στην ερμηνευτική προσέγγιση του κειμένου.² Σε επίπεδο συλλαβών προκύπτει ότι:

Στη λέξη «*Τάδε*», η Σπηλιωτοπούλου εφαρμόζει διαφορετική μελωδική κατεύθυνση, ανεβαίνοντας στη δεύτερη συλλαβή. Στη λέξη «*μέν*» όλοι μένουν στο ίδιο ύψος ή κατεβαίνουν ελάχιστα, πράγμα που δικαιολογείται από τη βαρεία. Στην επόμενη («*Περσών*»), εκτός από τον Λέκκα, όλοι ακολουθούν την ίδια μελωδική γραμμή, ξεκινώντας από χαμηλά και, ανεβαίνοντας στη δεύτερη συλλαβή κάνουν ένα ποίκιλμα στο φωνήεν «*ω*», λόγω περισπωμένης. Εξάλλου το γράμμα «*δ*», το προφέρουν από καθαρό «*δ*» μέχρι και «*ντ*», με διακυμάνσεις μεταξύ των δύο.

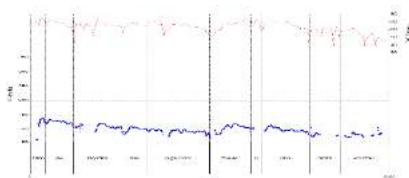
Πολύ μικρή διακύμανση εμφανίζεται στη λέξη «*των*», παρόλο της περισπωμένης,



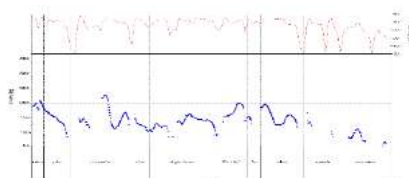
Σχήμα 2.2.1 Hagel (ΜΔ)



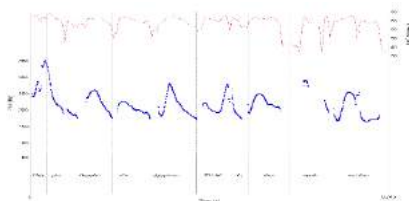
Σχήμα 2.2.2 Κωνσταντάκης (ΜΔ)



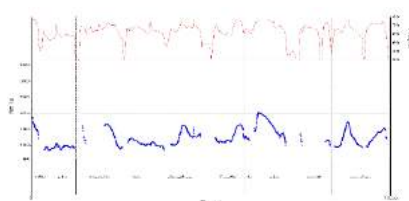
Σχήμα 2.2.3 Ψαρουδάκης (ΜΔ)



Σχήμα 2.2.4 Στρατάκης (ΜΔ)



Σχήμα 2.2.5 Σπηλιωτοπούλου (ΜΔ)



Σχήμα 2.2.6 Λέκκας (ΜΔ)

ενώ το δίφθογγο «*οί*», εκτός της εκφοράς του Hagel, έχει ελαφρά καθοδική μελωδική πορεία, παραμένοντας περίπου ίδια και στη συλλαβή «*χο*». Στο «*μέ*», λόγω οξείας, όλοι, εκτός του Hagel, ακολουθούν ανοδική πορεία ενώ η τελευταία συλλαβή έχει σε

² Ο Χορός, στη συγκεκριμένη περίπτωση, αποτελείται από γέροντες οι οποίοι μάλλον δεν θα μπορούσαν να αποδώσουν μεγάλες τονικές αλλαγές.

όλους καθοδική πορεία. Εξάλλου, διαφορά προκύπτει και στην προφορά του γράμματος «χ» το οποίο σε κάποιους ακούγεται ως «κχ».

Η μελωδική πορεία στο «*Ελλάδ' ἐς αἶαν*» είναι παρόμοια σε όλους, ξεκινούν από χαμηλά, ανεβαίνουν και ξανακατεβαίνουν. Το δίφθογγο «*αἶ*» ξεκινά από ψηλό τονικό ύψος για να κατέβει, ενώ υπάρχει πολύ μικρό ποίκιλμα στο τέλος του. Το επόμενο φωνήεν έχει από όλους την ίδια καθοδική πορεία.

Το «*πιστά*» εκφέρεται από όλους με καθοδική μελωδική πορεία (με μεγαλύτερη τονική απόσταση στην περίπτωση της Σπηλιωτοπούλου ενώ στους υπόλοιπους είναι αρκετά κοντινή) λόγω της βαρείας. Στη λέξη «*καλείται*», η μελωδική γραμμή σχηματίζει σε όλους τους συμμετέχοντες το σχήμα «Λ». Η φράση καταλήγει σε κόμμα, πράγμα που έχει ερμηνευθεί από τους Λέκκα, Ψαρουδάκη και Hagel, υψώνοντας τον τόνο ενώ οι υπόλοιποι τρεις κατεβαίνουν (σαν να υπάρχει τελεία).

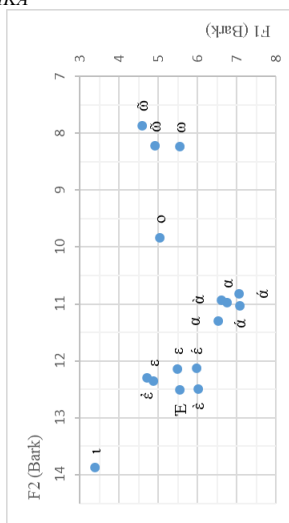
2.3 Ηχοχρωματική – Φωνολογική (ΗΦ)

Τα φωνήεντα διαχωρίστηκαν σε μονόφθογγο και δίφθογγο. Τα μονόφθογγο μελετήθηκαν ξεχωριστά για τον κάθε συμμετέχοντα, μετρώντας τα F1, F2. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι μέσες τιμές, όλων των συμμετεχόντων, για το κάθε φωνήεν χωριστά, προκύπτοντας τα σχήματα 2.3.1 και 2.3.2 σε κλίμακα Bark, η οποία λαμβάνει υπόψη και την ψυχοακουστική αντιληπτικότητα της κάθε συχνότητας σύμφωνα με την εξίσωση [9]:

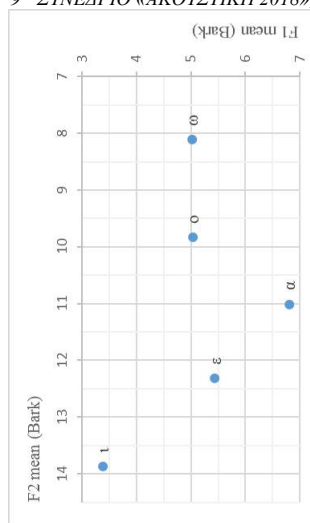
$$z = 13 \arctan (0,00076 F) + 3,5 \arctan \left(\frac{F}{7500} \right)$$

Στο σχήμα 2.3.1 παρουσιάζεται το φωνήεν «ω» (στο απόσπασμα είναι όλα μακρά) να έχει μικρότερο F1 και F2 όταν υπάρχει η περισπωμένη σε σχέση με όταν δεν υπάρχει.³ Τα «ο» και τα «ι» δεν εμφανίστηκαν πολλές φορές αλλά οι θέσεις τους είναι συνεπής με άλλες γλώσσες [11], με το δεύτερο να είναι πιο ψηλά κι αριστερά από αυτές. Το «ε» εμφανίζεται με όλα τα διαφορετικά σημεία στίξης. Όταν έχει δασεία, η ακουστότητα είναι πιο ανοιχτή ενώ στην ψιλή πιο κλειστή, πράγμα αντίθετο από αυτό που περιμέναμε. Βέβαια, αυτό με τη δασεία είναι σε μακρά συλλαβή, με την ψιλή σε βραχεία. Από την άλλη, η κατανομή στις επί μέρους μετρήσεις δείχνει ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις σχετικά με το σημείο εκφοράς του και μεταξύ των ερμηνευτών (πχ. ο Ψαρουδάκης τα προφέρει αρκετά κλειστά και στη μέση, ενώ ο Στρατάκης πιο ανοιχτά και μπροστά). Εντούτοις, η αναλογία μεταξύ των νευμάτων παραμένει η ίδια που φαίνεται στο σχήμα 2.3.1. Τέλος, η κατανομή του «α» είναι διάσπαρτη όχι μόνο ανάμεσα στους συμμετέχοντες αλλά και στον καθένα ξεχωριστά ανεξαρτήτου θέσης και στίξης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι οι ερμηνευτές δεν έχουν σταθεροποιήσει

³ Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι όπου υπήρχε η περισπωμένη υπήρχε η αίσθηση ότι το φωνήεν τείνει προς το, κατά IPA (*International Phonetic Alphabet*), *u*: («ου») κατά την ώρα του ποικιλματος. Πιο έντονο ήταν στην ερμηνεία του Λέκκα που έτεινε να το προφέρει ως «ου-ω». Μικρή επιρροή μπορεί να έχουν και τα σύμφωνα, αν και περιορίστηκαν από τη δειγματοληψία των formant σε σημείο μη ακουστότητας.



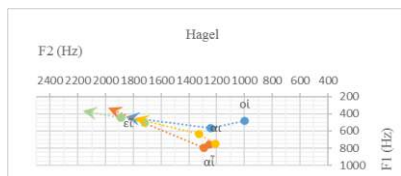
Σχήμα 2.3.1 Διάγραμμα F1, F2 για κάθε φωνήεν ξεχωριστά



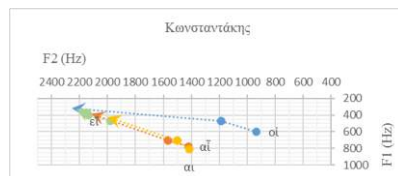
Σχήμα 2.3.2 Διάγραμμα F1, F2 όλων των φωνηέντων και των ερμηνευτών

τον τρόπο εκφοράς του. Στο σχήμα 2.3.2 φαίνονται οι μέσες τιμές των φωνηέντων.

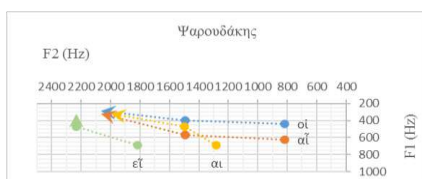
Τα δίφθογγα που εμφανίζονται στο απόσπασμα του κειμένου, σύμφωνα με την Ερασμιακή προφορά που εξετάζεται στην παρούσα εργασία [12], είναι τα «οί» (μπλε), «αι» (κόκκινο), «εϊ» (πράσινο), «αι» (κίτρινο).



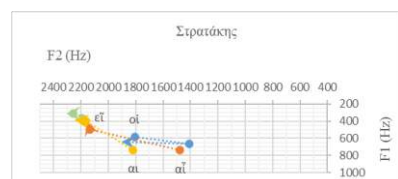
Σχήμα 2.3.3 Hagel δίφθογγα



Σχήμα 2.3.4 Κωνσταντάκης δίφθογγα



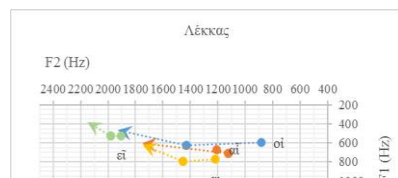
Σχήμα 2.3.5 Ψαρουδάκης δίφθογγα



Σχήμα 2.3.6 Στρατάκης δίφθογγα



Σχήμα 2.3.7 Σπηλιωτοπούλου δίφθογγα



Σχήμα 2.3.8 Λέκκας δίφθογγα

Στην εκφορά του HageI (σχήμα 2.3.3) τα δίφθογγα ξεκινούν από σημεία που ταιριάζουν με τα αντίστοιχα μονόφθογγα και καταλήγουν όλα στο ίδιο περίπου «ι». Παρόμοια εικόνα δίνουν και οι μετρήσεις του Κωνσταντάκη (σχήμα 2.3.4) με μόνη διαφορά την εκφορά του «οί» το οποίο ο πρώτος το ανοίγει πριν το κλείσει, ενώ ο δεύτερος το κλείνει απευθείας στην πορεία προς το «ι». Ο Ψαρουδάκης (σχήμα 2.3.5), στην εκφορά του «εϊ», ξεκινάει πιο ανοικτά από τους υπόλοιπους για να κλείσει στην πορεία προς το «ι». Το «αϊ» από την άλλη, το ξεκινάει σε πολύ πιο πίσω θέση στο στόμα, πολύ κοντά στο «ο», αλλά όχι τόσο κλειστό. Αυτό επίσης απέχει αρκετά από τις τιμές που έδωσε ο συγκεκριμένος συμμετέχοντας για το αντίστοιχο μονόφθογγο. Ο Στρατάκης (σχήμα 2.3.6), ξεκινά όλα τα δίφθογγα πιο μπροστά από τους υπόλοιπους (πχ. η μικρότερη τιμή που ξεκινάει το F2 είναι περίπου 1400Hz) ενώ στην εκφορά του «οί» ξεκινάει σε πιο μπροστινή θέση από όσο θα περιμέναμε, συνεχίζει φέρνοντάς το πιο πίσω, και τελειώνει ξανά εκεί περίπου από όπου άρχισε αλλά κοντά στη θέση που θα περίμενε κανείς να υπάρχει το «ε» και όχι το «ι». Η Σπηλιωτοπούλου (σχήμα 2.3.7) έχει επίσης αυτή την τάση σε όλα τα δίφθογγα που εξετάστηκαν. Το «ι», σε όλες τις περιπτώσεις είναι αρκετά πιο ανοιχτό ακουστικά σε σχέση με τους υπόλοιπους με το f1 να είναι πιο μεγάλο από μέσο όρο του f1 που παρατηρήθηκε στο διάγραμμα των μονόφθογγων για το «ι». Ο Λέκκας (σχήμα 2.3.8), τέλος, έχει πιο κεντρική εκφορά του «α» στα δίφθογγα, αλλά με μικρή σχετικά απόκλιση σε σχέση με το αναμενόμενο σύμφωνα με τα γενικά αποτελέσματα.

3. Συμπεράσματα

Το κείμενο φαίνεται σε γενικές γραμμές να ακολουθείται από τους συμμετέχοντες ως παρτιτούρα, η οποία επιδέχεται διαφορετικές ερμηνείες που προκύπτουν από θεμελιώδη μουσικά στοιχεία, το μέτρο (μακρά, βραχεία), το τονικό ύψος (οξεία, βαρεία) και τη χροιά (δασειά, ψιλή). Παρόλες τις μικρές αποκλίσεις, που είναι πιθανό να οφείλονται και στις συγκεκριμένες ερμηνείες που αποτυπώθηκαν στις ηχογραφήσεις, από ρυθμικής άποψης τα μακρά φωνήεντα επεκτείνονται - όχι πάντα με την ίδια διάρκεια και ταυτόχρονα επιταχύνονται τα βραχεία, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία. Ένα φωνήεν με ψιλή, εκτός εξαιρέσεων που αναφέρθηκαν, ανεβαίνει τονικά ενώ να κατεβαίνει με βαρεία. Το τέλος της πρότασης που καταλήγει σε κόμμα και όχι σε τελεία φαίνεται να ερμηνεύθηκε από τους μισούς συμμετέχοντες, ανεβάζοντας το τονικό ύψος, ενώ οι υπόλοιποι το κατέβασαν, το οποίο, όμως, ακουστικά, προετοιμάζει για τελεία. Εκτός από τα τονικά σημεία, ενδιαφέρον προκύπτει στην ανάλυση των φωνοσυντονισμών των φωνηέντων. Ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων φαίνεται να είναι κοντά στα σημεία που ορίζονται στο IPA με πιο σημαντική διαφοροποίηση εκείνη του «ο» που εμφανίζεται να εκφέρεται σε πιο κεντρική θέση. Τα μονόφθογγα «α» και «ε» εμφανίζουν τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των συμμετεχόντων, αλλά και στον καθένα ξεχωριστά. Η διασπορά των σημείων που ορίζουν τα F1 και F2 για αυτά τα φωνήεντα είναι αρκετά μεγάλη που χρειάζεται μεγαλύτερο δείγμα για να προσδιοριστεί η θέση τους με μικρότερη διακύμανση. Τέλος, η εκφορά των δίφθογγων είναι λίγο πιο ομοιόμορφη μεταξύ των συμμετεχόντων με μικρές διαφορές και εκπλήξεις οι οποίες ίσως να υπήρχαν και μόνο στη συγκεκριμένη εκτέλεση. Μεγαλύτερο δείγμα εκτελέσεων αλλά και περισσότερων εκτελεστών θα οδηγούσε σε πιο σταθερά αποτελέσματα και αυτός είναι ο επόμενος στόχος της έρευνας μας.

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στα μέλη της ομάδας «προσωδιακή εκφορά του τραγικού ποιητικού λόγου», τον Επίκουρο Καθηγητή Στέλιο Ψαρουδάκη (ΤΜΣ/ΕΚΠΑ), τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γιάννη Κωνσταντάκο (Τμήμα Φιλολογίας/ΕΚΠΑ), το Συνθέτη και Μαθηματικό Δημήτρη Λέκκα (ΕΑΠ), τους μουσικούς και προσωδούς Γιάννη Στρατάκη και Ιφιγένεια Σπηλιωτοπούλου και τον ερευνητή Καθηγητή Αρχαιομουσικολογίας Stefan Hagel (Αυστριακή Ακαδημία Επιστημών). Επίσης την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Υπολογιστικής Γλωσσολογίας (ΕΚΠΑ) Χριστίνα Αλεξανδρή και το μεταπτυχιακό φοιτητή Κώστα Κατσαντώνη.

4. Βιβλιογραφία

[1] Ψαρουδάκης Σ. «Μέτρα στην αρχαία ελληνική Τραγωδία», Μούσα 3:77, Αθήνα 1996, pp. 77-92.

[2] Λυπούρλης, δ. «*Αρχαία ελληνική μετρική: Μια πρώτη προσέγγιση*». Επίκεντρο. Θεσσαλονίκη, 2007.

[3] Pöhlmann, E. & West, M. L. «*Documents of Ancient Greek Music*». Clarendon, Oxford Press, Oxford, 2001.

[4] Allen, W. S. «*Accent and rhythm, Prosodic features in Latin and Greek: a study in theory and reconstruction*». Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

[5] Allen, W. S. «*Vox Graeca. The pronunciation of Classical Greek*». Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

[6] Georgaki, A. «Allegories et mutations vocales au sein de Yannis Christou (1926-1971) et Michael Adamis(1929)», in: «*La voix dans la dramaturgie contemporaine Grecque*», edited by Giordano Ferrari, H., Gallimard, Paris, 2008.

[7] Lohmann, J. «*Mousiké et Logos: contributions à la philosophie et à la théorie musicale grecques*». Trans-Euro-Repress, Paris, 1989.

[8] Georgaki A & al: «*Towards a prosody model of Attic Greek tragic poetry: from Logos to Mousike*», in SMC2009 Proceedings, Univeristy of Porto, 2009.

[9] Zwicker, E. & Fastl, H. «*Psychoacoustics: Facts and Models*». Springer-Verlag, Berlin, 1990.

[10] Loraux, N. «*La voix endeuillée. Un essai sur la tragédie*», MIT Press, Cambridge, MA, 1999.

[11] Roach, P. British English: Received Pronunciation. Journal of the International Phonetic Association, 34(2), 2004, pp. 239-245.

[12] Dillon, M. The Erasmian pronunciation of Ancient Greek: A new perspective. The Classical World, 94(4), 2001, pp. 323-334.

Πλήρως Διαδικαστικό - Προσβάσιμο Ηλεκτρονικό Παιχνίδι Βασισμένο σε Φωνητική Ανάδραση

Δημήτριος
Μακρυγιάννης
Τμήμα Τεχνών Ήχου και
Εικόνας, Ιόνιο
Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
49100 Κέρκυρα
e-mail:
t09makr@ionio.gr

Ανδρέας Φλώρος
Αναπλ. Καθηγητής
Τμήμα Τεχνών Ήχου και
Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
49100 Κέρκυρα
Τηλ.: 2661087725
e-mail: floros@ionio.gr

Δημήτριος Άατος
Έλληνας
Τμήμα Μουσικών
Σπουδών, Ιόνιο
Πανεπιστήμιο
49100 Κέρκυρα
e-mail:
d.a.ellinas@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η σχεδίαση, ανάπτυξη και επίδειξη ενός πρωτότυπου ηλεκτρονικού παιχνιδιού, με τα χαρακτηριστικά της πρωτοτυπίας να συνίστανται: α) στην σχεδιαστική προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε τεχνικές διαδικαστικής δημιουργίας εικόνας και ήχου (ειδικότερα: της ηχητικής επένδυσης και των ηχητικών εφέ), επιτρέποντας την σύνθεση του παιχνιδιού αποκλειστικά από κώδικα, χωρίς την χρήση προσχεδιασμένων γραφικών και ήχου β) την ενσωμάτωση φωνητικής ανάδρασης για τον έλεγχο του παιχνιδιού, το οποίο το καθιστά προσβάσιμο από δυνητικούς παίκτες με κινητικές δυσκολίες και γ) στο γεγονός ότι το παιχνίδι διατίθεται ως λογισμικό ανοικτού κώδικα, αφήνοντας ανοικτές διεξόδους προσαρμογής του από την προγραμματιστική κοινότητα. Το ηλεκτρονικό παιχνίδι αξιολογήθηκε στο πλαίσιο ψηφιακού Φεστιβάλ της Διεθνούς Έκθεσης Θεσσαλονίκης και τα πρώτα αποτελέσματα απέδειξαν ότι, παρά την σύγχρονη τάση που παρατηρείται στο χώρο των ηλεκτρονικών παιχνιδιών για υψηλής ποιότητας γραφικά και ήχο, η διαδικαστική δημιουργία μπορεί να συμβάλλει στην υλοποίηση παιχνιδιών με απλό σενάριο και προσβάσιμο προσανατολισμό.

An Accessible Electronic Game based on Vocal Feedback

ABSTRACT

In this work we present the design, development and demonstration of a novel electronic game. The novelty of the implementation approach is based on the fact the graphics and sound (music and acoustics effects) engine are based on procedural creation techniques. That is, no pre-rendered graphics and pre-recorded sound is employed. Additionally, voice-driven interaction is also selected as the basic means for interacting with the game engine, thus allowing the characterization of the game as accessible, since it can be used by players with movement disabilities. Finally, the game is offered as an open source software, allowing for greater flexibility and

adaptivity by the worldwide programming community. The game was demonstrated and tested thoroughly, and the obtained results showed that despite the lack of high-quality and resolution graphics and sound content, procedural creation and voice interaction still represent a means for delivering multiple genres of electronic games, including accessible ones.

Εισαγωγή

Τα παιχνίδια υπολογιστών σήμερα καλύπτουν πολύ περισσότερους τομείς από την απλή ψυχαγωγία. Για παράδειγμα, μπορούν να έχουν κοινωνικό αλλά και εκπαιδευτικό προσανατολισμό [1]. Βασικό συστατικό της τεχνολογικής προόδου που σημειώνεται στον χώρο αποτελεί η βελτίωση της μηχανικής των παιχνιδιών, των γραφικών και της ηχητικής επένδυσης / ηχητικών εφέ, με παράλληλη ενσωμάτωση στις παιγνιακές πλατφόρμες μεγαλύτερου βαθμού προσαρμοστικότητας, δίνοντας παράλληλα μεγαλύτερη βαρύτητα στην διεπαφή με τον παίκτη. Έτσι, οι σύγχρονοι κυκλοφορόντες τίτλοι συνιστώνται από δεδομένα πολύ μεγάλου όγκου, με ισχυρές υπολογιστικές απαιτήσεις εκτέλεσης του κώδικα, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό τους έχει σχεδιαστεί να παίζονται χρησιμοποιώντας κάποια μορφή χειροκίνητης συσκευής εισόδου, (συνήθως πληκτρολόγιο, ποντίκι ή κάποιο gamepad). Τα τελευταία χρόνια συναντά κανείς τίτλους που χρησιμοποιούν την φωνή ως κανάλι αλληλεπίδρασης [2]. Στόχος της προσέγγισης αυτής είναι όχι μόνο να προσφέρει στο χρήστη μια διαφορετική εμπειρία αλληλεπίδρασης, αλλά και να δώσει πρόσθετες δυνατότητες σε ανθρώπους με διάφορες μορφές κινητικών βλαβών που δυσκολεύονται ή αδυνατούν να χρησιμοποιήσουν συσκευές χειροκίνητης εισόδου να έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρονικά παιχνίδια .

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού παιχνιδιού με τίτλο «Craftsman's Odyssey» που υλοποιήθηκε σε μια πρωτότυπη μηχανή διαδικαστικής δημιουργίας (procedural generation) γραφικών και ήχου πραγματικού χρόνου, χωρίς την απαίτηση χρήσης προσχεδιασμένων αρχείων ήχου και γραφικών. Κατ' επέκταση, το παιχνίδι αυτό παρουσιάζει υψηλή προσαρμοστικότητα, δημιουργώντας μεγάλο πλήθος παραλλαγών του κατά την εκτέλεση του, ενώ ο όγκος των δεδομένων που το συνιστούν περιορίζεται μόνο στον πηγαίο του κώδικα. Παράλληλα, το εν λόγω παιχνίδι βασίζεται σε πλατφόρμα ανοικτού κώδικα, καθιστώντας ευέλικτη την διανομή του και την μελλοντική αναβάθμισή του από την προγραμματιστική κοινότητα. Τέλος, ιδιαίτερα καινοτόμος προσέγγιση στην υλοποίησή του αποτελεί και η υιοθέτηση του καναλιού της φωνής για την υλοποίηση της διάδρασης με τον παίκτη. Ο συνδυασμός όλων των ανωτέρω καθιστά το εν λόγω παιχνίδι πρωτότυπο και επιτρέπει την χρήση του από άτομα με κινητικά προβλήματα, γεγονός που το κατατάσσει στην ευρύτερη κατηγορία των προσβάσιμων ηλεκτρονικών παιχνιδιών.

1. Επισκόπηση επιστημονικού πεδίου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες που θεμελιώνουν το επιστημονικό και τεχνολογικό πεδίο της εργασίας και σχετίζονται α) με την διαδικαστική δημιουργία και β) με τη διάδραση μέσω του φωνητικού καναλιού.

1.1 Διαδικαστική δημιουργία

Η διαδικαστική δημιουργία είναι μια μέθοδος δημιουργίας δεδομένων (συμπεριλαμβανομένων των γραφικών και των ήχων ενός παιχνιδιού) χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστικό αλγόριθμο, αντί της συνήθους δημιουργίας “με το χέρι”. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο εξοικονομεί κατά τη διαδικασία δημιουργίας περιεχομένου – παράγοντας ο οποίος είναι ζωτικής σημασίας ειδικά για μια μικρή ομάδα προγραμματιστών - αλλά επιτρέπει επίσης μεγαλύτερο βαθμό τυχαιότητας ή ποικιλίας διατηρώντας παράλληλα μικρή χρήση μνήμης στην υπολογιστική μηχανή που χρησιμοποιείται [3]. Η πλέον σύγχρονη πρόκληση που αντιμετωπίζει η μέθοδος της διαδικαστικής δημιουργίας είναι ότι ναι μεν είναι σε θέση να παράγει πολύ περισσότερο περιεχόμενο από ότι θα μπορούσε να αποθηκευτεί φυσικά στη μνήμη, αλλά με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει μόνο αυτό που χρειάζεται σε μια δεδομένη στιγμή, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η χρήση του επεξεργαστή και της μνήμης [4]. Την εφαρμογή αυτής της μεθόδου τη συναντάμε συχνά στο κόσμο των ηλεκτρονικών παιχνιδιών μιας και τα ψηφιακά παιχνίδια είναι αλληλεπιδραστικές και πολύπλευρες εμπειρίες που βασίζονται σε visuals, ήχο, gameplay και αφήγηση [5]. Η διαδικαστική δημιουργία αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση υλοποίησης παιχνιδιών για ηλεκτρονικούς υπολογιστές από πολύ παλιά. Συγκεκριμένα, τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης ηλεκτρονικών παιχνιδιών ήταν μια εποχή μεγάλης επινοητικότητας προκειμένου να συμπιεστούν μεγάλα ποσά δεδομένων σε μνήμες ελάχιστης χωρητικότητας [6] με παραδείγματα όπως το παιχνίδι Elite (Acornsoft 1984) και το Starflight (Electronic Arts 1986).

1.2 Διάδραση φωνητικού καναλιού

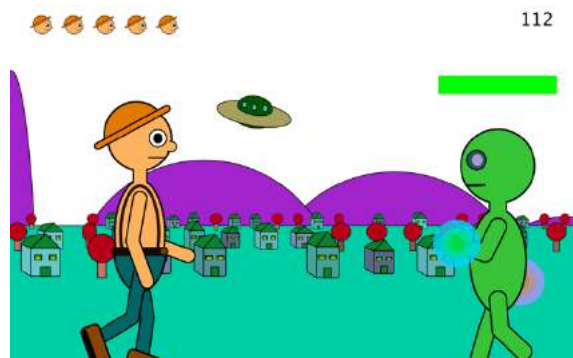
Τα παιχνίδια ήταν (και εξακολουθούν να είναι) ιδανικές περιπτώσεις δοκιμών για ερευνητές που εργάζονται στην τεχνολογία αναγνώρισης ομιλίας [7]. Ξεκινώντας από το παλαιότερο Vocal-Chess [8], έχουν υπάρξει αρκετά ακόμα παιχνίδια σχεδιασμένα ειδικά για να ελέγχονται από τη φωνή του χρήστη. Μια εναλλακτική προσέγγιση φωνητικής διάδρασης, αποτέλεσε η χρήση της ηχητικής πίεσης, της συχνότητας και άλλων χαρακτηριστικών της φωνής για άμεσο έλεγχο του παιχνιδιού σε πραγματικό χρόνο [9]. Ο Igarashi και ο Hughes ονομάζουν αυτή την προσέγγιση "Voice as Sound" [10]. Χαρακτηριστικά εμπορικά παιχνίδια τέτοιου είδους είναι το Karaoke Revolution (2009) και το Rock Band (2007), τα οποία ζητούν από τους παίκτες να τραγουδήσουν κάποια προεπιλεγμένα τραγούδια και δημιουργούν ένα σκορ με βάση το πόσο κοντά είναι η συχνότητα της φωνής στη μελωδία του κομματιού. Τέλος, ένα διαφορετικής κατηγορίας φωνητικό παιχνίδι που αξίζει να αναφερθεί είναι το Flappy Voice [11]. Πρόκειται για ένα παιχνίδι για φορητές συσκευές και έχει ως σκοπό να βοηθήσει παιδιά που πάσχουν από Παιδική Απραξία Λόγου (CAS).

2. Υλοποίηση του παιχνιδιού

Το Craftsman's Odyssey σχεδιάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Processing και Max/Msp για MacOS λειτουργικό. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό παιχνίδι όπου η εικόνα και ο ήχος δημιουργούνται (για την ακρίβεια συντίθεται) με την μέθοδο της διαδικαστικής δημιουργίας, ενώ παράλληλα ο χρήστης αλληλεπιδρά με την παιγνιακή μηχανή μέσω φωνής και

κίνησης. Το παιχνίδι παρουσιάστηκε και δοκιμάστηκε σε ευρύ κοινό παιχτών για πρώτη φορά στο πλαίσιο της Διεθνούς Έκθεσης Θεσσαλονίκης τον Σεπτέμβριο του 2017.

Το σενάριο φαντασίας του παιχνιδιού πραγματεύεται τις περιπέτειες ενός “Μάστορα” σε διάφορους πλανήτες, μετά την απαγωγή του από εξωγήινους. Ο ήρωας του παιχνιδιού καλείται να αντιμετωπίσει τους υπαίτιους της απαγωγής του για όσο το δυνατόν περισσότερο, με σκοπό τη συγκέντρωση πόντων και φυσικά την καταστροφή των εξωγήινων. Στην συνέχεια, θα δοθεί αναλυτική περιγραφή μόνο του τρόπου σύνθεσης του ηχητικού περιεχομένου, καθώς η παρούσα εργασία δεν εστιάζει σε θέματα σχεδίασης του οπτικού υλικού του παιχνιδιού. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, η έμπνευση για τη σχεδίαση των γραφικών του παιχνιδιού προέρχεται από τις πρώτες υλοποιήσεις γραφικών για ηλεκτρονικά παιχνίδια, με τους αντιπάλους, αλλά και το σκηνικό περιβάλλον να υποστηρίζουν αισθητικά (Σχήμα 2.1) τον χαρακτήρα και την πλοκή του παιχνιδιού.



Σχήμα 2.1 Τυπική αισθητική προσέγγιση σχεδίασης του παιχνιδιού

2.1 Περιβάλλον ηχητικής σύνθεσης.

Στην αρχική του εκδοχή, το παιχνίδι υλοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στο προγραμματιστικό περιβάλλον Processing και η φωνητική διάδραση στην πλατφόρμα PureData. Και αυτό γιατί το παιχνίδι αρχικά σχεδιάστηκε να υλοποιηθεί σε λογισμικά αποκλειστικά ανοιχτού κώδικά, ώστε οι χρήστες να μπορούν να παρέμβουν στην μηχανική του με σκοπό τον πειραματισμό και την εξέλιξη του. Για την επίτευξη του στόχου αυτού όμως διαπιστώθηκε ότι θυσιάστηκε η φιλικότητα της συνολικής εφαρμογής προς τον χρήστη. Το παιχνίδι σχεδιάστηκε να απευθύνεται σε όλο τον κόσμο και όχι μόνο σε ανθρώπους που ασχολούνται με προγραμματισμό. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε τελικά να χρησιμοποιηθεί το Max/MSP για ότι έχει να κάνει με την ηχητική επένδυση και την διάδραση, λόγω της ευκολίας που προσφέρει η εξειδίκευσή του σε τέτοιου είδους θέματα και η δύναμη του να σταθεί ως standalone εφαρμογή με διεπαφή φιλική προς τον χρήστη

2.2 Σύνθεση Μελωδίας

Η μουσική και η ηχητική σύνθεση του παιχνιδιού γίνονται μέσω διαδικαστικής

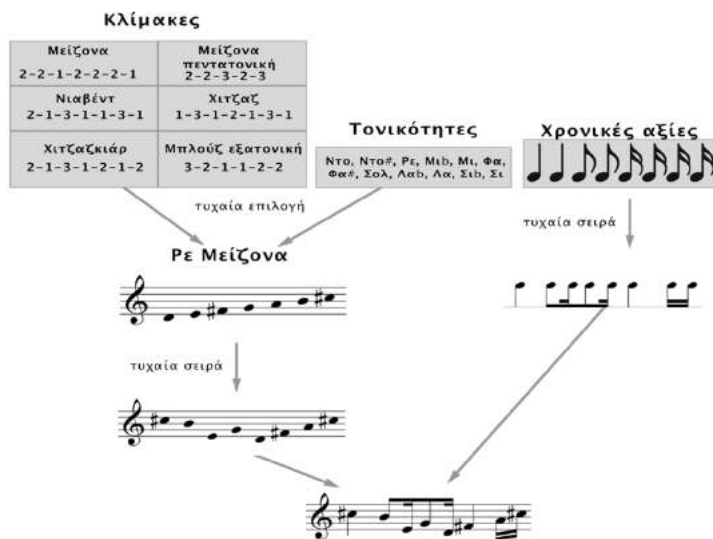
δημιουργίας στο περιβάλλον του Max/MSP. Η μουσική της κάθε πίστας είναι μια διαφορετική επαναλαμβανόμενη μελωδία οχτώ νοτών με διαφοροποιήσεις στα ηχητικά χαρακτηριστικά της κάθε νότας. Συγκεκριμένα, στην αρχή της κάθε πίστας πραγματοποιείται η σύνθεση του μουσικού θεματός της. Πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση αυτή είναι οι επιλογές του τέμπο, της κλίμακας/τρόπου και της τονικότητας: επιλέγεται τυχαία ένα τέμπο μεταξύ 80 έως 110 τέταρτα το λεπτό, μια κλίμακα από τις μπλούζ εξατονική, μείζονα, χιτζάζ, μείζονα πεντατονική, χιτζαζκιάρ και νιαβέντ, και μια τονικότητα (είναι όλες διαθέσιμες). Οι νότες της επιλεγμένης κλίμακας τοποθετούνται σε τυχαία σειρά και στη συνέχεια μια σειρά από οχτώ προκαθορισμένες διάρκειες (δύο τέταρτα, δύο όγδοα και τέσσερα δέκατα έκτα) αλλάζει τυχαία διάταξη και αντιστοιχείται με την σειρά των οκτώ νοτών. Αυτές οι οκτώ νότες επαναλαμβάνονται μέχρι το τέλος της πίστας (βλέπε Σχήμα 2.2).

2.3 Σύνθεση ηχητικής επένδυσης

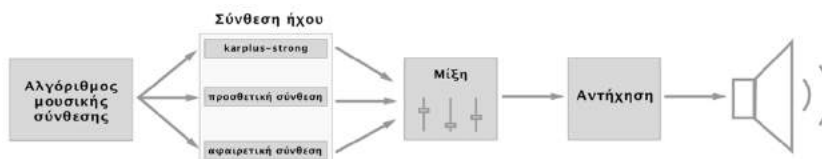
Η ηχητική σύνθεση δημιουργείται από το συνολικό άθροισμα/μείξη του αποτελέσματος τεσσάρων μεθόδων σύνθεσης ήχου: της προσθετικής σύνθεσης, της αφαιρετικής σύνθεσης, του αλγορίθμου Karplus-Strong [12], καθώς επίσης και μίας αυτοσχέδιας μεθόδου αποτελούμενης από δύο ταλαντωτές με μικρή διαφορά στην συχνότητα και ένα φίλτρο. Στην μίξη και των τεσσάρων πηγών προστίθεται στο τέλος αντήχηση. Με την είσοδο σε μια πίστα αλλάζουν τυχαία οι εντάσεις των τεσσάρων πηγών και ο χρόνος της αντήχησης. Για περισσότερη ποικιλία γίνονται αλλαγές στις τιμές των παραμέτρων των πηγών σε κάθε νότα, αλλά για να μην χαθεί η αίσθηση της επανάληψης, οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν τυχαία τις οκτώ πρώτες φορές σε κάθε πίστα και στη συνέχεια επαναλαμβάνονται ανά οκτώ όπως και οι νότες. Οι παράμετροι των πηγών που αλλάζουν είναι: στον αλγόριθμο Karplus-Strong η αποκοπή και ο χρόνος ημιζωής, στην αφαιρετική σύνθεση ο χρόνος απόσβεσης της έντασης, στην προσθετική σύνθεση οι εντάσεις των επιμέρους γεννητριών και στην αυτοσχέδια πηγή το είδος της κυματομορφής, η διαφορά στην συχνότητα των γεννητριών και η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου (βλ. Σχήμα 2.3).

2.4 Διάδραση

Ο έλεγχος του παιχνιδιού πραγματοποιείται μέσω φωνής (και συμπληρωματικά ή εναλλακτικά μέσω κίνησης). Για την υλοποίηση της φωνητικής διάδρασης χρησιμοποιείται αλγόριθμος εύρεσης της στάθμης και της θεμελιώδους συχνότητας. Συγκεκριμένα, η μέθοδος που ακολουθείται για τον έλεγχο του χαρακτήρα βασίζεται στην λογική των ορίων, τόσο σε επίπεδο στάθμης, όσο και συχνότητας, με το κομμάτι της συχνότητας να επηρεάζει την οριζόντια κίνηση. Αντίστοιχη λογική ακολουθείται σε επίπεδο στάθμης. Ξεπερνώντας ένα ανώτατο όριο, ο χαρακτήρας πηδάει, ενώ ένα κατώτατο όριο χρησιμοποιείται για την αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων λόγω εξωτερικού θορύβου. Βασικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου διάδρασης είναι η προσαρμοστικότητα των ορίων αυτών ώστε να ταιριάζει με τις συνθήκες του περιβάλλοντος που λαμβάνει χώρα. Η μοναδική ενέργεια του παίκτη που δεν βασίζεται στην φωνητική ανάδραση είναι αυτή της “επίθεσης” και απαιτεί την κίνηση οποιουδήποτε μέρους του σώματος του παίκτη μπροστά στην κάμερα.



Σχήμα 2.2 Αλγοριθμική διαδικασία σύνθεσης μελωδίας



Σχήμα 2.3 Αλγοριθμική διαδικασία σύνθεσης της ηχητικής επένδυσης

3. Επίδειξη και μελλοντικοί στόχοι

Το παιχνίδι αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα macOS με μελλοντικό στόχο τη δυνατότητα επέκτασης συμβατότητας σε windows, android και iOS συσκευές. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όσο και στο πλαίσιο έκθεσης ψηφιακής τεχνολογίας κατά τη διάρκεια της Διεθνούς Έκθεσης της Θεσσαλονίκης το Σεπτέμβριο του 2017. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την αποδελτίωση των ερωτηματολογίων της πρώτης εκ των ανωτέρω φάσεων δοκιμών, είναι εξαιρετικά ενθαρρυντικά, καθώς έδειξαν ότι η συντριπτική πλειοψηφία των παικτών αξιολόγησε ως πολύ καλή/άριστη την συνολική παιγνιακή εμπειρία, αλλά και το επίπεδο των γραφικών και του ήχου / μουσικής. Ειδικά για τον ήχο, το ανωτέρω ποσοστό ήταν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της εικόνας, κινούμενο στην περιοχή του 90%. Ιδιαίτερα σημαντικό ήταν και το γεγονός ότι καταγράφηκε μια πολύ καλή αίσθηση συμβατότητας μεταξύ των γραφικών και του τελικού ηχητικού αποτελέσματος, ενισχύοντας έτσι αποτελεσματικά το συνολικό αισθητικό αποτέλεσμα, αλλά και το ποσοστό εμπύθισης του παίκτη. Τέλος, η δυσκολία του παιχνιδιού αποτιμήθηκε ως

μέτρια, ενώ το 97% των παικτών απάντησαν ότι ευχαρίστως θα ξαναέπαιζαν κάποιο αντίστοιχο παιχνίδι. Κατά την δεύτερη φάση της επίσημης παρουσίασης του παιχνιδιού, αν και δεν έγινε αναλυτική καταγραφή αποκρίσεων χρηστών με χρήση ερωτηματολογίων, οι προφορικές εντυπώσεις κινήθηκαν περίπου στο ίδιο μήκος κύματος με τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης καταγραφών.

Λόγω της διαδικαστικής δημιουργίας, είναι προφανές ότι οι όποιες δυνατότητες εξέλιξης του παιχνιδιού περιορίζονται μόνο από την αλγοριθμικά εκφρασμένη φαντασία του προγραμματιστή δημιουργού. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι η παιγνιακή πλατφόρμα είναι ιδανική για τέτοιου είδους πειραματισμό, με ιδιαίτερα μάλιστα μικρούς χρόνους υλοποίησης, καθώς δεν απαιτείται ο χρόνος για την σύνθεση οπτικοακουστικού υλικού που συνήθως δαπανάται σε τυπικά ηλεκτρονικά παιχνίδια. Στην τρέχουσα έκδοση του παιχνιδιού, μια επιπρόσθετη λειτουργία η οποία μπορεί να υλοποιηθεί και να ενσωματωθεί σε αυτήν είναι η δυνατότητα της αποθήκευσης του καλύτερου σκορ μετά από κάθε επανεκκίνηση του παιχνιδιού ή τερματισμού του προγράμματος.

4. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Ahn, L.V., Dabbish, L. «Designing games with a purpose», *Commun. of ACM*, **51**, pp 58–67 (2008).
- [2] Harada, S., Wobbrock, J. and Landay, J. «Voice Games: Investigation Into the Use of Non-speech Voice Input for Making Computer Games More Accessible», In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2011* pp 11-29 (2011).
- [3] Nguyen P. «Procedural Virtual World Generation in a Massively Multiplayer Online Game», *Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki* (2016).
- [4] Carpenter, E. «Procedural Generation of Large Scale Gameworlds», *University of Dublin, Trinity College* (2011).
- [5] Liapis, A., Yannakakis, G. N., and Togelius J. «Computational game creativity», In *Proceedings of the International Conference on Computational Creativity*, pp 285–292 (2014).
- [6] Sporka, A.J., Kurniawan, S.H., Mahmud, M., Slavík, P. «Non-speech input and speechrecognition for real-time control of computer games», In *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 213–220 (2006).
- [7] Allison, F., Carter, M., Gibbs M. «A History of Voice Interaction in Digital Games», In *Proceedings of International Joint Conference of DiGRA and FDG* (2016.)
- [8] Reddy, D.R., Erman, L.D. and Neely, R.B. «A Model and a System for Machine Recognition of Speech», In *IEEE Trans. on Audio & Electroacoustics*, **21**, pp 229-238 (1973)
- [9] Hämäläinen, P., Mäki-Patola, T., Pulkki, V., Airas, M. «Musical Computer Games Played by Singing», In *Proc. of the 7th Int. Conference on Digital Audio Effects*, pp 367 -371 (2004).
- [10] Igarashi, T., Hughes, J.F. «Voice as sound: using non-verbal voice input for interactive control», In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 155–156 (2001).
- [11] Lan, T., Aryal, S., Ahmed, B., Ballard, K., Gutierrez-Osuna, R. «Flappy Voice: An Interactive Game for Childhood Apraxia of Speech Therapy», In

Proceedings of the first ACM SIGCHI annual symposium on Computer-human interaction in play, pp 429-430 (2014).

[12] Karplus, K., Strong, A. «Digital Synthesis of Plucked String and Drum Timbres», In *Computer Music Journal*. MIT Press. 7 pp 43–55 (1983).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5: Ακουστικές μετρήσεις, εκπομπές και υλικά**Μετρητική διάταξη εξαγωγής κρουστικής απόκρισης χώρου, με χρήση τεχνικών εκθετικής σάρωσης διπλού καναλιού, ισοστάθμισης των αποκρίσεων και ενεργού διαχωρισμού συχνοτήτων**

Γαλανόπουλος
Αναστάσιος
Ηλ. Μηχ. & Μηχ. Υπ.
agalanop@auth.gr

Χρήστος
Σεβαστιάδης, PhD
ΕΔΙΠ
csevast@ece.auth.gr

Γεώργιος
Παπανικολάου,
PhD
Καθηγητής
pap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση σήματος μεταβαλλόμενης εκθετικής σάρωσης διπλού καναλιού, υλοποιημένου στο πεδίο της συχνότητας, με αυθαίρετο φασματικό περιεχόμενο και σταθερή χρονικά περιβάλλουσα. Για την κατανομή του σήματος εφαρμόζεται ενεργός διαχωρισμός συχνοτήτων. Σκοπός αυτής της υλοποίησης είναι η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων ενός τυπικού σήματος σάρωσης - δηλαδή υψηλό SNR, αντοχή στην παραμόρφωση και την χρονική διακύμανση - σε συνδυασμό με τη βελτίωση της απόδοσης των ηχητικών πηγών μέσω της ισοστάθμισης και της προσαρμογής του ρυθμού σάρωσης του σήματος στην απόκρισή τους. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με λογισμικό που αναπτύχθηκε στη γλώσσα Python. Για τον έλεγχο της παραπάνω μεθοδολογίας σε πραγματικές μετρήσεις σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία πηγή χαμηλών συχνοτήτων, η οποία σε συνδυασμό με υπάρχουσα δωδεκάεδρη πανκατευθυντική πηγή αποτέλεσαν την πηγή του σήματος διέγερσης.

Room Impulse Response, two-way source measurement system with active equalization and crossover functionality using variable sweep rate dual-channel method**ABSTRACT**

The utilization of dual channel exponential sweep, implemented in frequency domain, with an arbitrary spectral content and constant temporal envelope. To divide signal into two channels, active crossover technique was applied. This implementation aims to utilize the characteristics of a typical sweep - i.e. high SNR, immunity to distortion or time variance - combined with the enhanced two-way speaker performance owing to equalization and sweep rate modulation adaptation to speaker's response. This technique was applied in a software developed in the programming language Python. To test the proposed method in real measurements, a sub-woofer was designed and constructed, to be combined with an omnidirectional source as a combined two-way sound source.

Εισαγωγή

Η μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς αποτελεί την βάση αξιολόγησης μίας συσκευής ήχου ή ενός χώρου, καθώς μας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για αρκετές παραμέτρους όπως για παράδειγμα την απόκριση συχνοτήτων, τη φασική απόκριση, τον χρόνο αντήχησης, την αρμονική παραμόρφωση. Οι αυξημένες απαιτήσεις ακρίβειας που εισάγουν οι μετρήσεις των ακουστικών παραμέτρων των κλειστών χώρων καθώς και οι διάφορες αδυναμίες των μέχρι τώρα προτεινόμενων τεχνικών (MLS, FFT διπλού καναλιού, σαρωτικού ημιτόνου) μας οδήγησαν στη διεύρυνση της μεθόδου τροποποιημένου σήματος σάρωσης ημιτόνου. Η προτεινόμενη μέθοδος στοχεύει στην αξιοποίηση και στην περαιτέρω ενίσχυση των πλεονεκτημάτων των σημάτων σάρωσης όπως του υψηλού συντελεστή κορύφωσης, της σημαντικής αντοχής στην χρονική διακύμανση και στην παραμόρφωση καθώς και της δυνατότητας απομόνωσης των αρμονικών παραμορφώσεων από την εξαχθείσα κρουστική απόκριση [1],[2]. Η μεταβολή του ρυθμού και του πλάτους του ημιτόνου σάρωσης δημιουργεί σήματα τα οποία αντισταθμίζουν την ανομοιομορφη συχνοτική απόκριση των πηγών μέτρησης, και επιτρέπουν το διαχωρισμό της διέγερσης μεταξύ δύο συνδυασμένων πηγών, με σκοπό την επαρκή διέγερση του χώρου σε ολόκληρο το συχνοτικό φάσμα μέτρησης [3].

1. Μετρητική διάταξη

Η μέτρηση της κρουστικής απόκρισης απαιτεί διέγερση σε τρίτο-οκτάβες με κεντρικές συχνότητες από τα 50 Hz μέχρι και τα 5000 Hz, προϋποθέτοντας τόσο ομοιόμορφη ακτινοβολία της πηγής διέγερσης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, όσο και επαρκή διέγερση στις δύσκολες χαμηλές συχνότητες [4],[5]. Για την επίτευξη της απαίτησης επιλέχθηκε η συγκρότηση ειδικής διάταξης πηγών, αποτελούμενη από μια δωδεκάεδρη παν-κατευθυντική πηγή για τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες και ένα ηχείο χαμηλών συχνοτήτων το οποίο κατασκευάστηκε προκειμένου να καλύψει την αδυναμία λειτουργίας της πρώτης πηγής σε συχνότητες κάτω των 250 Hz [6].

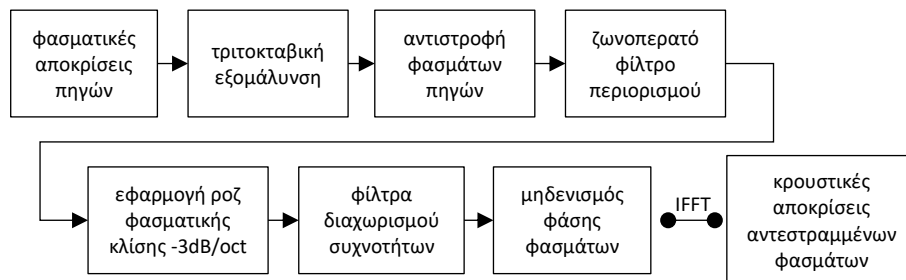
Η διάταξη σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να λειτουργεί ως τυπική πηγή δύο δρόμων με ενσωματωμένο παθητικό κύκλωμα διαχωρισμού αλλά και ως πηγή δύο ανεξάρτητων καναλιών, προκειμένου να τροφοδοτηθούν από το ειδικό σήμα σάρωσης της προτεινόμενης μεθόδου, εφαρμόζοντας ενεργό διαχωρισμό συχνοτήτων [7],[8].

2. Μέθοδος εξαγωγής κρουστικής απόκρισης

Τρεις είναι οι επιμέρους φάσεις της υπό μελέτης μεθόδου εξαγωγής της κρουστικής απόκρισης χώρου. Στην πρώτη γίνεται αντιστάθμιση της απόκρισης των ηχείων μέτρησης, στην δεύτερη δημιουργείται το σήμα σάρωσης των ηχείων και στην τρίτη προσομοιώνεται το σήμα αναφοράς.

Αρχικά δημιουργείται ένα εκθετικό σήμα σάρωσης για την μέτρηση της απόκρισης καθενός εκ των δύο επιμέρους πηγών [9]. Στη συνέχεια εφαρμόζεται τρίτο-οκταβική ομαλοποίηση στις αποκρίσεις των ηχείων, οι οποίες και αντιστρέφονται. Εφαρμόζεται ζωνοπερατό φίλτρο υψηλής τάξης προκειμένου να

αποφευχθεί η ενίσχυση των ακραίων τιμών. Ακολουθώς χρησιμοποιείται φίλτρο -3 dB/oct για να επιτευχθεί ροζ φασματικό περιεχόμενο και οι δύο αποκρίσεις διαχωρίζονται με το συνδυασμό ενός χαμηλοπερατού και ενός υψιπερατού φίλτρου σε δύο περιοχές, ανάλογα με τις αποκρίσεις των επιμέρους πηγών.



Σχήμα 2-1: Προ-επεξεργασία για σήμα σάρωσης διπλού καναλιού, με ισοστάθμιση μεγαφώνων 2 δρόμων και ενεργό κύκλωμα διαχωρισμού.

Το φάσμα των δύο αποκρίσεων μετά την παραπάνω επεξεργασία και αφού εφαρμοστεί παράθυρο στο πεδίο του χρόνου για την ομαλοποίηση του υψίσχου περιεχομένου, αποτελεί το φάσμα του σήματος διέγερσης. Από το διαμορφωμένο πλάτος του φάσματος υπολογίζεται η απαιτούμενη καθυστέρηση ομάδας σύμφωνα με την σχέση [3]:

$$\tau_G(f) = \tau_G(f - df) + C \cdot \sum_{Ch=1}^2 |H(f)|^2,$$

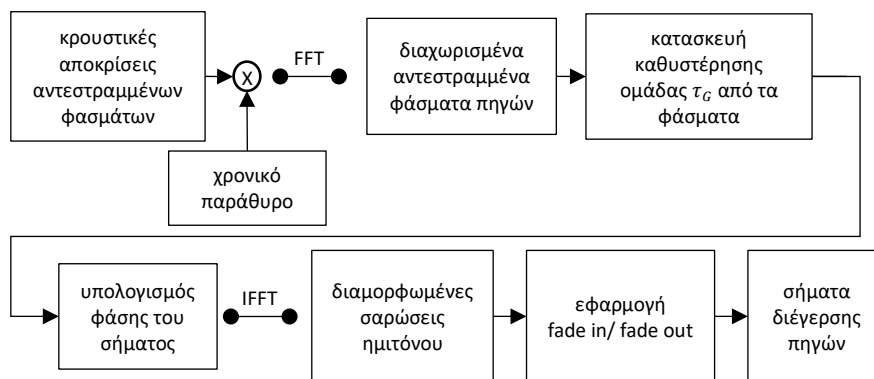
όπου $df = f_s/2$ και C είναι υπολογίζεται από το άθροισμα της συνολικής ενέργειας των δύο σημάτων [3]:

$$C = \frac{\tau_G(f_{END}) - \tau_G(f_{START})}{\sum_{Ch=1}^2 \sum_{f=0}^{f_s/2} |H(f)|^2}, \text{ με } df = \frac{f_s}{2^N}.$$

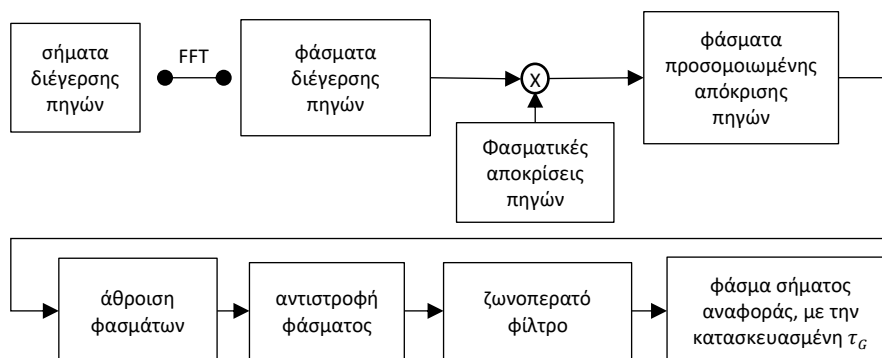
Οι τιμές f_{END} και f_{START} είναι η πρώτη συχνότητα του διακριτού φάσματος του FFT και η μισή συχνότητα δειγματοληψίας κατά Nyquist $f_s/2$ αντίστοιχα. Το τελικό σήμα σάρωσης προκύπτει από τον IFFT του πλάτους και της φάσης αφού λάβουν πολική μορφή. Τέλος, από την καθυστέρηση ομάδας υπολογίζεται η αντίστοιχη φάση του σήματος.

Η χρήση σήματος αναφοράς είναι κατά έναν τρόπο υποκατάστατο της μέτρησης αναφοράς. Στη δεδομένη περίπτωση η μέτρηση της αναφοράς μέσω της σύνδεσης της εισόδου και της εξόδου του συστήματος, της διέγερση του σήματος και της αντιστροφή της μετρημένης φασματικής απόκρισης δεν είναι υλοποιήσιμη καθότι θα εξαφάνιζε την ισοστάθμιση των αποκρίσεων των ηχείων. Η προσομοίωση του σήματος αναφοράς εξάγεται ξεκινώντας με τον πολλαπλασιασμό του φάσματος των διαμορφωμένων σημάτων διέγερσης με τις αντίστοιχες αποκρίσεις των πηγών. Στη συνέχεια τα δύο κανάλια αθροίζονται, το ενιαίο φάσμα αντιστρέφεται και τέλος εφαρμόζεται ζωνοπερατό φίλτρο για την σίγαση του θορύβου έξω από την συχνοτική περιοχή που μας ενδιαφέρει. Στο δημιουργημένο φάσμα αντιστοιχίζεται η ίδια καθυστέρηση ομάδας που συντέθηκε για τη δημιουργία των δύο σημάτων διέγερσης. Με το φάσμα αναφοράς πολλαπλασιάζονται οι φασματικές αποκρίσεις των πηγών που διεγείρονται με τα τροποποιημένα σήματα σάρωσης ημιτόνου. Έτσι, αποκτάται

η απόκριση του μετρούμενου χώρου με ενεργειακά ροζ διέγερση, έχοντας απαλείψει την ανομοιομορφία της απόκρισης των πηγών.



Σχήμα 2-2: Δημιουργία του τροποποιημένων σημάτων σάρωσης διπλού καναλιού.

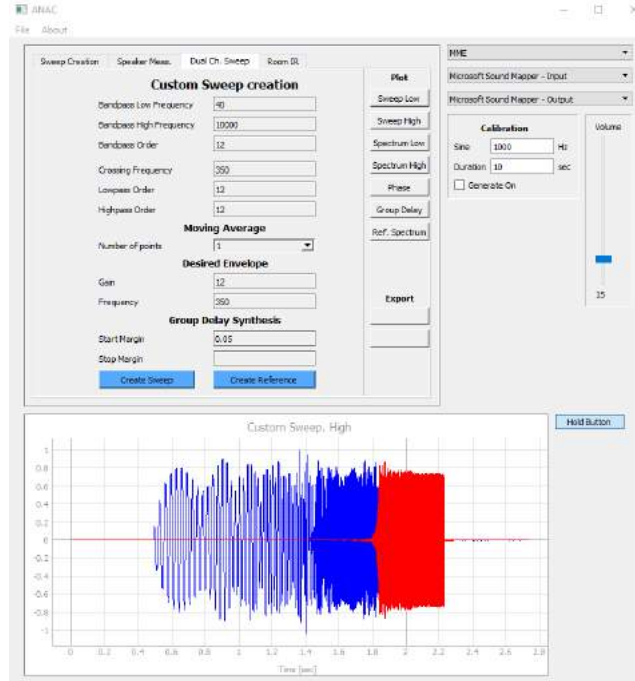


Σχήμα 2-3: Δημιουργία του φάσματος αναφοράς για την αποσυνέλιξη του φάσματος της απόκρισης στο διπλό σήμα που εκτέμφθηκε από τη πηγή δύο δρόμων.

3. Λογισμικό ANAC

Για την εφαρμογή της μεθόδου αναπτύχθηκε λογισμικό στη γλώσσα Python. Η επεξεργασία του σήματος υλοποιήθηκε με τις υπολογιστικές βιβλιοθήκες NumPy και SciPy της Python. Η επικοινωνία μεταξύ της κάρτας ήχου και του λογισμικού πραγματοποιήθηκε με τη βιβλιοθήκη sounddevice, η οποία βασίζεται στην βιβλιοθήκη ήχου PortAudio [10],[11].

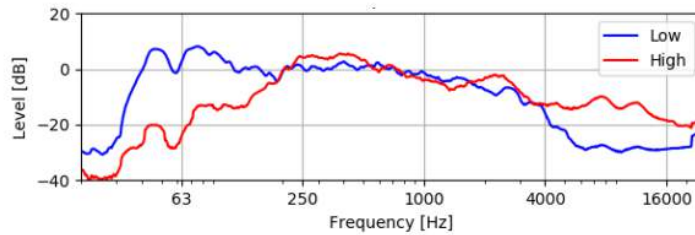
Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού αναπτύχθηκε στη βιβλιοθήκη Qt με το περιβάλλον ανάπτυξης γραφικών Qt Designer και χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη PyQt 5.9.2 της Python [12]. Οι γραφικές παραστάσεις υλοποιήθηκαν με την χρήση της βιβλιοθήκης pyqtgraph [13].



Σχήμα 3-1: Γραφικό περιβάλλον λογισμικού ANAC.

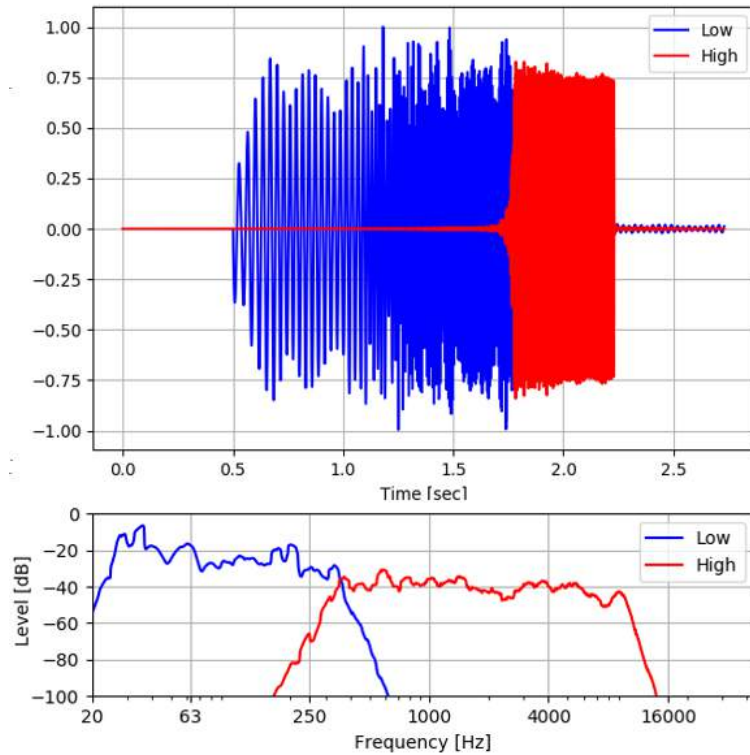
4. Αποτελέσματα μέτρησης

Οι αποκρίσεις των δύο πηγών μετρήθηκαν σε συνθήκες ελεύθερου ακουστικού πεδίου όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-1.



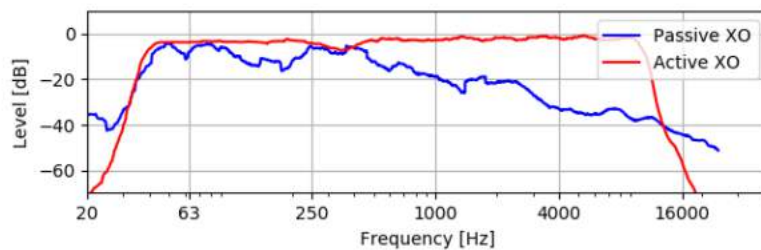
Σχήμα 4-1: Συνάρτηση μεταφοράς των δύο πηγών.

Τα ειδικά σήματα σάρωσης, με ακραίες συχνότητες τα 40 Hz και τα 10 kHz και συχνότητα διαχωρισμού τα 350 Hz δημιουργήθηκαν σύμφωνα με την μέθοδο, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Το κατασκευασμένο σήμα σάρωσης στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.

Τέλος, μετρήθηκε η συνάρτηση μεταφοράς των πηγών κατά την διέγερσή τους με τα ειδικά σήματα σάρωσης που δημιουργήθηκαν προηγουμένως και συγκρίθηκε με την μέτρηση της συνάρτησης μεταφοράς των πηγών κατά την διέγερσή τους με τυπικό σήμα εκθετικής σάρωσης και χρήση του παθητικού κυκλώματος διαχωρισμού συχνοτήτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3. Από το διάγραμμα είναι φανερό ότι πλέον ο χώρος διεγείρεται



Σχήμα 4-3: Απόκριση των πηγών για διέγερση με το παθητικό κύκλωμα διαχωρισμού και ειδικό σήμα σάρωσης με βάση τη νέα μέθοδο.

5. Συμπεράσματα

Αρχικά ο ενεργός διαχωρισμός συχνοτήτων αποτελεί μία ιδιαίτερα βολική υλοποίηση, καθώς δίνεται η δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών πηγών με επιλογή της συχνότητας διαχωρισμού καθώς και των τάξεων των φίλτρων από τον χρήστη μέσω του λογισμικού. Επιπρόσθετα, η παρατεταμένη διέγερση των πηγών στις περιοχές ασθενούς λειτουργίας τους, οδήγησε στην ομαλοποίηση της τελικής απόκρισής τους. Κατ' αυτό τον τρόπο διευρύνεται η ωφέλιμη περιοχή λειτουργίας των πηγών. Ακόμη, στην τελική εξομάλυνση της απόκρισης συνέβαλλε καταλυτικά η χρήση αντίστροφου φίλτρου, με το οποίο ενισχύθηκε το πλάτος των ειδικών σημάτων σάρωσης στις περιοχές όπου η απόκριση των πηγών είναι εξασθενημένη.

Παρά τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της χρήσης σημάτων σάρωσης έναντι των υπολοίπων μεθόδων, η ακρίβειά τους μειώνεται δραστικά με την εμφάνιση κρουστικού θορύβου κατά την μέτρηση, οπότε και προτείνεται η επανάληψη της [14]. Επιπρόσθετα, τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας του σήματος απαιτούν πολλαπλές δοκιμές και τροποποιήσεις προκειμένου να εφαρμοσθούν βέλτιστα στην εκάστοτε μετρητική διάταξη [15].

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης μεταξύ του προτεινόμενου συστήματος και των εμπορικών συστημάτων που εφαρμόζουν τη μέθοδο της σάρωσης ημιτόνου. Για την περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου στη μέτρηση του χρόνου αντήχησης προτείνεται ο συνυπολογισμός στην ενεργειακή προσαρμογή των δημιουργούμενων σημάτων σάρωσης του μετρούμενου σηματοθορυβικού λόγου σε κάθε περίπτωση μέτρησης. Έτσι πιθανόν να επιτευχθούν ακριβέστερα αποτελέσματα, καθώς η μέτρηση θα είναι προσαρμοσμένη επιπλέον στο συχνοτικό φάσμα του θορύβου υποβάθρου, αντισταθμίζοντας έτσι τις επιπτώσεις του στην ακρίβεια των μετρήσεων.

6. Αναφορές

- [1] G. Stan, J. Embrechts, A. E. S. Member, and D. Archambeau, "Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques *," no. December, pp. 249–262, 1979.
- [2] P. Svensson and J. L. Nielsen, "Errors in MLS Measurements Caused by Time Variance in Acoustic Systems," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 47, no. 11, pp. 907–927, 1999.
- [3] S. Müller and P. Massarani, "Transfer-Function Measurement with Sweeps," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 443–471, 2001.
- [4] British Standards Institution, "BS EN ISO 16283-1, Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation," vol. 3. p. 42, 2012.
- [5] British Standards Institution, "BS EN ISO 10140-1:2010 Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 1: Application rules for specific products." 2010.
- [6] ITA Aachen, "ITA Measuring Loudspeaker." [Online]. Available: www.ee.bgu.ac.il/~acl/Equip/Dode-brochure.pdf.
- [7] V. Dickason, *Loudspeaker Design Cookbook*. .
- [8] R. H. Small, "Vented-box Loudspeaker Systems Part 1: Small-signal Analysis," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 21, no. 5. pp. 363–

- 372, 1973.
- [9] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” *Proc. AES 108th conv, Paris, Fr.*, no. I, pp. 1–15, 2000.
- [10] “sounddevice 0.3.10.” [Online]. Available: <https://pypi.python.org/pypi/sounddevice>.
- [11] R. B. and P. Burk, “PortAudio.” [Online]. Available: <http://www.portaudio.com/>.
- [12] “PyQt.” [Online]. Available: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>.
- [13] Luke Campagnola, “PyQtGraph.” [Online]. Available: <http://www.pyqtgraph.org/>.
- [14] P. Guidorzi, L. Barbaresi, D. D’Orazio, and M. Garai, “Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: An in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1611–1616, 2015.
- [15] A. Farina, “Advancements in impulse response measurements by sine sweeps,” *Proc. 122nd AES Conv.*, 2007.

Αυτοματοποίηση βέλτιστων πρακτικών ηχογράφησης σε φορητές συσκευές

Λάζαρος Βρύσης
Υπ. Διδάκτορας
lvrysis@auth.gr

Νικόλαος Βρύζας
Υπ. Διδάκτορας
nvryzas@auth.gr

Στάθης Σιδηρόπουλος
Υπ. Διδάκτορας
stathsid@auth.gr

Ευαγγελία Αβραάμ
Διδάκτορας
avraam@jour.auth.gr

Χαράλαμπος Δημούλας
Επίκουρος Καθηγητής
babis@jour.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αποτίμηση εφαρμογών λογισμικού για φορητές συσκευές, που εξυπηρετούν διαδικασίες ηχομετρήσεων καταδεικνύει πως η εγκαθίδρυση ενός «έξυπνου» πλαισίου διαχείρισης του ηχητικού σήματος σε διαδικασίες ηχογράφησης για τις ανάγκες δημοσιογράφων/ρεπόρτερ είναι βάσιμη. Στις περισσότερες περιπτώσεις που αφορούν καταγραφή ήχου για δημοσιογραφική χρήση, δεν είναι δυνατή η επανάληψη της ηχογράφησης και, συνεπώς, ο εντοπισμός σφαλμάτων καταγραφής κατά το στάδιο της μετα-παραγωγής μπορεί να οδηγήσει στην αναγκαστική απόρριψη ηχογραφήσεων μη αποδεκτής ποιότητας. Το προτεινόμενο πλαίσιο περιλαμβάνει τεχνικές για την παρακολούθηση της ηχητικής στάθμης, του χρόνου αντήχησης αλλά και σημασιολογικής ανάλυσης του καταγραφόμενου ήχου, παρέχοντας κατάλληλη ανάδραση στον χειριστή, προκειμένου να διορθώσει τυχόν σφάλματα και να διασφαλιστεί έτσι η αναβάθμιση της ποιότητας των καταγραφών. Οι τεχνικές αυτές αφορούν την ανάλυση του φάσματος και των δυναμικών του σήματος, την εκτίμηση της αντήχησης και θα φτάνουν ως τη σημασιολογική ανάλυση των καταγραφών.

Automating audio recording best practices on mobile devices

ABSTRACT

Evaluation of mobile applications serving sound measurement procedures demonstrate that the establishment of a “smart” framework for sound signal management of recordings for journalism/reporting needs is valid. In most scenarios concerning sound capturing for journalistic purposes, repetition of recording is not possible, and, thus, error detection during post-production can lead to the mandatory rejection of recordings of unacceptable quality. The proposed framework includes techniques for the tracking of the sound level, reverberation time and semantic analysis of captured sound, providing the user with proper feedback, in order to avoid errors and ensure the improvement of overall recording quality. Such techniques concern signal spectrum and dynamics analysis, reverberation estimation and feature-based semantic analysis of the recordings

Εισαγωγή

Το τεχνολογικό τοπίο τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει ραγδαία πρόοδο στον τομέα των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και κυρίως των έξυπνων κινητών τηλεφώνων. Το υπάρχον υπόβαθρο όσον αφορά το υλικό αλλά και το λογισμικό παρέχει αξιοσημείωτες δυνατότητες για την ανάπτυξη ποικίλων εφαρμογών και εργαλείων για αυτές τις συσκευές [1]. Σε αυτό το πλαίσιο, πολλές διαδικασίες καταγραφής πολυμεσικού υλικού (ακίνητη εικόνα, ηχητικό σήμα, βίντεο) είναι δυνατόν να διεκπεραιωθούν με τη χρήση καταναλωτικού/συμβατικού εξοπλισμού, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα, παράγοντας υψηλής πιστότητας καταγραφές [2]. Σε ολόένα και περισσότερες περιπτώσεις, η χρήση smartphones μπορεί να διευκολύνει τις σχετικές διαδικασίες, λόγω πλεονεκτημάτων σε θέματα πρακτικότητας (μέγεθος, βάρος, προσιτή διεπαφή χρήστη). Ωστόσο, δυνατότητες και ευκολίες που συναντώνται σε υλικο/λογισμικό επαγγελματικών προδιαγραφών συχνά δεν ενσωματώνονται σε εμπορικές εφαρμογές λογισμικού.

Μέσα σε αυτό το τεχνολογικό πλαίσιο, νέες τάσεις εμφανίζονται στη διαδικασία της παραγωγής δημοσιογραφικού υλικού και του ρεπορτάζ, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία στην ειδησεογραφική κάλυψη, αλλά δημιουργώντας και την ανάγκη προσαρμογής του τρόπου λειτουργίας των οργανισμών [3], [4]. Αναπτύσσονται και ενσωματώνονται όλο και περισσότερο πρακτικές «Φορητής Δημοσιογραφίας» (Mobile Journalism – MoJo), αξιοποιώντας τις δυνατότητες των φορητών συσκευών, καθώς και μια πληθώρα περιφερειακών (μικρόφωνα, φακοί κλπ) που υποστηρίζουν τις διαδικασίες οπτικοακουστικής παραγωγής [5], [6]. Τέτοιες πρακτικές μπορούν να υποστηριχτούν από μοντέλα που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος, παρέχοντας αναβαθμισμένες υπολογιστικές δυνατότητες, και δυνατότητες ανάπτυξης συνεργατικών αρχιτεκτονικών διαχείρισης της ροής εργασιών [7], [8].

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η διερεύνηση ενσωμάτωσης τεχνικών που να εκτελούνται αυτοματοποιημένα και να βοηθούν στη βελτιστοποίηση πρακτικών ηχογράφησης σε φορητές υπολογιστικές συσκευές, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα, ώστε να αξιοποιούνται στο έπακρο για επαγγελματική χρήση.

1. Αυτόματη βελτιστοποίηση ηχογραφήσεων

Σε παλαιότερες εργασίες μας έχει γίνει η σχεδίαση και αξιολόγηση εφαρμογών λογισμικού για φορητές συσκευές, που εξυπηρετούν διαδικασίες ηχομετρήσεων [2]. Η αποτίμηση αυτών των εργαλείων καταδεικνύει τη χρησιμότητα ενός «έξυπνου» πλαισίου διαχείρισης του ηχητικού σήματος σε διαδικασίες ηχογράφησης για τις ανάγκες δημοσιογράφων/ρεπόρτερ. Στις περισσότερες περιπτώσεις καταγραφής ήχου για δημοσιογραφική χρήση, δεν είναι δυνατή η επανάληψη της ηχογράφησης και, συνεπώς, ο εντοπισμός σφαλμάτων καταγραφής κατά το στάδιο της μετα-παραγωγής μπορεί να οδηγήσει στην αναγκαστική απόρριψη ηχογραφήσεων μη αποδεκτής ποιότητας. Το προτεινόμενο πλαίσιο στοχεύει στην παροχή κατάλληλης ανάδρασης στον χειριστή, προκειμένου να διορθώσει τυχόν σφάλματα.

Βασικοί πυλώνες στη διαδικασία βελτιστοποίησης ηχογραφήσεων είναι η συνεχής παρακολούθηση της κυματομορφής του σήματος εισόδου, ο υπολογισμός της ηχητικής στάθμης αλλά και η σημασιολογική ανάλυση του καταγραφόμενου ηχητικού περιεχομένου και ο συνδυασμός τους για τον εντοπισμό ανεπιθύμητης περίπτωσης καταγραφής. Έπειτα από μια διαδικασία διερεύνησης για την συστηματική κατηγοριοποίηση αυτών των περιπτώσεων, διαμορφώθηκαν

κατηγορίες: **(a)** ψαλιδισμός του καταγραφόμενου σήματος, **(b)** υψηλή στάθμη θορύβου φόντου, **(c)** χαμηλός σηματοθορυβικός λόγος, **(d)** παρουσία θορύβου υψηλής ηχητικής στάθμης και **(e)** μη ενδεδειγμένη ακουστική χώρα με υψηλό χρόνο αντήχησης.

Η παρακολούθηση του πηγαίου ηχητικού σήματος, όπως και ο υπολογισμός της ηχητικής στάθμης μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν στο πλαίσιο μιας εφαρμογής λογισμικού για φορητές συσκευές [2]. Στον αντίποδα, η επιπλέον απαίτηση για αξιόπιστη σημασιολογική ανάλυση και κατηγοριοποίηση του ηχητικού περιεχομένου, αξιολογείται ως περισσότερο απαιτητική, χωρίς ωστόσο να κρίνεται αδύνατη [10]. Εφαρμογές λογισμικού που έχουν σχεδιαστεί για ερευνητικούς σκοπούς, αποδεικνύουν πως τέτοιου τύπου μονάδες επεξεργασίας μπορούν να επιτύχουν αξιόλογες επιδόσεις όσον αφορά την ακρίβεια ταξινόμησης [12].

Η έξυπνη παρακολούθηση του θορύβου βασίζεται στη φασματική ανάλυση του σήματος και υπολογίζει τη στάθμη μόνο στο συχνοτικό εύρος της ανθρώπινης ομιλίας. Η παρουσία ανεπιθύμητων ήχων εξαιρετικά υψηλής ή χαμηλής συχνότητας σε σχέση με το καθορισμένο εύρος δεν θα είναι απαραίτητα απαγορευτική για την πραγματοποίηση της καταγραφής. Έτσι, η μονάδα σημασιολογικής ανάλυσης δύναται να εντοπίζει πηγές θορύβου ή προβλημάτων αξιοποιώντας ένα σχήμα ταξινόμησης συνηθισμένων τύπων θορύβου και παρεμβολών, όπως η καταγραφή του ανέμου, θορύβου λειτουργίας συσκευών (κλιματισμός, ψυγείο, τροφοδοτικά), θόρυβος προβληματικών καλωδίων, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [11]. Επιπρόσθετα, γίνεται εκτίμηση της στάθμης φόντου, προκειμένου να ενημερώνεται ο χειριστής σε περιπτώσεις υψηλών σταθμών. Σε επόμενο επίπεδο δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της αντήχησης του χώρου μέσω καταγραφής δοκιμαστικού κρότου μικρής διάρκειας (π.χ. παλαμάκι) [10]. Με αυτόν τον τρόπο, σχηματίζεται ένα προσεγγιστικό προφίλ της ακουστικής του χώρου και θα παρουσιάζονται στον χειριστή οι κατάλληλες συστάσεις για βελτίωση των συνθηκών ηχογράφησης.

Ο χρήστης, αφού ενημερωθεί για την παρουσία θορύβου από σχετική ένδειξη, μπορεί να επιχειρήσει να καταστείλει την πηγή θορύβου (χρήση αντιανεμιού, απενεργοποίηση συσκευών, αλλαγή καλωδίων κ.ο.κ.) ή να επιλέξει διαφορετικό χώρο για την πραγματοποίηση της ηχογράφησης.

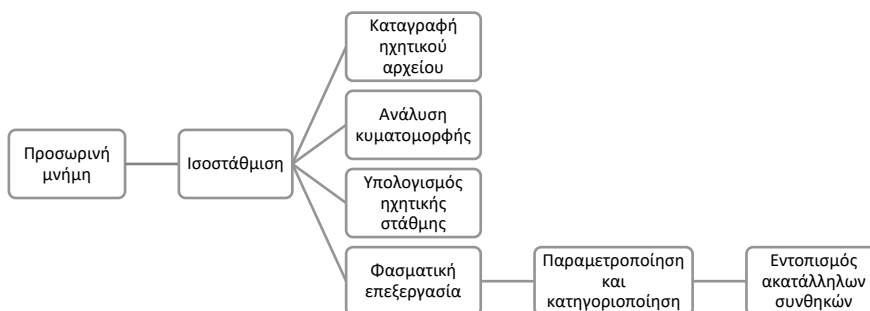
2. Ανάπτυξη και αξιολόγηση πιλοτικής εφαρμογής

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε μια πιλοτική εφαρμογή βάσει των προδιαγραφών που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα με το όνομα *JSorder*. Η εφαρμογή σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει δυνατότητα πραγματοποίησης ηχητικών καταγραφών για δημοσιογραφικούς σκοπούς, καλύπτοντας όλες τις απαραίτητες απαιτήσεις λειτουργικότητας. Παράλληλα, ενσωματώνει μια έξυπνη μονάδα εντοπισμού ανεπιθύμητων συνθηκών που μπορεί να οδηγήσουν σε υποβάθμιση της ποιότητας των ηχογραφήσεων. Η υλοποίηση λογισμικού δύναται να διαχειριστεί πολλαπλές συνεδρίες μέτρησης, υποστηρίζει δυνατότητες αυτόματης χωροχρονικής επισημείωσης των καταγραφών (πχ GPS), ενώ ενσωματώνει γραφική διεπαφή για την επιλογή εσωτερικού ή εξωτερικού μικροφώνου, όπως και για τη χειροκίνητη βαθμονόμησή τους. Το λογισμικό προορίζεται για την πλατφόρμα *iOS* και η ανάπτυξη βασίστηκε στο περιβάλλον *Xcode*, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού *Objective-C* και του συνόλου εργαλείων *iOS SDK* [9]. Η

διαδικασία ολοκλήρωσης της εφαρμογής βασίστηκε στο πεντάπτυχο: ανάλυση, σχεδιασμός, ανάπτυξη, εκσφαλμάτωση, αξιολόγηση.

2.1 Μονάδα ηχητικής ανάλυσης

Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιείται σύλληψη του ηχητικού σήματος σε πραγματικό χρόνο με την χρήση των υπηρεσιών *AudioQueues* που παρέχονται από το *AudioToolbox Framework* του *iOS SDK*. Μέσω των *AudioQueues* είναι δυνατή η προσπέλαση των πηγαίων δεδομένων εισόδου από τα *buffers* εισόδου του προσαρμογέα ήχου των συσκευών. Αυτή η επιλογή ελαχιστοποιεί την καθυστέρηση εισόδου, παρακάμπτει οποιονδήποτε αλγόριθμο προεπεξεργασίας που μπορεί να ενσωματώνει το λειτουργικό σύστημα, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα παρακάμψης της λειτουργίας αυτόματου ελέγχου του κέρδους (*Audio Gain Control - AGC*) [2].



Σχήμα 2.1 Ροή επεξεργασίας του ηχητικού σήματος

Σε επόμενο βήμα, τα ηχητικά δεδομένα αποθηκεύονται σε προσωρινή μνήμη της εφαρμογής, ώστε να καταστεί δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία τους, ενώ έπειτα ακολουθεί η διαδικασία ισοστάθμισης του σήματος. Τα δεδομένα εξόδου δρομολογούνται σε τέσσερις διαφορετικές μονάδες επεξεργασίας: **(i)** διαμόρφωσης και αποθήκευσης των αρχείων ήχου, **(ii)** υπολογισμού της ηχητικής στάθμης, **(iii)** ελέγχου της κυματομορφής και **(iv)** σημασιολογικής ανάλυσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

(i) Μονάδα αποθήκευσης του ηχητικού αρχείου: είναι υπεύθυνη για την διαμόρφωση της δομής του ηχητικού αρχείου (προσθήκη κεφαλίδας, εγγραφή στη μονάδα αποθήκευσης), ενώ παράλληλα εξασφαλίζει τη συνέχεια των ηχητικών δεδομένων. Τα παραγόμενα αρχεία έχουν τη μορφή *PCM Waveform* με συχνότητα δειγματοληψίας *44.1kHz* και κβάντιση *32bit*. Τα αρχεία είναι μονοφωνικά όταν γίνεται χρήση του ενσωματωμένου μικροφώνου, ενώ στερεοφωνικά αν έχει συνδεθεί κάποιος εξωτερικός μετατροπέας (πχ μικρόφωνο).

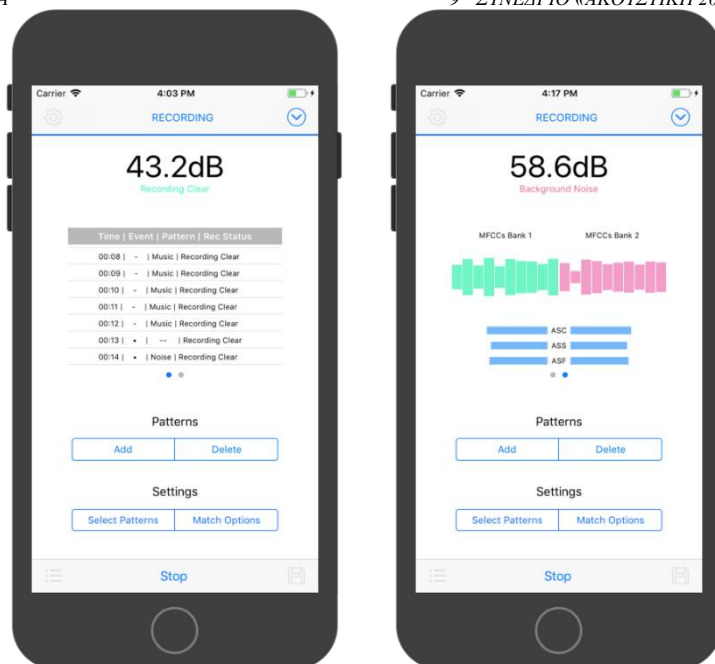
(ii) Μονάδα υπολογισμού της ηχητικής στάθμης: υποστηρίζει τη χρήση φίλτρων *A/B/C/D* και αποκρίσεων *Impulsive/Fast/Slow* κατά *ANSI*, με απόκλιση $\pm 1.5dB$ στο συχνοτικό εύρος *50-18kHz* και στη δυναμική περιοχή από *30* έως *110dB(A)*. Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου προβλήματος, και αποσκοπώντας στον εντοπισμό πηγών θορύβου στο ευρύτερο δυνατό φασματικό εύρος, αποφασίστηκε ο υπολογισμός της ηχητικής στάθμης να πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση κάποιου φίλτρου και βάσει της απόκρισης *Slow*.

(iii) Μονάδα ελέγχου της ηχητικής κυματομορφής: έχει ως στόχο την εύρεση σημείων ψαλιδισμού του σήματος. Συγκεκριμένα, στις συσκευές τύπου *iPhone*, τα δείγματα εισόδου αποτυπώνονται ως αριθμοί κινητής υποδιαστολής και λαμβάνουν τιμές από -1 έως 1 . Συνεπώς, τιμές δειγμάτων που έχουν απόλυτη τιμή κοντά στη μονάδα, καταδεικνύουν σύντομες χρονικές περιόδους στις οποίες πιθανότατα έχει υποστεί ψαλιδισμό το σήμα και σε αυτές τις περιπτώσεις ενεργοποιείται η σχετική προειδοποίηση.

(iv) Μονάδα σημασιολογικού ελέγχου: πραγματοποιεί εντοπισμό τριών ανεπιθύμητων φαινομένων, *υψηλή στάθμη θορύβου φόντου*, *χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο* και *παρουσία θορύβου υψηλής ηχητικής στάθμης*. Το υπό επεξεργασία ηχητικό περιεχόμενο, μετά το στάδιο του ισοσταθμιστή δρομολογείται σε δύο κανάλια φασματικής ανάλυσης, ένα ζωνοπερατό και ένα ευρυζωνικό τα οποία τροφοδοτούν τη μονάδα υπολογισμού ηχητικών χαρακτηριστικών παραμέτρων. Οι βασικές χαρακτηριστικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι συνολικά 22: *Spectral Centroid*, *Spectral Spread*, *Spectral Kurtosis*, *Spectral Skewness*, *Spectral Flatness*, *Spectral Slope*, *Spectral Rolloff*, *Spectral Crest Factor*, *Spectral Flux*, *Zero Crossing Rate* και *12 MFCCs*. Το σύνολο αυτών υπολογίζεται στο ευρυζωνικό κανάλι επεξεργασίας, ενώ όλες πλην των *MFCCs* εφαρμόζονται και στο ζωνοπερατό κανάλι, δημιουργώντας ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών παραμέτρων διάστασης 32. Η εξαγωγή των παραμέτρων γίνεται σε πλαίσια διάρκειας $\sim 50ms$ με βήμα $\sim 25ms$, και έπειτα από μια διαδικασία χρονικής ολοκλήρωσης των χαρακτηριστικών για την εξαγωγή μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σε ένα ευρύτερο πλαίσιο του ενός δευτερολέπτου, εξάγεται το τελικό διάνυσμα ηχητικών παραμέτρων με διάσταση 64 [13]. Αυτό το διάνυσμα αποτελεί την είσοδο για το μοντέλο ταξινόμησης, στο οποίο χρησιμοποιείται ένας ταξινομητής k πλησιέστερων γειτόνων (kNN), με την παράμετρο k να έχει οριστεί στη μονάδα. Για την κάλυψη των αναγκών δημοσιογραφικών εφαρμογών, σχεδιάστηκε ένα σχήμα ταξινόμησης με τρεις κατηγορίες, *Ομιλία*, *Μουσική* και *Θόρυβος*. Το μοντέλο κατηγοριοποιεί τα προς αναγνώριση δείγματα σε αυτές τις κλάσεις, συγκρίνοντας τα με τα δεδομένα αληθείας που βρίσκονται αποθηκευμένα στη βιβλιοθήκη ηχητικών δειγμάτων που φέρει η εφαρμογή. Η βιβλιοθήκη αρχικά φιλοξενεί 30 πρότυπα, 10 για κάθε κατηγορία, ενώ είναι δυναμική καθώς επιπλέον δείγματα μπορούν εύκολα να εγγραφούν από τον χρήστη.

Ο συνδυασμός των εξόδων των τεσσάρων επιμέρους μονάδων διαμορφώνει το αποτέλεσμα για την ενημέρωση του χρήστη. Για παράδειγμα, όταν η ηχητική στάθμη παίρνει μέσες τιμές ($\sim 40-60dB$) και η μονάδα σημασιολογικής ανάλυσης εντοπίζει σήμα κατηγορίας θορύβου, τότε ενεργοποιείται προειδοποίηση για υψηλή στάθμη θορύβου φόντου, ενώ αν εντοπίζει σήμα ομιλίας προβάλλεται προειδοποίηση για χαμηλό σηματοθορυβικό δείκτη. Με την ίδια λογική, όταν εντοπίζεται θόρυβος υψηλής στάθμης ($>60dB$) κατάλληλη ένδειξη ενημερώνει για παρουσία πηγής θορύβου υψηλής ηχητικής στάθμης. Μέσα από τον εμπλουτισμό της δυναμικής βιβλιοθήκης ηχητικών δειγμάτων και την τροποποίηση της λογικής των επιμέρους μονάδων επεξεργασίας μπορεί διευρυνθεί το σύνολο των περιπτώσεων εντοπισμού ακατάλληλων συνθηκών για ηχογράφηση.

Επιπλέον, ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης μπορεί να πραγματοποιηθεί πριν από κάθε συνεδρία, με εκτίμηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου, ακολουθώντας τη μεθοδολογία του λογισμικού *iSMARTer* [10].



Σχήμα 2.2 Η κεντρική οθόνη εκτέλεσης ηχητικών εγγραφών

2.2 Γραφική διεπαφή χρήστη

Η κύρια οθόνη της εφαρμογής (Σχήμα 2.2) παρέχει την κατάλληλη λειτουργικότητα για την πραγματοποίηση ηχητικών καταγραφών, φιλοξενώντας χειριστήρια για την έναρξη/λήξη της καταγραφής, όπως και ένα πλούσιο σύνολο ενδείξεων για την αποτύπωση της κατάστασης της ηχογράφησης. Στην κορυφή της κεντρικής γραφικής διεπαφής αποτυπώνεται η τρέχουσα κατάσταση της ηχοσύλληψης, με προβολή της ηχητικής στάθμης και κατάλληλου μηνύματος που ενημερώνει για την παρουσία ή όχι κάποιου προβλήματος. Στο κέντρο της διεπαφής βρίσκεται ένα χρονολόγιο, στο οποίο αποτυπώνονται σημαντικές ενδείξεις σχετικά με την πορεία της ηχογράφησης ανά δευτερόλεπτο. Οι ενδείξεις αυτές συμπεριλαμβάνουν χρονικό αποτύπωμα, ετικέτα προβολής του περιεχόμενου του ηχητικού σήματος βάσει του σχήματος ταξινόμησης, αν έχει εντοπιστεί κάποιο ηχητικό συμβάν, όπως επίσης και ενημέρωση για την κατάσταση της καταγραφής. Παρακάτω έχουν τοποθετηθεί κάποια χειριστήρια για την διαχείριση των ηχητικών προτύπων, ενώ επιπλέον δίνονται επιλογές για την παραμετροποίηση του μοντέλου ταξινόμησης, όπως επίσης και γραφική διεπαφή παρακολούθησης της σημασιολογικής ανάλυσης για προχωρημένους. Οι οθόνες προβολής/αποθήκευσης των καταγραφών έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να συμβαδίζουν με τα σύγχρονα πρότυπα ευχρηστίας και λειτουργικότητας, παρέχοντας δυνατότητες αποθήκευσης μεταδομένων, ετικετών, φωτογραφικού υλικού και χρονικού/γεωγραφικού προσδιορισμού.

2.3 Αξιολόγηση αλγορίθμου σημασιολογικής ανάλυσης

Για την αξιολόγηση της μονάδας σημασιολογικής ανάλυσης, παραμετροποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων, στην οποία το λογισμικό κλήθηκε να ταξινομήσει ηχητικό περιεχόμενο στις τρεις κατηγορίες (Μουσική, Ομιλία, Θόρυβος). Το δοκιμαστικό ηχητικό κομμάτι που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή είχε διάρκεια έξι λεπτά και αποτελούνταν από μια ισόποση συναρμογή ποικίλων ηχητικών αποσπασμάτων για κάθε κλάση, δηλαδή αποτελείτο από δύο λεπτά ομιλίας, δύο λεπτά μουσικής και δύο λεπτά θορύβου. Ο δείκτης αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η ακρίβεια (accuracy). Ως δείγμα θεωρήθηκε ηχητική πληροφορία διάρκειας ενός δευτερολέπτου, που προήλθε από την χρονική κατάτμηση του ηχητικού αποσπάσματος. Για την πληρέστερη αξιολόγηση του συστήματος αλλά και των τεχνικών που παρουσιάζονται στην εργασία, η παραμετροποίηση του πειράματος, προσαρμόστηκε κατάλληλα, ώστε να καταλήξουμε σε πέντε επιμέρους δοκιμαστικά σενάρια. Οι προσαρμογές αφορούν αλλαγές στο σύστημα ηχοσύλληψης, την ύπαρξη ή όχι πρόσθετου θορύβου, το είδος του θορύβου αλλά και τον σηματοθορυβικό λόγο. Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι προδιαγραφές για τα σενάρια ελέγχου A, B, C, D και E, όπως και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Πίνακας 1 Τεχνικές προδιαγραφές για τα σενάρια ελέγχου και αποτελέσματα κατηγοριοποίησης στο γενικό σχήμα ταξινόμησης μουσική/ομιλία/θόρυβος

Σενάριο	Είσοδος Ήχου	Είδος Θορύβου	Σηματοθορυβικός Λόγος	Ακρίβεια Ταξινόμησης
A	MacBook Air	-	30dB	0.93
B	MicW i436	6-16kHz Pink Noise	18dB	0.93
C	MicW i436	Broadband Pink Noise	24dB	0.78
D	Logitech H540	-	15dB	0.93
E	Logitech H540	-	9dB	0.81

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα, παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές η ακρίβεια ταξινόμησης του ηχητικού περιεχομένου στο προτεινόμενο σχήμα ταξινόμησης είναι υψηλή στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ αποδεκτή στο σύνολο των δοκιμών. Η εφαρμογή των δύο καναλιών σημασιολογικής επεξεργασίας (ενός ζωνοπερατού και ενός ευρυζωνικού) χαρίζει ευρωστία στο σύστημα και οδηγεί σε αξιόλογες επιδόσεις ακόμα και με τη χρήση διαφορετικών συσκευών εισόδου ήχου (μικροφώνων),

3. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις

Τα πρώτα αποτελέσματα αξιολόγησης της λειτουργίας της εφαρμογής είναι ενθαρρυντικά. Το γεγονός μάλιστα ότι το «JScorder» αποτελεί προϊόν λογισμικού διευκολύνει την εύκολη και γρήγορη ανάπτυξη και τροποποίησή του. Σε συνήθεις εφαρμογές ρεπορτάζ μπορούν να δοκιμαστούν και να χρησιμοποιηθούν εξωτερικά μικρόφωνα για καλύτερη ποιότητα ηχογράφησης ή προσαρμογή στις συνθήκες ηχογράφησης (πχ. κατευθυντικά μικρόφωνα shotgun). Όσον αφορά το κομμάτι της γραφικής διεπαφής και εμπειρίας χρήσης, σε επόμενα βήματα θα πραγματοποιηθεί αξιολόγηση από την ομάδα στόχευσης, δημοσιογράφων και ρεπόρτερ.

Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα υποστηρίζεται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και ελληνικά εθνικά κονδύλια.

4. Αναφορές

- [1] Βρύσης Λ., Κατσίμπας Φ., «SPL MASTER: Λογισμικό προσομοίωσης ηχομέτρου για iPhone/iPad» εργασία στο μάθημα Τεχνικές λήψης, επεξεργασίας και διαχείρισης ήχου, ΔΔΠΜΣ Προηγμένα Συστήματα Υπολογιστών και Επικοινωνιών, Θεσσαλονίκη, 2011
- [2] Βρύσης Λ., Δημούλας Χ., Καλλίρης Γ., Παπανικολάου Γ., Ηχόμετρο: Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού περιβάλλοντος ηχομέτρησης σε έξυπνο τηλέφωνο, Ακουστική 2012, Κέρκυρα, 2012
- [3] Umair S. «Mobile Reporting and Journalism for Media Trends, News Transmission and its Authenticity» *Journal of Mass Communications and Journalism*, 6, 323 (2016).
- [4] Guribye, F, & Nyre, L. «The Changing Ecology of Tools for Live News Reporting», *Journalism Practice* 11,10, pp 1216-1230 (2017).
- [5] Mills, J., Egglestone, P., Rashid, O., & Vääätäjä, H. «MoJo in action: The use of mobiles in conflict, community, and cross-platform journalism.» *Continuum*, 26,5, pp 669-683.(2012).
- [6] Quinn, S., & Burum, I. «Mojo: The mobile journalism handbook: How to make broadcast videos with an iphone or ipad» Focal Press.(2015).
- [7] Dimoulas, C., Veglis, A., & Kalliris, G. «Application of Mobile Cloud-Based Technologies in News Reporting: Current Trends and Future Perspectives.» *Mobile Networks and Cloud Computing Convergence for Progressive Services and Applications*, pp. 320-343. IGI Global. (2014).
- [8] Vryzas, N., Sidiropoulos, E., Vrysis, L., Avraam, E., Dimoulas, C. «A Mobile Cloud Computing Collaborative Model for the Support of On-Site Content Capturing and Publishing.» *Journal of Media Critiques [JMC]*, 4,14 (2018).
- [9] Apple «iOS Developer Library», <https://developer.apple.com/library/ios/> (τελ. προσπέλαση 20/7/2018).
- [10] Vrysis L., Dimoulas C., Kalliris G., Papanikolaou G., “Mobile audio measurements platform: bringing audio semantic intelligence into ubiquitous computing environments”, 134th AES Convention, pp. 183-189, 2013.
- [11] Vrysis L., Tsipas N., Dimoulas C., Papanikolaou G., “Crowdsourcing audio semantics by means of hybrid bimodal segmentation with hierarchical classification”, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 64, no. 12, pp. 1042-1054, Dec. 2016.
- [12] Vrysis, L., Tsipas, N., Dimoulas, C., Papanikolaou, G., “Mobile audio intelligence: From real time segmentation to crowd sourced semantics”, *Audio Mostly* 2015, (p. 37), 2015, ACM.
- [13] Vrysis, L., Tsipas, N., Dimoulas, C., Papanikolaou, G., “Extending Temporal Feature Integration for Semantic Audio Analysis”, *Audio Engineering Society Convention* 142, 2017, Audio Engineering Society.

Ταυτόχρονη χρήση των μεθόδων ‘Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνων’ και ‘Ακουστική Εκπομπή’ για τον προσδιορισμό της κατανομής των παραμορφώσεων και του ορίου διαρροής κατά τη συμπίεση σπογγώδους οστού

Αθανάσιος Τσιριγώτης
Υποψήφιος Διδάκτωρ Τμήματος
Μηχαν. & Αεροναυπ. Μηχανικών/
Εργαστήριο Εμβιομηχανικής και
Βιοϊατρικής Τεχνολογίας,
Πανεπιστήμιο Πατρών
tsirigotisthanos@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή, διερευνήθηκε η μηχανική θλιπτική παραμόρφωση του σπογγώδους οστού με τη βοήθεια της μεθόδου «Ψηφιακή Συσχέτιση Εικόνων». Επιπλέον, η έναρξη και η διάδοση της θραύσης μελετήθηκε με τη βοήθεια της μεθόδου «Ακουστική Εκπομπή». Δοκίμια σπογγώδους οστού, κυβικής γεωμετρίας με ακμή 15 mm, πάρθηκαν από βόειο μηριαίο οστό και διατηρήθηκαν στην κατάψυξη στους -20°C μέχρι τη στιγμή του πειράματος. Η παραμόρφωση υπολογίστηκε αρχικά μετρώντας την αλλαγή της απόστασης των αρπαγών που θλίνουν το δοκίμιο και μέσω της οπτικής μεθόδου, παρακολουθώντας την εξέλιξη της παραμόρφωσης μέσω κάμερας. Ταυτόχρονα, διερευνήθηκε η συμπεριφορά στο εσωτερικό του δοκιμίου με την ΑΕ. Τα πειράματα έδειξαν ότι το μέτρο ελαστικότητας στη θλίψη, προσδιορισμένο από τη μεταβολή της απόστασης των αρπαγών, είναι υποεκτιμημένο κατά 23% σε σχέση με το οπτικά προσδιορισμένο. Όμως, η DIC μέθοδος έδειξε ότι απότομες μεταβολές στις τιμές της παραμόρφωσης γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο πορώδες και στην ανομοιογένεια του σπογγώδους οστού. Το άθροισμα των ενδείξεων της συνολικής ΑΕ δραστηριότητας που ανιχνεύθηκε από τους αισθητήρες έδειξε ότι η δραστηριότητα ξεκινούσε στο 36% της μέγιστης φόρτισης και υποδείκνυε την έναρξη μικρορωγμών.

Combining Digital Image Correlation and Acoustic Emission for Monitoring of the Strain Distribution until Yielding during Compression of Bovine Cancellous Bone

ABSTRACT

In this work, the surface heterogeneity in mechanical compressive strain of cancellous bone was investigated with digital image correlation (DIC). Moreover, the onset and progression of failure was studied by acoustic emission (AE). Cubic cancellous bone specimens, with side of 15 mm, were obtained from bovine femur and

kept frozen at -20°C until testing. Specimen strain was analyzed by measuring the change of distance between the platens (crosshead) and via an optical method, by following the strain evolution with a camera. Simultaneously, AE monitoring was performed. The experiments showed that compressive Young's modulus determined by crosshead strain is underestimated at 23% in comparison to optically determined strain. However, surface strain fields defined by DIC displayed steep strain gradients, which can be attributed to cancellous bone porosity and inhomogeneity. The cumulative number of events for the total AE activity recorded from the sensors showed that the activity started at a mean load level of 36% of the maximum load and indicated the initiation of micro-cracking phenomena.

Εισαγωγή

Ο καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του σπογγώδους οστού είναι σημαντικός τόσο από βιολογικής όσο και από κλινικής άποψης, καθώς επηρεάζουν σημαντικά την παθοφυσιολογία των ασθενειών και των θεραπειών αυτών. Οι μηχανικές ιδιότητες συνήθως υπολογίζονται μέσω των πειραματικών δοκιμών [3] σε δοκίμια σπογγώδους οστού. Οι υπολογισθείσες, όμως, μηχανικές ιδιότητες υποεκτιμούν την *in vivo* συμπεριφορά του σπογγώδους οστού. Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων με τη βοήθεια εξτενσομέτρων περιλαμβάνουν σφάλματα «side-artifact» όπως είναι η απώλεια της συνεκτικότητας των δοκίδων του σπογγώδους οστού στην εξωτερικά κατεργασμένη επιφάνειά του [18]. Η ακρίβεια της μέτρησης των θλιπτικών παραμορφώσεων που υπολογίζονται μέσω της σχετικής μετατόπισης των πλακών που συμπιέζουν το δοκίμιο περιορίζεται λόγω του ανωτέρω σφάλματος και λόγω της τριβής στη διεπιφάνεια δοκίμιου-πλακών [11,13].

Για το λόγο αυτό, διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων δυσκολιών. Οι οπτικές μέθοδοι επιτρέπουν τις «άνευ επαφής» μετρήσεις για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης χωρίς παρεμβολή στην τοπική δομή και απόκριση του υλικού. Ανάμεσα στις οπτικές μη καταστρεπτικές τεχνικές, παρακολούθησης έναρξης και διάδοσης ρωγμών ανήκει και η ψηφιακή συσχέτιση εικόνων (DIC) η οποία παρέχει 2D χαρτογράφηση παραμορφώσεων. Η DIC είναι μια αξιόπιστη οπτική μέθοδος που περιγράφει λεπτομερώς το πεδίο επιφανειακών παραμορφώσεων [8].

Η ποσότητα βλάβης στους ιστούς λόγω καθημερινών δραστηριοτήτων ή λόγω υπερφορτίσεων μπορεί να οδηγήσει σε θραυστότητα όλου του οστού. Η ρωγή ως επακόλουθο μηχανικής φόρτισης είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, γεγονός που περιορίζει την δυνατότητα προσδιορισμού τραυματισμών. Η ακαμψία και η αντοχή του ιστού στο σχηματισμό μικρο-θραύσεων έχουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των μηχανισμών θραύσης στο οστό [4]. Αρκετά μικρές ρωγμές που αποτελούν λιγότερο από 2% του ιστού, οδηγούν σε αρκετά υψηλές μειώσεις στο μέτρο ακαμψίας, στην αντοχή και στην κόπωση του σπογγώδους οστού [7], γεγονός που υποδεικνύει ότι η μικρό-βλάβη στους ιστούς μπορεί να έχει σημαντική επίδραση.

Όταν οι μικρορωγμές ξεκινούν στο εσωτερικό των υλικών εκπέμπουν κύματα. Η AE μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό αυτών των σημάτων και κατά συνέπεια της ακεραιότητας των υλικών με υψηλή ακρίβεια και χρησιμοποιείται ευρέως στις μηχανολογικές κατασκευές. Η AE χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση βλαβών σε πραγματικό χρόνο και η εφαρμογή της στο τομέα των ορθοπεδικών επεμβάσεων έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς και στη μελέτη της μηχανικής

συμπεριφοράς του οστού [2]. Στόχος είναι ο καθορισμός των μηχανισμών που προκαλούν ρωγμές στα οστά και η αντιστοίχισή τους με τις εξωτερικές φορτίσεις. Τα τελευταία χρόνια, η ανάλυση έχει επικεντρωθεί στον προσδιορισμό μικρορωγμών εξαιτίας διαρροής και θραύσης στα οστά [17]. Η φύση των ΑΕ σημάτων από τα οστά έχει προταθεί ως μέσο μέτρησης της ποιότητας τους καθώς έχει χρησιμοποιηθεί στη παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς ολόκληρων οστών καθώς αυτά υποβάλλονται σε πείραμα κάμψης [5]. Επίσης, έχει προταθεί ως μέσο παρακολούθησης της διαδικασίας επούλωσης των ρωγμών στα οστά [15,16].

Στην εργασία αυτή, υπολογίστηκε η μακροσκοπική και η επιφανειακή παραμόρφωση και μελετήθηκε ο σχηματισμός και η διάδοση των ρωγμών σε συνδυασμό με τις ανωτέρω παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι DIC και ΑΕ χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρέχουν νέες πληροφορίες στο πεδίο της θραύσης στα οστά.

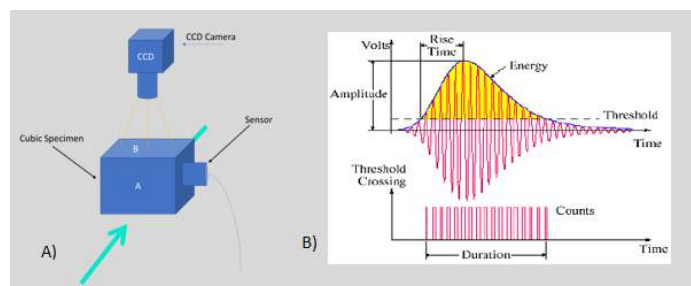
1. Δοκίμια και Μεθοδολογία Πειραμάτων

1.1 Προετοιμασία δοκιμίων και μέτρηση παραμορφώσεων

Δοκίμια σπογγώδους οστού ελήφθησαν από βόειο μηριαίο οστό (συνολικά n=20 δοκίμια). Όλα τα μηριαία οστά προήλθαν από τοπικά σφαγεία τα οποία κόπηκαν κατά μήκος του διαμήκους άξονα τους και δημιουργήθηκαν κυβικά δοκίμια με μήκος πλευράς 15 mm. Διατηρήθηκαν σε κατάψυξη στους -20°C μέχρι το πείραμα, το οποίο έλαβε χώρα σε θερμοκρασία δωματίου. Οι διαστάσεις των δοκιμίων μετρήθηκαν με παχύμετρο για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.

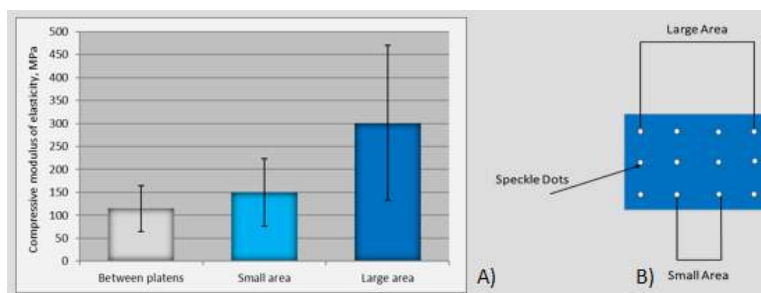
1.2 Μέτρηση Παραμορφώσεων

Τα δοκίμια φορτίστηκαν σε θλίψη τοποθετημένα ανάμεσα σε δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης $1/60 \text{ s}^{-1}$ (Σχήμα 1.1). Κάθε δοκίμιο συμπιέστηκε κατά τον διαμήκη άξονα του. Πραγματοποιήθηκαν δύο ανεξάρτητες μετρήσεις παραμόρφωσης και μέτρου ελαστικότητας: α) μέτρηση μέσω ενός επιμηκυνσιομέτρου τοποθετημένου στη θλιπτική πλάκα όσο γίνεται πιο κοντά στο δοκίμιο και β) οπτική μέτρηση παραμόρφωσης.



Σχήμα 1.1 Α) CCD κάμερα και αισθητήρας για την καταγραφή του πειράματος και των σημάτων. Τα πράσινα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση φόρτισης Β) Χαρακτηριστική ΑΕ.

Η οπτική παραμόρφωση προσδιορίστηκε μεταξύ δύο σημείων που χωρίζουν την επιφάνεια του δοκιμίου σε τρία ίσα μέρη. Τα ζευγάρια αυτών των σημείων χωρίζουν την επιφάνεια του δοκιμίου στη «μικρή» και στη «μεγάλη» περιοχή (Σχήμα 1.2). Η «μικρή» περιοχή αναπαριστά το κεντρικό μέρος του δοκιμίου, όπου συνήθως εμφανίζεται η μακροσκοπική θραύση. Η «μεγάλη» περιοχή αναπαριστά το συνολικό μήκος του δοκιμίου ενώ εξαιρείται περιοχή μήκους 1 mm, η οποία βρίσκεται κοντά στις πλάκες. Με αυτόν τον τρόπο, μελετήθηκε η επιφανειακή παραμόρφωση στη μέση περιοχή του δοκιμίου και ταυτόχρονα και στο συνολικό μήκος με στόχο τη διερεύνηση της ανομοιογένειας της παραμόρφωσης κατά το μήκος του δοκιμίου. Η παραμόρφωση σε κάθε μία από αυτές τις περιοχές θεωρήθηκε ομογενής. Στη συνέχεια, μέσω ενός αλγορίθμου στο πρόγραμμα MATLAB, η κατανομή της παραμόρφωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου προσδιορίστηκε χάρη στην εύρεση της θέσης των κουκκίδων σε κάθε frame του πειράματος. Παράλληλα, υπολογίστηκε και το πεδίο των παραμορφώσεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου με χρήση του open-source Ncorr DIC αλγορίθμου.



Σχήμα 1.2 Α) Διαφορές στο μέτρο ελαστικότητας για τις διάφορες μεθόδους μέτρησης.
 Β) Το μοτίβο κουκκίδων στην επιφάνεια του δοκιμίου και οι σχηματισθείσες «μικρή» και «μεγάλη» περιοχή.

1.3 Ακουστική Εκπομπή

Τα ακουστικά σήματα που προέρχονται από το εσωτερικό του δοκιμίου κατά τη συμπίεσή του παρακολουθούνται μέσω ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα (R-15, Physical Acoustic Corporation), τοποθετημένου στη πλευρά κάθετα στον άξονα φόρτισης (Σχήμα 1.1). Η θέση αυτή του αισθητήρα επιλέχθηκε λόγω της κάμερας που καταγράφει την άνω επιφάνεια του δοκιμίου. Ο αισθητήρας αυτός επιλέχθηκε λόγω των διαστάσεων του καθώς εφαρμόζε στην πλευρά του δοκιμίου. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ακουστική γέλη ανάμεσα στον αισθητήρα και στο δοκίμιο για την ενίσχυση των σημάτων και για διευκόλυνση στην καταγραφή τους.

Τα σήματα ενισχύθηκαν στα 35 dB και καταγράφονταν συνεχώς μέσω ενός δικάναλου συστήματος απόκτησης δεδομένων (Mistras micro-II board). Ο ρυθμός δειγματοληψίας ήταν 10 MHz. Τα χαρακτηριστικά που καταγράφηκαν από τα σήματα ήταν τα εξής: α) πλάτος ακουστικής εκπομπής (amplitude), β) ενέργεια εκπομπής του σήματος, γ) διάρκεια σήματος (διάστημα χρόνου μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου σήματος πάνω από το όριο μέτρησης των σημάτων και δ) ο χρόνος αύξησης του σήματος (rise time-RT) (Σχήμα 1.3). Το threshold τοποθετήθηκε στα 35 dB (ή 0.2 mV), ενώ το κέρδος (gain) του προ-ενισχυτή στα 0 dB. Τα μεγέθη peak και

hit definition times (PDT και HDT) HTAN 50 και 200 μ s αντίστοιχα, ενώ το hit lockout time ήταν στα 500 μ s.

Το «Amplitude» δείχνει την ένταση της ρωγμής και η ενέργεια της ΑΕ υπολογίζεται ως το εμβαδό της καμπύλης 'Amplitude-Time'. Επιπλέον, το «RT» είναι η καθυστέρηση ανάμεσα στο πρώτο σήμα που περνά το κατώφλι (threshold) και στη μέγιστη ένταση (peak value). Άλλο σημαντικό μέγεθος είναι η RA τιμή, που υπολογίζεται ως το μέγεθος RT διαιρούμενο κατά το πλάτος και η μονάδα μέτρησής του είναι μ s/Volts. Η μέση συχνότητα ισούται με τον αριθμό των σημάτων που ήταν μεγαλύτερα από το κατώφλι διά της συνολικής διάρκειας του σήματος και αναπαριστά το περιεχόμενο συχνοτήτων που έχει η κυματομορφή της ρωγμής.

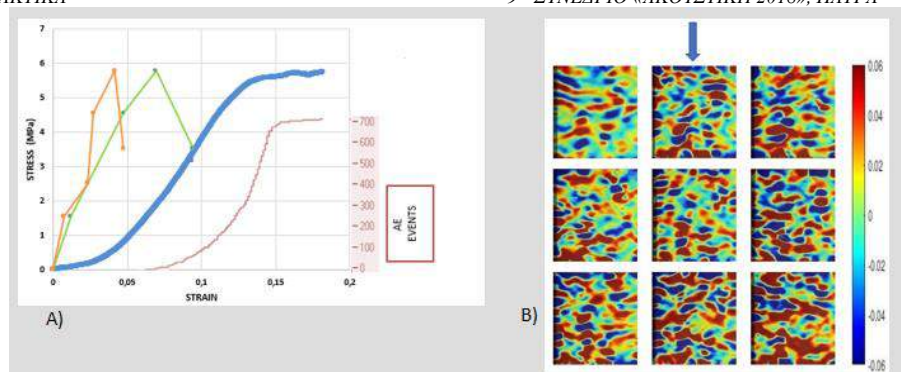
2. Αποτελέσματα

Τα πειράματα έδειξαν ότι το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας (E) που προσδιορίζεται από τη μετατόπιση των πλακών (crosshead) υποεκτιμάται κατά 23% σε σύγκριση με την οπτικά υπολογισθείσα επιφανειακή παραμόρφωση στη «μικρή» περιοχή. Στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p < 0.001$) ανάμεσα στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας παρατηρήθηκαν για την «μικρή» και την «μεγάλη» περιοχή (Σχήμα 2.1). Οι οπτικές μετρήσεις παραμορφώσεων έδειξαν ότι το σπογγώδες οστό παρουσιάζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, χωρίς αρχικό μη-γραμμικό τμήμα, και η διαρροή στην επιφάνεια εντοπίζεται στις χαμηλές παραμορφώσεις (<1,8%).

Το Σχήμα 2.3 αναπαριστά το κατά μήκος του δοκιμίου επιφανειακό πεδίο (strain field) ϵ_{xx} κατά τη διάρκεια θλίψης του δοκιμίου μέχρι τη διαρροή. Σε κάθε ποσοστό φόρτισης δεν παρατηρήθηκε αυξημένη παραμόρφωση στην περιφέρεια του δοκιμίου ή στις περιοχές κοντά στις πλάκες της μηχανής. Αύξηση παραμόρφωσης σημειώθηκε μόνο στις περιοχές όπου το οστό είναι ασθενέστερο.

Το Σχήμα 2.2 δείχνει τη σχέση φόρτισης και της ΑΕ δραστηριότητας για ένα δοκίμιο, το οποίο έχει την τυπική συμπεριφορά όλων των δοκιμίων καθώς και την ΑΕ δραστηριότητα στις χαμηλές φορτίσεις. Τα ακουστικά σήματα ξεκινούν να εκπέμπονται πριν τη μέγιστη φόρτιση. Το άθροισμα των σημάτων αυτών που καταγράφηκαν από τον αισθητήρα έδειξε ότι η δραστηριότητα ξεκίνησε σε ένα μέσο επίπεδο στο 36,6% της μέγιστης δύναμης. Ο χρόνος ή η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην πρώτη ένδειξη ύπαρξης ΑΕ δραστηριότητας είναι η στιγμή όπου οι μικρορωγμές ξεκινούν στο εσωτερικό του δοκιμίου. Αν και υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στα δοκίμια (λόγω ύπαρξης ανομοιογένειας), στην πλειονότητα αυτών οι μικρορωγμές ξεκίνησαν ανάμεσα στο 30-40% της μέγιστης δύναμης.

Ο αριθμός των ΑΕ σημάτων που εκπέμφθηκαν από τα δοκίμια ήταν σχεδόν παρόμοιος για όλα. Το εύρος των εκπομπών ήταν 200-700 έως ότου γίνει η μακροσκοπική διαρροή. Στο αρχικό (μικρές παραμορφώσεις) τμήμα της καμπύλης 'τάση-παραμόρφωση (σ - ϵ)' δεν εμφανίζονται ΑΕ σήματα, το οποίο υποδεικνύει ότι οι δοκίδες του σπογγώδους οστού μπορεί να λυγίζουν ή να κάμπτονται αλλά δεν θραύονται, άρα δεν δημιουργούνται ρωγμές. Η τιμή της παραμόρφωσης στην οποία ξεκινά η ΑΕ δραστηριότητα κυμαίνεται στο εύρος 3,5-5% (χρόνος 2,2-4,5 sec από την έναρξη του πειράματος), γεγονός που δείχνει ότι τα σήματα ξεκινούν στο γραμμικό τμήμα της σ - ϵ καμπύλης (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2 Α) Σχέση 'τάσης-παραμόρφωσης' και ΑΕ δραστηριότητας. Β) Διαμήκης (ϵ_{xx}) παραμόρφωση (strain map). Το βέλος δείχνει τη φορά φόρτισης. Η ακολουθία των εικόνων είναι από τα αριστερά (πάνω) προς τα δεξιά για όλα τα επίπεδα φόρτισης.

3. Συζήτηση

Έχει αναφερθεί ότι ο λυγισμός ή η κάμψη των δοκίδων στη διεπιφάνεια πλάκας-δοκιμίου οδηγούν σε υποεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας. Αντιθέτως, η παρουσία τριβής στη διεπιφάνεια αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας λόγω του επιπρόσθετου πεδίου τάσεων που δημιουργείται λόγω της επαφής. Μια από τις υποθέσεις της παρούσας εργασίας ήταν αν το συμβατικό πείραμα θλίψης δίνει μια ακριβή τιμή του μέτρου ελαστικότητας αν το συγκρίνουμε με το οπτικά προσδιοριζόμενο μέτρο.

Η απώλεια της συνεκτικότητας των δοκίδων κατά τη διάρκεια της κατεργασίας των δοκιμίων οδηγεί σε υποεκτίμηση του συνολικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου (end effect). Η δεύτερη υπόθεση που τέθηκε προς εξέταση ήταν αν η παραμόρφωση της επιφάνειας του δοκιμίου, με βάση τη μέθοδο DIC, ήταν ομογενής σε όλο το μήκος της ή αυξημένη στην περιφέρεια του δοκιμίου, ώστε να αποδειχθεί η υποεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας. Επιπλέον, η μακροσκοπική παραμόρφωση και το πεδίο παραμορφώσεων της επιφάνειας και η συσχέτισή τους με την έναρξη των ρωγμών στο εσωτερικό ερευνήθηκαν. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι DIC και AE χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα.

Οι μετρήσεις που προέκυψαν από την εργασία αυτή παρουσιάζουν μια υψηλή διαφορά ανάμεσα στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν για τη «μικρή» και «μεγάλη» περιοχή. Η διαφορά αυτή μπορεί να αποτυπωθεί στο γεγονός ότι στα περισσότερα δοκίμια η διαρροή εμφανίζεται στη κεντρική περιοχή και αυτό οδηγεί σε υψηλότερες παραμορφώσεις εκεί. Σε όρους παραμόρφωσης, επειδή το μήκος της «κεντρικής περιοχής» είναι μικρότερο απ' αυτό της «μεγάλης περιοχής» η παραμόρφωση στην περιοχή αυτή είναι μεγαλύτερη, άρα το μέτρο ελαστικότητας της είναι χαμηλότερο. Επίσης, ήταν δύσκολο να ερμηνευθεί η ύπαρξη υψηλών τιμών τυπικής απόκλισης του μέτρου ελαστικότητας της «μεγάλης περιοχής»: το εύρος των τιμών (66-536 MPa) μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο μήκος που έχει η περιοχή αυτή σε σχέση με τη «μικρή-κεντρική» περιοχή, το οποίο αυξάνει την πιθανότητα να προστίθενται στον υπολογισμό περιοχές με υψηλή ανομοιογένεια στη δομή.

Στη βιβλιογραφία, η μέση υποεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας κυμαίνεται από 22% (ανθρώπινο οστό) έως 38% (βόειο οστό) [9]. Οι τιμές υποεκτίμησης του μέτρου που βρέθηκαν στην εργασία αυτή είναι συγκρίσιμες με τα ανωτέρα δεδομένα. Όμως, λόγω της ετερογενούς φύσης του σπογγώδους οστού υπάρχουν περιοχές με διαφορετική μικροδομή [14]. Η παραμόρφωση δεν αυξήθηκε στην περιφέρεια του δοκιμίου. Επομένως, η υπόθεση της μειωμένης ενδοτικότητας λόγω απώλειας της συνεκτικότητας των δοκίδων στην περιφέρεια δεν υποστηρίχθηκε από αυτά τα πειράματα.

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκε η ΑΕ για την διερεύνηση της έναρξης και συσσώρευσης μικρορωγμών κατά τη διάρκεια συμπίεσης δοκιμίων σπογγώδους οστού [6]. Μια μικρορωγή όταν ξεκινά απελευθερώνει ενέργεια. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής είναι υπό τη μορφή ακουστικών κυμάτων. Στη βιβλιογραφία [12] έχει αναφερθεί ότι μικρές δομικές αλλαγές μπορεί να συμβούν ακόμα και σε παραμορφώσεις μικρού μεγέθους (0,8%). Η ΑΕ δραστηριότητα έδειξε ότι η μικροθραύση ξεκίνησε περίπου στο 1/3 της μέγιστης θλιπτικής δύναμης. Αντίθετα, η έναρξη της ΑΕ συνέβη αρκετά νωρίτερα από την έναρξη της μακροσκοπικής διαρροής. Η συσσώρευση αυτών των μικρορωγμών οδήγησε στη μακροσκοπική διαρροή.

Ο αριθμός των ΑΕ συμβάντων ήταν σχεδόν ίδιος για τα δοκίμια σπογγώδους οστού. Η συμπεριφορά αυτή είναι σε μεγάλο βαθμό διαφορετική απ' αυτή στο συμπαγές οστό όπου έχει παρατηρηθεί ότι ένας αριθμός δοκιμίων είχε λίγες εκπομπές σημάτων ενώ άλλα δοκίμια είχαν εκατοντάδες σήματα [1]. Η ανίχνευση ενός πρώτου ΑΕ σήματος με σημαντικό πλάτος θα έδειχνε την έναρξη της θραύσης. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικός ο προσδιορισμός του χρόνου που κυμαίνεται ανάμεσα στο πρώτο σήμα και στη θραύση. Όταν αυτές οι εκπομπές ανιχνευθούν μπορεί να παρέχουν πληροφορίες για έγκαιρη προειδοποίηση ώστε να σταματήσει η φόρτιση και να προληφθεί η θραύση του οστού, αν η ΑΕ χρησιμοποιηθεί *in vivo* [14].

Συμπερασματικά, το θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας που προσδιορίστηκε από τη σχετική μετατόπιση των πλακών υποεκτιμήθηκε σε σύγκριση με το προσδιορισμένο με την οπτική μέθοδο. Επίσης, υπάρχει σημαντική ανομοιογένεια στην κατανομή της παραμόρφωσης ανάλογα με την περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου όπως έδειξαν οι μεγάλες διαφορές στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Οι οπτικές μετρήσεις της παραμόρφωσης έδειξαν ότι η διαρροή στη θλίψη γίνεται στις χαμηλές παραμορφώσεις (<1,8%).

Δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα επακριβώς η παραμόρφωση στην οποία οι μικρορωγμές ξεκινούν στο σπογγώδες οστό και η σχέση της με τη μακροσκοπική διαρροή. Οι αισθητήρες που τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο παρακολουθούν την ΑΕ δραστηριότητα, η οποία υποδεικνύει την έναρξη τοπικής εσωτερικής θραύσης, η οποία συμβαίνει αρκετά νωρίτερα από τη μακροσκοπική διαρροή και θραύση. Η καταγραφή ΑΕ δραστηριότητας ταυτόχρονα με τη μέτρηση πεδίων παραμόρφωσης μπορεί να αποσαφηνίσει θέματα σχετικά με την κατανόηση της παραμόρφωσης στην οποία ξεκινά και διαδίδεται η ρωγή στο εσωτερικό και την αντιστοίχισή της με την ανομοιογένεια του οστού και τη μηχανική συμπεριφορά του [10].

4. Αναφορές

[1] Agcaoglu «AE based monitoring of the microdamage evolution during fatigue of human cortical bone». J. Biomech. 135, 81005-81008 (2013).

- [2] Cardoso «In vitro acoustic waves propagation in human and bovine cancellous bone». *J. Bone Miner. Res.* 18, 1803-1812 (2003).
- [3] Carter «The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure». *J. Bone Joint Surg.* 59, 954-962 (1977).
- [4] Goff «FEM models predict the location of microdamage in cancellous bone following uniaxial loading». *J. Biomech.* 48, 414-4148 (2015).
- [5] Hanagud «AE in bone substance» *Proceedings of ASME Symposium on Biomechanics*, 79-81 (1973).
- [6] Hasegawa «Mechanical properties of osteopenic vertebral bodies monitored by AE» *Bone* 14, 737-743 (1993).
- [7] Hernandez «Quantitative relationships between microdamage and cancellous bone strength and stiffness». *Bone* 66, 205-213 (2014).
- [8] Hout «Experimental accuracy of 2D strain measurements using DIC» *Eng. Struct.* 46, 718-726 (2013).
- [9] Keaveny «Theoretical analysis of the experimental artifact in trabecular bone compressive modulus» *J. Biomech.* 26, 599-607 (1993).
- [10] Leichter «AE from trabecular bone during mechanical testing: the effect of osteoporosis and osteoarthritis» *Proc. Inst. Mech. Eng.* 204, 123-127 (1990).
- [11] Linde «The effect of constraint on the mechanical behavior of trabecular bone specimens» *J. Biomech.* 25, 359-368 (1992).
- [12] Madsen «The consequences of compression strain level on energy absorption in trabecular bone specimen's performance» *Proc. 6th Mtg.* (1988).
- [13] Odgaard «The underestimation of Young's Modulus in compressive testing of cancellous bone specimens» *J. Biomech.* 24, 691-698.
- [14] Perilli «Dependence of mechanical compressive strength on local variations in microarchitecture in cancellous bone of proximal human femur» *J. Biomech.* 41, 438-446 (2008).
- [15] Shrivastava «Assessment of bone condition by AE technique: a review» *J. Biomed. Sci. Eng.* 2, 144-154 (2009).
- [16] Shrivastava «In vitro study of bone condition using acousto-ultrasonic technique» *Int. J. Healthcare Manage.* 12, 168-178 (2011).
- [17] Wright «Permanent deformation of compact bone monitored by AE» *J. Biomech.* 14, 405-409 (1981).
- [18] Un «The effects of side-artifacts on the elastic modulus of trabecular bone» *J. Biomech.* 36, 1955-1963 (2006).

Το γραφένιο στην ηλεκτροακουστική.

Δημήτρης Ανεστόπουλος^{1,2}, Ιωάννης Παρθένιος¹
¹Ιδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Επιστημών Χημικών
Μηχανικών, ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ, Οδός Σταδίου, Πλατάκι, ΤΚ-26504 Πάτρα, Ελλάδα
²ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων, ΤΚ-
28200 Στυλιανού Τυπάλδου, Αηζούρι – Κεφαλληνίας, Ελλάδα
anestopd@gmail.com, jparthen@iceht.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δονητικές μεμβράνες αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της ακουστικής τεχνολογίας, ως το βασικό συστατικό των σύγχρονων ηχείων και μικροφώνων. Η μεμβράνη γραφενίου, πάχους ενός ατόμου του άνθρακα, έχει εκπληκτικές μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική στην ακουστική τεχνολογία γιατί μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην βελτίωση της απόδοσης και της ευαισθησίας πολλών συστημάτων ακουστικής μετατροπής (acoustics transducers). Η εργασία συνοψίζει την εφαρμογή του γραφενίου στην τεχνολογία του ήχου δίνοντας έμφαση σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες και διεθνείς πατέντες. Οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται ως εξής: (α) ηλεκτρόδια ακουστικών μετατροπέων, (β) δονητικές μεμβράνες για ηχεία, μικρόφωνα και ακουστικά (γ) θερμοακουστικές συσκευές. Τέλος, παρουσιάζονται οι πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα και αξιοποίηση του γραφενίου στην ακουστική και αναλύονται οι μελλοντικές τάσεις εφαρμογής του.

Graphene in electroacoustics

ABSTRACT

Vibrating membranes are the cornerstone of acoustic technology, forming the backbone of modern loudspeakers and microphones. The one carbon atom thickness graphene membrane has unique mechanical, electrical and thermal properties which make it attractive to acoustic technology since it can contribute in improving the efficiency and sensitivity of many acoustics transducer systems. In this work a summary for the application of graphene to audio technology is presented focusing on recent research papers as well as international patents. Applications are categorized as follows: (a) acoustic transducer electrodes; (b) vibration membranes for loudspeakers, microphones and earphones; (c) thermo-acoustic devices. Finally, the recent developments in the research and exploitation of graphene in acoustic technology are presented along with the future trends.

Εισαγωγή

Στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές, η αποδοτική παραγωγή και η λήψη ήχου καθίσταται ολοένα και πιο απαιτητική, λόγω της ανάγκης για ακουστικά ήχου και μικρόφωνα πολύ μικρών διαστάσεων, ικανά να προσαρμόζονται σε φορητές ή

ασύρματες συσκευές ηλεκτρονικής επικοινωνίας. Η τεχνολογία των συσκευών παραγωγής και λήψης ηχητικών κυμάτων στηρίζεται σε λεπτές μεμβράνες με ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες έτσι ώστε, όπως συμβαίνει στο ανθρώπινο αυτί, να μπορούν να ανιχνεύουν τις μεταβολές της πυκνότητας του μέσου διάδοσης των ηχητικών κυμάτων με υψηλή ποιότητα, ευαισθησία και σταθερή απόδοση.

Η ακουστική συμπεριφορά μιας μεμβράνης εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της (επιφανειακές διαστάσεις, πάχος), την πυκνότητά της και τις μηχανικές της ιδιότητες (αντοχή, μέτρο ελαστικότητας κλπ). Η μικρή μάζα εξασφαλίζει καλή απόκριση της μεμβράνης σε υψηλές συχνότητες, ενώ η υψηλή μηχανική αντοχή επιτρέπει την κατασκευή μεγάλων και λεπτών αιωρούμενων μεμβρανών απαραίτητα για αποτελεσματική απόκριση στις χαμηλές συχνότητες. Επίσης, η υψηλή μηχανική αντοχή εξασφαλίζει την λειτουργία τους σε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης, που προκαλούνται από μεγάλες μεταβολές πίεσης στο μέσο διάδοσης.

Είναι γνωστό ότι, το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης της μεμβράνης και κατά συνέπεια η ευαισθησία της, είναι ανάλογη προς τη διάμετρο και αντιστρόφως ανάλογη προς το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος της. Έτσι, αν σε μια ηχητική μεμβράνη μικρής μάζας και μικρού μέτρου ελαστικότητας στην κάμψη (bending rigidity) το πάχος ελαττωθεί, τότε η μεμβράνη καθίσταται ευαίσθητη ακόμη και σε χαμηλές στάθμες ηχητικής πίεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ομαλό φάσμα απόκρισης της μεμβράνης και μεγαλύτερο εύρος ακουστών συχνοτήτων.

Το γραφένιο, είναι ένα νέο είδος μεμβράνης ατομικού πάχους (~0.35 nm), που αποτελεί την δομική μονάδα του γραφίτη, των νανοσωλήνων άνθρακα και των φουλερενίων.[1] Αποτελείται από ένα ενιαίο στρώμα ατόμων άνθρακα, που συνδέονται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς εντός του στρώματος σχηματίζοντας εξαγωνικό κρυσταλλικό πλέγμα. Ως νανομεμβράνη έχει εκπληκτικές μηχανικές [2,3] και ηλεκτρικές ιδιότητες [4,5] που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για την ακουστική τεχνολογία γιατί μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην βελτίωση της απόδοσης και της ευαισθησίας πολλών συστημάτων ακουστικής μετατροπής

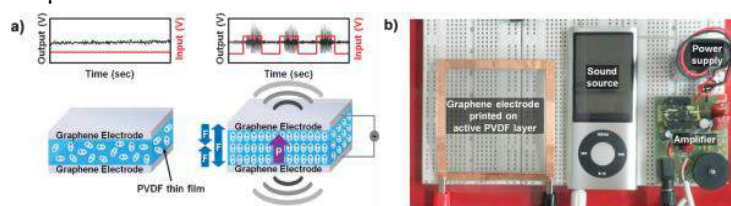
Παρά το εξαιρετικά λεπτό πάχος και τη μικρή μάζα του, το γραφένιο έχει μέτρο ελαστικότητας ~1TPa και μηχανική αντοχή ~130 GPa, ιδιότητες που το καθιστούν ως την πιο ανθεκτική μεμβράνη στη φύση [6]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γραφένιο έχει αντοχή θραύσης 42 N m^{-1} , ~200 φορές μεγαλύτερη από μια υποθετική χαλύβδινη μεμβράνη του ίδιου πάχους και εξαιρετική ευκαμψία (μηδενική αντίσταση στην κάμψη). Υπόκειται σε θραύση όπως το γυαλί σε εφελκυστικές παραμορφώσεις της τάξης του ~30% [7]. Είναι εξαιρετικά διαφανές με διαπερατότητα στο λευκό φως ~97,7%. Σε σχέση με τις θερμικές του ιδιότητες, η θερμοχωρητικότητά (HCPUA) ($\sim 5,8 \times 10^{-4} \text{ J m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) είναι πολύ μικρή [8], ενώ η θερμική του αγωγιμότητα ($\sim 5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) μεγαλύτερη από του χαλκού.[9] Η νανομεμβράνη γραφενίου εμφανίζει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ($\sim 200 \text{ 000 cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) [10] και σε συνδυασμό με την εξαιρετική της ευκαμψία μπορεί να αξιοποιηθεί ως εύκαμπτο ηλεκτρόδιο [11].

Η εργασία συνοψίζει την εφαρμογή του γραφενίου στην τεχνολογία του ήχου δίνοντας έμφαση σε ερευνητικές εργασίες και διεθνείς πατέντες που εμφανίστηκαν μετά την ανακάλυψή του το 2004. Οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται ως εξής: (α) ηλεκτρόδια ακουστικών μετατροπέων, (β) δονητικές μεμβράνες ηχείων, μικροφώνων και ακουστικών (γ) θερμοακουστικές συσκευές. Τέλος παρουσιάζονται οι πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα και αξιοποίηση του γραφενίου για την ακουστική και αναλύονται οι μελλοντικές τάσεις εφαρμογής του γραφενίου.

1. Εφαρμογή του γραφενίου σε ακουστικούς μετατροπείς

1.1. Ηλεκτρόδιο

Το γραφένιο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο σε ηχεία που λειτουργούν στη βάση του *αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου*, όπου ο ήχος παράγεται από χρονικά μεταβαλλόμενη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πιεζοκρυστάλλου. Για την κατασκευή εύκαμπτων και διαφανών μεμβρανών μεγάλης επιφάνειας σε ακουστικούς μετατροπείς με βάση το polyvinylidene difluoride (PVDF) αξιοποιούνται μελάνια γραφενίου [12] ή γραφένιο που παράγεται σε λεπτό φύλλο μέσω χημικής εναπόθεσης ατμών[13,14]. Στην πρώτη περίπτωση τα ηλεκτρόδια παράγονται με ψεκασμό του υποστρώματος PVDF (Σχ. 1α). Στην δεύτερη περίπτωση η μεμβράνη γραφενίου αποκολλάται από το χαλκό και μεταφέρεται αυτόνομη στο πιεζοηλεκτρικό υπόστρωμα ή συνδυάζεται σε υβριδικές δομές με άλλα αγώγιμα νανοϋλικά, όπως τα νανοσύρματα Αργύρου[15]. Ο μηχανισμός παραγωγής ήχου και η διάταξη ενός ηχείου γραφενίου σε υπόστρωμα PVDF απεικονίζεται στο Σχ. 1α. Όταν στα ηλεκτρόδια γραφενίου εφαρμοστεί τάση AC, παράγεται δόνηση ακουστικής συχνότητας στην πιεζοηλεκτρική μεμβράνη PVDF η οποία προκαλεί τα ηχητικά κύματα.



Σχήμα 1 (α) Σχηματική απεικόνιση και (β) φωτογραφία ακουστικού μετατροπέα λεπτής πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης PVDF με ηλεκτρόδια γραφενίου.

Όλοι οι ακουστικοί μετατροπείς με ηλεκτρόδιο γραφενίου είχαν υψηλότερες αποκρίσεις (και κατά συνέπεια υψηλότερη στάθμη ηχητικής πίεσης (sound pressure level SPL) σε ολόκληρο το συχνοτικό εύρος με εξαιρετικά μικρή αρμονική παραμόρφωση, σε σύγκριση με εμπορικά διαθέσιμα ηχεία τεχνολογίας λεπτού φιλμ PEDOT: PSS[12, 14], λεπτής μεμβράνης αλουμινίου[14, 15] και λεπτού φιλμ νανοσυρμάτων Ag[15]. Βρέθηκε επίσης ότι η συνολική απόκριση συχνότητας ενισχύεται με την αύξηση του αριθμού των στρωμάτων γραφενίου γιατί μικραίνει η επιφανειακή ωμική αντίσταση των ηλεκτροδίων, κάτι που οδηγεί σε μικρότερη απώλεια ισχύος. Για παράδειγμα ηχείο PVDF με τέσσερα στρώματα γραφενίου, που αντιστοιχούν σε πάχος ηλεκτροδίου ~1.36 nm, εμφανίζει υψηλότερη SPL σε σχέση με αντίστοιχο εμπορικό που χρησιμοποιεί λεπτή μεμβράνη αλουμινίου πάχους ~550 nm καθώς και μικρότερη αντίσταση στις καμπτικές δονήσεις. Πιο συγκεκριμένα η απόκριση στις μεσαίες συχνότητες ήταν υψηλότερη κατά περίπου 20dB και στις υψηλές συχνότητες έως 30dB. Επιπλέον μελετήθηκε η απόκριση συχνότητας σε συνθήκες μηχανικής παραμόρφωσης (π.χ. κάμψη) και βρέθηκε ότι είναι ενισχυμένη σε όλο το εύρος των συχνοτήτων, ειδικά στην περιοχή των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων. Τελικά, ο ακουστικός μετατροπέας γραφενίου είναι απλούστερος, χωρίς μαγνήτες και κινούμενα μέρη και επιπλέον καθίσταται λεπτότερος, ελαφρύτερος και εύκαμπτος. Επίσης, λόγω της πολύ μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας που εμφανίζει δεν απαιτείται η χρήση ακριβών ενισχυτών τάσης.

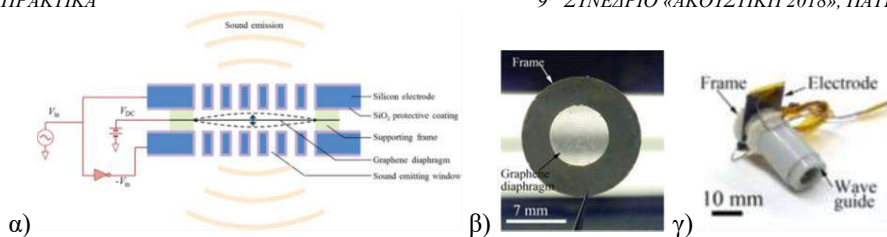
1.2. Δονητική μεμβράνη ηχείων

Τα περισσότερα ηχεία που διατίθενται σήμερα αναπαράγουν ήχο μέσω ενός μηχανικού διαφράγματος, το οποίο ταλαντώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Ένα ιδανικό ηχείο θα πρέπει να δημιουργεί μια σταθερή SPL σε όλο το εύρος των ακουστών συχνοτήτων (20 Hz - 20 kHz). Για να έχει ταυτόχρονα και ευρεία απόκριση απαιτείται σημαντική απόσβεση. Για την προσέγγιση του ιδανικού ηχείου με υψηλή απόδοση απαιτείται η μείωση τόσο της μάζας, όσο και της σταθεράς ελατηρίου του διαφράγματος, έτσι ώστε ο περιβάλλον αέρας να αποτελεί το μέσο που προκαλεί την απόσβεση και να εξομαλύνει τις κορυφές στην απόκριση. Τέτοια ηχεία άρχισαν να αναπτύσσονται ήδη από τη δεκαετία του 1920 (αρχικά το διάφραγμα ήταν από έντερο χοίρου επικαλυμμένο με χρυσό). Ωστόσο η σημερινή τεχνολογική τάση για ηχεία εξαιρετικά μικρών διαστάσεων εμποδίζεται από το θεωρητικό όριο, σύμφωνα με το οποίο ο συντελεστής απόσβεσης αέρα ανά μονάδα επιφάνειας δεν μπορεί ν' αυξηθεί όταν το μέγεθος του διαφράγματος είναι μικρότερο του μήκους κύματος του παραγόμενου ήχου. Ως εκ τούτου, για τα ηχεία πολύ μικρών διαστάσεων απαιτείται ένα όσο το δυνατόν λεπτότερο διάφραγμα, μικρής επιφανειακής πυκνότητας, ώστε να διατηρηθεί η κυριαρχία της απόσβεσης του αέρα. Συνεπώς, για να διατηρηθεί ομαλή η SPL σε όλο το εύρος συχνοτήτων αυστηρό πάντα κριτήριο αποτελεί η σταθερά ελατηρίου k και η μάζα m του διαφράγματος θα πρέπει να είναι και τα δύο μικρότερα από τον συντελεστή απόσβεσης αέρα ζ ($\omega_{\min}^{-1} k < \zeta$, $\omega_{\max} m < \zeta$ όπου ω_{\max} και ω_{\min} το ανώτερο και κατώτερο όριο της ενδιαφέροντος περιοχής συχνοτήτων)[16].

Το γραφένιο ως μεμβράνη παρέχει όλα αυτά τα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, σε ηχείο διαμέτρου 1 cm ο συντελεστής απόσβεσης ανά μονάδα επιφάνειας εκτιμάται ότι είναι $\zeta \approx 3 \text{ kg m}^{-2}\text{s}$. Το γραφένιο έχει επιφανειακή πυκνότητα $\mu = 7,6 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2}$, και άρα ηχείο με διάφραγμα γραφενίου μπορεί να εμφανίσει συχνοτική απόκριση έως 2 MHz[16]. Καθότι το ανώτατο όριο της ανθρώπινης ακοής είναι 20 kHz, πολυστρωματικό γραφένιο με πάχος ακόμα και 100 φορές μεγαλύτερο του γραφενίου πληροί την απαίτηση απόσβεσης.

Σχετικά με την απόκριση σε χαμηλές συχνότητες αν η σταθερά ελατηρίου ανά μονάδα επιφάνειας του διαφράγματος γραφενίου είναι της τάξης των $\sim 10 \text{ N/m}^3$, εκτιμάται ότι ένα τέτοιο ηχείο έχει το όριο απόκρισης χαμηλής συχνότητας στα $\sim 0,5 \text{ Hz}$, που είναι σημαντικά μικρότερο του κατώτερου ορίου ανθρώπινης ακοής[16].

Στην εργασία των Qin Zhou, et al. [16] μελετάται η ανάπτυξη ενός τέτοιου πρωτότυπου ηλεκτροστατικού ηχείου υψηλής απόδοσης, με διάφραγμα από πολυστρωματικό γραφένιο, που παρήχθη μέσω χημικής εναπόθεσης ατμών πάχους $\sim 30 \text{ nm}$, ώστε να είναι ευκολότερη και αποδοτικότερη η διαδικασία μεταφοράς της και η τοποθέτηση της πάνω σε πλαίσιο. Η μεμβράνη γραφενίου αιωρείται στο μέσο μεταξύ δύο διάτρητων ηλεκτροδίων, όπως φαίνεται στο Σχ. 2. Το ρεύμα λειτουργίας είναι λίγα nA, υποδεικνύοντας πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ($\ll 1 \mu\text{W}$) και υψηλή απόδοση ισχύος.



Σχήμα 2. α) Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροστατικού ηχείου υψηλής απόδοσης (β) διάφραγμα γραφενίου διαμέτρου 7mm αιωρούμενο διαμέσου δακτυλιοειδούς πλαισίου στήριξης (γ) συναρμολογημένο ηχείο.

Η απόκριση SPL του ηχείου στην περιοχή ακουστών συχνοτήτων βρέθηκε ότι είναι συγκρίσιμη ή και ανώτερη από την αντίστοιχη απόδοση συμβατικού εμπορικού ηχείου παρόμοιου μεγέθους διαφράγματος (Sennheiser® MX-400). Ωστόσο, το ηχείο γραφενίου έχει αξιοσημείωτα καλύτερη απόδοση σε υψηλές συχνότητες, τόσο ως προς τη διατήρηση της υψηλής απόκρισης, όσο και στην αποφυγή απότομων συντονισμών χάρη κυρίως στην εξαιρετικά χαμηλή μάζα του. Μετρήθηκε με οπτικές μεθόδους και η "καθαρή" μηχανική απόκριση του διαφράγματος γραφενίου ως συνάρτηση της συχνότητας και βρέθηκε σχετικά ομαλή προσομοιάζοντας την απόκριση ενός ιδανικού διαφράγματος ηχείων στο εύρος των ακουστών συχνοτήτων.

1.3. Δονητική μεμβράνη μικροφώνων

Επειδή οι δονητικές μεμβράνες αποτελούν ακρογωνιαίο λίθο της ακουστικής τεχνολογίας, αποτελώντας τη ραχοκοκαλιά των σύγχρονων μικροφώνων και ηχείων πραγματοποιήθηκαν μελέτες που εισάγουν το γραφένιο ως υλικό μεμβράνης για πυκνωτικά μικρόφωνα. Στόχος τους αποτελεί πέρα από την αύξηση του εύρους της συχνοτικής απόκρισης τους αλλά και η βελτίωση της ευαισθησίας τους και κατά συνέπεια η αποδοτικότητά τους. Για να επιτευχθεί ηλεκτρικό πυκνωτικό μικρόφωνο (electret condenser microphone ECM) υψηλής ευαισθησίας, είναι εξαιρετικά επιθυμητό ένα πολύ ηλεκτρικά φορτισμένο διάφραγμα δόνησης που θα δίνει μεγάλες μετατόψεις στην απόκριση του εισερχόμενου ήχου. Το κέρδος (gain) ενός μικροφώνου ECM είναι ανάλογο της απόστασης μεταξύ του διαφράγματος και της οπίσθιας πλάκας και συνεπώς για μεγάλες μετατοπίσεις της μεμβράνης, αυξάνεται. Επιπλέον, η συχνοτική απόκριση ενός μικροφώνου με τυπικό κυκλικό διάφραγμα έχει ένα επίπεδο κέρδος στη ζώνη χαμηλών συχνοτήτων, μια βασική κορυφή συντονισμού του διαφράγματος στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων και μια γρήγορη μείωση του κέρδους ως προς τη συχνότητα σε συχνότητες πάνω από τον συντονισμό. Άρα η αύξηση της συχνότητας συντονισμού επιφέρει και ευρύτερη συχνοτική απόκριση. Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού f_0 και η ευαισθησία του μικροφώνου S δίδονται ως: [18, 19]

$$f_0 \approx \frac{8}{2\pi \cdot 2} \sqrt{\frac{R}{\sigma_m}} \quad \text{και} \quad S = \frac{V_{out}}{p} = \frac{V_e r^2}{8l_g R} \quad (1,1)$$

Το μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη (rigidity) R και η μέγιστη μετατόπιση του κεντρικού κυκλικού διαφράγματος d_c είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας E_s , του λόγου Poisson ν και του πάχους του διαφράγματος t και δίνεται:

$$R = \frac{E_s t^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{και} \quad d_c = \frac{3pr^4}{192R} = \frac{3(1-\nu^2)pr^4}{16E_s h^3} \quad (1,2)$$

Κατά συνέπεια η f_0 αυξάνεται με την αντίσταση στην κάμψη R άρα με το πάχος t και το μέτρο ελαστικότητας E_s αλλά μειώνεται όταν η επιφανειακή πυκνότητα σ_m αυξάνεται. Η μέγιστη μετατόπιση της μεμβράνης και η ευαισθησία του μικροφώνου, όταν δίνονται V_e και r , εξαρτάται κυρίως από το R (αντιστρόφως ανάλογα) επειδή το l_g περιορίζεται από τη μέγιστη μετατόπιση του κέντρου του διαφράγματος στη μέγιστη επιτρεπόμενη ηχητική πίεση εισόδου. Τελικώς, η συχνοτική απόκριση και η ευαισθησία στο όριο των λεπτών μεμβρανών εξαρτώνται από τη γεωμετρία της r και t , την επιφανειακή της πυκνότητα σ_m , την αντίσταση στην τάση R και το φορτίο αέρα που επικρατεί στη μάζα της μεμβράνης.

Οι Qin Zhou, et al. χρησιμοποίησαν το διάφραγμα πολυστρωματικού γραφενίου (Εν. 1.2) ως δέκτη [17]. Με παρόμοια διάταξη (Σχ. 2), το εξωτερικό ηχητικό κύμα διεισδύει μέσω των διάτρητων ηλεκτροδίων, η μεμβράνη γραφενίου πάλλεται μεταβάλλοντας την χωρητικότητα μεταξύ γραφενίου και ηλεκτροδίων, προκαλώντας ανακατανομή φορτίου και άρα ηλεκτρικό ρεύμα. Η απόκριση του μικροφώνου γραφενίου συγκρίθηκε με την απόκριση εμπορικού μικροφώνου Sony ICD-SX700 και διαπιστώθηκε ότι το μικρόφωνο γραφενίου παρουσιάζει μια εγγενή ομαλή συχνοτική απόκριση (με απόκλιση <10 dB) σε όλη την περιοχή ακουστών συχνοτήτων. Λόγω της μικρής επιφανειακής πυκνότητας του λεπτού διαφράγματος γραφενίου, σύμφωνα με τη σχέση (1,1), το μικρόφωνο αναμένεται να ανταποκρίνεται σε συχνότητες πολύ πέρα από το όριο της ανθρώπινης ακοής. Σε συνδυασμό με το ηχείο γραφενίου (Εν. 1.2) ως ηχητικό πομπό εξετάστηκε η απόκρισή του στην περιοχή των υπερήχων και βρέθηκε σχετικά ομαλή (εντός 10 dB) έως τα ~ 0,5 MHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ευαισθησία του ήταν επαρκής για την καταγραφή φυσικών ήχων από νυχτερίδες, που αποτελούνται από περιοδικούς ηχητικούς παλμούς στους οποίους η συχνότητα μεταβάλλεται από ~ 100 kHz έως ~ 50 kHz.

Οι Dejan Todorović, et al. κατασκεύασαν μεμβράνη για πυκνωτικά μικρόφωνα από πολύ-στρωματικό γραφένιο, που παρήχθη σε συνθήκες εναπόθεσης ατμών (CVD) και έχει αριθμό στρώσεων (πάχος) και διάμετρο ~ 60 (25 nm) και 5 mm αντίστοιχα. Το μικρόφωνο γραφενίου συγκρίθηκε με εμπορικά διαθέσιμο επαγγελματικό μικρόφωνο νικελίου πάχους 5 μm (Brüel & Kjaer (B&K) 4134) [18]. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας στην κάμψη, R , της μεμβράνης γραφενίου είναι υπο-πενταπλάσιο αυτού της μεμβράνης νικελίου του επαγγελματικού μικροφώνου, θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευαισθησία και αποδοτικότητα μικροφώνου. Η ευαισθησία του μικροφώνου γραφενίου μετρήθηκε σημαντικά μεγαλύτερη του εμπορικού κατά ~15dB στις συχνότητες μέχρι ~ 11 kHz. Αν και το μικρό R αναμένεται να επιφέρει μείωση της συχνότητα συντονισμού f_0 της μεμβράνης γραφενίου, η μικρή επιφανειακή της πυκνότητα (Εν.1.2) αντισταθμίζει την μείωση αυτή και έτσι δεν περιορίζεται η ζώνη λειτουργίας συχνοτήτων.

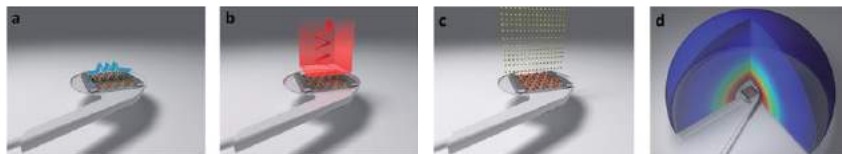
Σύμφωνα με τις σχέσεις (1,1) και (1,2), όσο αυξάνεται το πάχος των μεμβρανών, αυξάνεται και το R με αποτέλεσμα υψηλότερες συχνότητες συντονισμού. Προσομοίωση της μεμβράνης ως συνάρτηση του αριθμού των στρωμάτων (πάχους) γραφενίου κατέδειξε εξαιρετική απόδοση σε ευρύτερη περιοχή συχνοτήτων μέχρι 1 MHz μεμβράνης αποτελούμενης από 300 γραφενικών στρωμάτων.

Αν και η αύξηση του πάχους της μεμβράνης, βελτιώνει την ανθεκτικότητα της και διευρύνει το συχνοτικό εύρος, η μετατόπισή της κατά τη διάρκεια της δόνησης μικραίνει σημαντικά με συνέπεια την μείωση της ευαισθησίας του μικροφώνου. Αντίθετα, η μείωση του πάχους (μερικές δεκάδες nm στο πολυστρωματικό γραφένιο), οδηγεί σε υψηλότερη ευαισθησία αλλά και σε μείωση της συχνότητας συντονισμού του μικροφώνου. Έτσι, οι SeongTak Woo, et al. [19] αντί της μεταβολής του πάχους της μεμβράνης, μείωσαν το μέτρο ελαστικότητάς της, E_s , (σχέση (1,1) και (1,2)) με στόχο την βελτιστοποίηση της ευαισθησίας του μικροφώνου στην περιοχή 6 - 8 kHz. Οι ελαστικές δομές του διαφράγματος ελέγχθηκαν με διαστρωματοποίηση ενός λεπτού φιλμ γραφενίου που έχει καλή αγωγιμότητα και αντοχή στη θραύση αλλά πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας από έως 1 TPa και μικρή διηλεκτρική σταθερά με ένα άλλο πολυμερές υλικό με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας, χαμηλότερη πυκνότητα και υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά όπως το PMMA.

Το νέο διαστρωματικό διάφραγμα από πολυστρωματικό γραφένιο και PMMA με βέλτιστη αναλογία πάχους 1: 5 (γραφένιο 0.60 μm (~1800 layers), PMMA 3.00 μm) έχει μετατόπιση δόνησης μεγαλύτερη από αυτό του υπάρχον συμβατικού ECM από διάφραγμα PPS ίδιου πάχους και διαμέτρου. Συγκριτικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο διάφραγμα έχει ευαισθησία κατά μέσο όρο 6,8 dB υψηλότερη στην επίπεδη ζώνη συχνοτήτων κάτω των 6,2 kHz. Στο τελικό μικρόφωνο (ύψος 3,2 mm, διάμετρο 4 mm) που κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας αυτό το διαστρωματικό διάφραγμα γραφένιο/PMMA, η ευαισθησία του βρέθηκε -20 dB, δηλ. 9dB υψηλότερη από του συμβατικού ECM (δηλ. ένα κέρδος 1,28 φορές, έναντι τα 6,8 dB). Μέσω της εκτίμησης της παραμόρφωσης, του ελαχίστου και μεγίστου επιπέδου εισερχομένου ήχου, το δυναμικό εύρος SPL του προτεινόμενου μικροφώνου βρέθηκε 90dB δηλ. 5-10 dB βελτιωμένο ως προς τη συμβατική, εντός επιτρεπόμενης παραμόρφωσης 1%,

1.4. Θερμο-ακουστική μεμβράνη

Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα σε έναν αγωγό, προκαλεί περιοδικές μεταβολές στην θερμοκρασία του, οι οποίες παράγουν περιοδικές μεταβολές πυκνότητας στον αέρα γύρω του και οι αντίστοιχες μεταβολές πίεσης μεταδίδονται μέσω ηχητικών κυμάτων μικρής έντασης (θερμοακουστικό φαινόμενο, Σχ. 3). Σε αντίθεση με τα συμβατικά ηχεία, τα θερμοακουστικά ηχεία εκπέμπουν ήχο χωρίς μηχανικά μέρη και εισάγουν νέες δυνατότητες στην τεχνολογία ηχείων ή ακουστικών με απόκριση συχνότητας ευρείας ζώνης.



Σχήμα 3 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων του θερμοακουστικού φαινομένου

Η αποδοτική παραγωγή θερμοακουστικών ήχων μπορεί να επιτευχθεί υπό τις παρακάτω προϋποθέσεις: 1) ο αγωγός πρέπει να έχει μικρή θερμική χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας (HCPUA), όπως οι αγωγοί μικρού πάχους 2) η παραγόμενη θερμότητα Joule πρέπει να μεταφέρεται αποτελεσματικά στον περιβάλλον αέρα, ώστε το μεγαλύτερο μέρος της να μετατρέπεται σε ηχητικά κύματα ελαχιστοποιώντας την απώλεια θερμότητας προς το υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με αιωρούμενο αγωγό είτε με τον αγωγό σε κατάλληλο υπόστρωμα (χαμηλής θερμικής

αγωγιμότητας, πορώδη, κ.α). 3) η ηλεκτρικά αγώγιμη περιοχή πρέπει να είναι αρκετά εκτενής (π.χ. 1 cm²) για την δημιουργία επαρκούς ηχητικού πεδίου. Ο συνδυασμός των εξαιρετικών δομικών, ηλεκτρικών και θερμικών ιδιοτήτων του γραφενίου το καθιστούν ως ιδανικό υλικό για την παραγωγή νέων εύκαμπτων, διαφανών θερμοφώνων πάχους nm, όπως ακριβώς επετεύχθη το 2008 με λεπτά υμένια νανοσωλήνων άνθρακα [20].

Από το θερμοακουστικό μοντέλο Dascheski et al. [21] υπολογίζεται η μεταβολή της ηχητικής πίεσης μέσω της θερμότητας που παράγεται από έναν αγωγό γραφενίου. Η θέρμανσή του οδηγεί σε ροή θερμότητας στο γειτονικό ρευστό (αέρα) και υπόστρωμα, οδηγώντας σε ενεργειακή ισορροπία $Q_{in} = Q_{air} + Q_{sub} + Q_{film}$. Οι ποσότητες θερμικής ενέργειας που κατανέμονται μεταξύ της μεμβράνης (Q_{film}), του υποστρώματος (Q_{sub}) και του αέρα (Q_{air}) είναι ανάλογες με τις θερμοχωρητικότητες ανά μονάδα επιφάνειας. Η ποσότητα θερμικής ενέργειας που μεταφέρεται στον αέρα και η ηχητική πίεση σε ένα σημείο r στον αέρα είναι:

$$Q_{air} = Q_{in} \frac{e_{air}}{e_{air} + e_{sub} + C_{film} \sqrt{2\pi f}} = Q_{in} E_{air} \quad (1,3)$$

$$\Delta p_{air}(\bar{r}, f) = \frac{3}{4\pi} \frac{P_{in}}{v_{air}^2} \frac{f}{|\bar{r}|} E_{air} A_{air} = \frac{3}{4\pi} \frac{P_{in}}{v_{air}^2} \frac{f}{|\bar{r}|} \frac{e_{air}}{e_{air} + e_{sub} + C_{film} \sqrt{2\pi f}} A_{air} \quad (1,4)$$

όπου P_{in} η ισχύς εισόδου, v_{air} η ταχύτητα του ήχου στον αέρα, A_{air} η απόσβεση, d το πάχος. Η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του γραφενίου είναι $C_{film} = d\rho C_{p,film}$. Η θερμική εκροή (thermal effusivity) $e = (\kappa\rho C_{p,i})^{1/2}$ χαρακτηρίζει τη θερμική αντίσταση των υλικών (δηλαδή την ικανότητά του να ανταλλάσσει θερμική ενέργεια με το περιβάλλον) και είναι συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας κ , της πυκνότητας ρ , και η ειδική θερμική ικανότητα $C_{p,i}$. Οι δείκτες υποδηλώνουν τον αέρα, το υπόστρωμα και τον αγωγό. Όπως και με άλλα μοντέλα, η ηχητική πίεση από θερμοακουστικό ηχείο $\Delta p(r, f)$ είναι συνάρτηση της απόστασης r μεταξύ του αγωγού και του μικροφώνου και της συχνότητας f και είναι ανάλογη με την ποσότητα της μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας στο ρευστό (αέρα) και αντιστρόφως ανάλογη προς τον συνολικό όγκο της μεταφερόμενης θερμότητας. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα του αγωγού επηρεάζει την απόδοση της συσκευής $P_{in} = V_{in}^2 \times k_{rGO} \times S / L$, όπου V_{in} η εφαρμοζόμενη τάση, S και L η διατομή και το μήκος της επιφάνειας, αντίστοιχα. Η ηχητική πίεση αυξάνει με την αύξηση του P_{in} άρα η ηχητική πίεση είναι ανάλογη προς την αγωγιμότητα του.

Η μέση επιφανειακή θερμοκρασία του γραφενίου μπορεί να προβλεφθεί από τη σχέση:

$$\bar{T} = T_0 + \frac{q_0}{\sqrt{j\omega\kappa_s C_{p,s}}} \quad (1,5)$$

όπου q_0 η πυκνότητα ισχύος εισόδου. Συνεπώς, η ηχητική πίεση και η επιφανειακή θερμοκρασία του γραφενίου αυξάνονται με την ισχύ εισόδου που υποδηλώνει ότι η θερμότητα Joule έχει άμεση σχέση με την ένταση του ήχου, όπως συμβαίνει στο θερμοακουστικό φαινόμενο.

Πολλές ερευνητικές ομάδες μελέτησαν το ενδιαφέρον αυτό φαινόμενο όπου ο αγωγός είναι μεμβράνη γραφενίου. Δοκιμάστηκαν διαφορετικά είδη γραφενίου, όπως CVD μονοστρωματικό ή πολυστρωματικό από πολυστρωματικά και ανηγμένο

οξειδίου του γραφενίου (rGO) με διαφορετικού πάχους που τοποθετήθηκαν σε διάφορα είδη υποστρωμάτων, σε πορώδη.

Οι πρώτες θερμοακουστικές συσκευές γραφενίου περιλάμβαναν αρχικά πολυστρωματικό (διαφόρου πάχους) [22] και έπειτα τριών στρώσεων [23] CVD γραφενίου επιφάνειας 1cm^2 πάνω σε χαρτί διήθησης (ιδανικό μονωτικό πορώδες υπόστρωμα μικρής θερμικής αγωγιμότητας). Η παραγόμενη ηχητική πίεση αυξάνεται γραμμικά με την ισχύ εισόδου (3 έως 20 kHz) και μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση. Η κατευθυντικότητα της πηγής ήχου γραφενίου δείχνει ό η κύρια περιοχή ηχητικής εκπομπής επικεντρώνεται στις γωνίες $\pm 10^\circ$ ως προς άξονα και η αύξηση της γωνίας οδηγεί στη μείωση του SP γενικά. Αποδεικνύεται ότι τα λεπτότερα φιλμ γραφενίου μπορούν να παράγουν υψηλότερο SPL από τα παχύτερα λόγω χαμηλότερης θερμοχωρητικότητας ανά μονάδα επιφάνειας. Το φάσμα συχνοτήτων είναι ευρύ, καλύπτοντας και υπερήχους έως 50 kHz. Έχει γρήγορη μεταβατική απόκριση ήχου (60 μs) σε πραγματικό χρόνο, σταθερότητα στην εκπομπή ήχου για συνεχή λειτουργία υπό σταθερή συχνότητα για αρκετές ώρες και καλή απόδοση ήχου για ισχύ εισόδου μικρότερη από 0,01 W.

Στην εργασία των Ji Won Suk et al. [24] μελετάται η εκπομπή ήχου από γραφένιο CVD μονής στρώσης, μεγάλης επιφάνειας, σε διαφανή (γυαλί, PET και PDMS) και πορώδη υποστρώματα. Βρέθηκε ότι η υψηλότερη ηχητική πίεση παράγεται από το φύλλο γραφενίου σε PET ή PDMS απ' ότι αυτού στο γυαλί λόγω μικρότερης θερμικής διάχυσης. Η αντοχή στην κάμψη PET και PDMS αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα τους. Μελετήθηκε η απόκριση SPL κοίλης μεμβράνης σε σχετικά χαμηλές συχνότητες (< 7 kHz) και βρέθηκε ότι αυξάνεται όσο αυξάνεται η καμπυλότητα. Σε υψηλές συχνότητες εξομαλύνεται παρέχοντας την δυνατότητα κατασκευής ευέλικτων ηχείων υψηλής απόδοσης καθώς και εύκαμπτων μετατροπέων για εφαρμογές εστιασμένων ηχητικών πεδίων.

Για την επίδραση των υποστρωμάτων στην ακουστική απόδοση του θερμοφώνου γραφενίου, αυτό τοποθετήθηκε σε πορώδες Si και PDMS. Βρέθηκε ότι ανάλογα με την πορώδη επιφάνεια παράγεται υψηλότερη ηχητική πίεση. Παρόμοια δοκιμή πραγματοποιήθηκε για γραφένιο μονής ή πολλαπλών στρώσεων CVD σε πορώδες υπόστρωμα από ανοδικό οξειδίο αλουμινίου λόγω της εξαιρετικά χαμηλής του θερμικής αγωγιμότητας (διάμετρος οπών $\sim 80\text{ nm}$, 90% πορώδη αναλογία) [25]. Προκύπτει ότι το γραφένιο CVD μπορεί να παράγει από τις υψηλότερες SPL ($\sim 95\text{ dB}$), που έχουν μέχρι στιγμής αναφερθεί για συσκευές εκπομπής ήχου (SED). Επιβεβαιώνεται έτσι ότι η θερμική εκροή του υποστρώματος είναι μια σημαντική παράμετρος για την αποδοτική παραγωγή ήχου, διότι η θερμική ενέργεια που παράγεται από τον αγωγό πρέπει να ανταλλάσσεται με τον περιβάλλοντα αέρα και όχι με το υπόστρωμα. Αυξάνοντας την πορώδη επιφάνεια, ιδιότητες όπως η θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα και η ειδική θερμότητα του υποστρώματος υποβαθμίζονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θερμική του εκροή και να παράγεται υψηλότερη θερμοακουστική ηχητική πίεση. Επίσης, η μέγιστη αναπτυσσόμενη επιφανειακή θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη για υπόστρωμα με την μεγαλύτερη πορώδη επιφάνεια, που δείχνει ότι η απώλεια θερμότητας προς το υπόστρωμα ελαχιστοποιείται.

Θερμόφωνο όπου η πηγή ήχου ήταν μεμβράνη από rGO ελεύθερης υποστρώματος μεγάλης επιφάνειας (4 cm^2) και πάχους $11\text{ }\mu\text{m}$ υλοποιήθηκε στην εργασία των He Tian, et al. [26]. Η μεμβράνη ήταν εξαιρετικά εύκαμπτη που πραγματοποιήθηκε εκπομπή ήχου ακόμα και σε 360° . Όταν υφίσταται μηχανική παραμόρφωση βρέθηκε ότι η μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας μεταβάλλει την ένταση του ήχου

διαφορετικά σε διαφορετικές διευθύνσεις προσφέροντας καλύτερη ηχητική κατευθυντικότητα. Αξίζει ν' αναφερθεί ότι εύκαμπτη θερμική πηγή ήχου 360° από GO παρασκευάστηκε μέσω της τεχνική απευθείας εγγραφής με laser χαμηλής ισχύος 650nm. Η εύκαμπτη πηγή αφού τοποθετηθεί σε επιφάνεια κυλίνδρου δημιουργεί ηχητικό κύμα 360° με συχνότητα που κυμαίνεται από 100 Hz έως 20 kHz.[27]. Δοκιμάστηκε επίσης laser 450 nm για την εγγραφή της μεμβράνης GO σε PET και προέκυψε ότι η ισχύς του laser και η ταχύτητα σάρωσης επηρεάζουν το SPL της συσκευής ήχου. [28] Η υψηλή ισχύς laser και η αργή ταχύτητα σάρωσης οδηγούν σε μείωση της ηχητικής απόδοσης διότι αυξάνουν το πάχος της συσκευής ήχου.

Μια εξαιρετικά καινοτόμος εφαρμογή αναφέρεται στη βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία γίνεται σύμφωνη παραγωγή και έλεγχος της φάσης ακουστικών κυμάτων από πολυστρωματικό γραφένιο CVD, (1cm² και πάχος ~ 60 nm) με τη βοήθεια υπερταχέων παλμών λέιζερ μέσω μιας φωτο-θερμο-ακουστικής διαδικασίας [29]. Η διαδικασία αυτή είναι δύο σταδίων σε χρονική ακολουθία: μία υπερταχεία (ps) φωτοθερμική διαδικασία, ακολουθούμενη από μια βραδύτερη θερμοακουστική. Όταν οι παλμοί λέιζερ φωτίζουν τη μεμβράνη γραφενίου τα φωτόνια που απορροφούνται διεγείρουν τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, όπου η εκτεταμένη αλληλεπίδραση τους με τις ταλαντώσεις του πλέγματος οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας πλέγματος. Το δείγμα στη συνέχεια θερμαίνει τα άτομα του αέρα μέσω δονήσεων και συγκρούσεων που προκαλούν μεταβολή πίεσης στον αέρα και άρα ηχητικό κύμα. Έτσι, διαδοχικοί οπτικοί παλμοί εισόδου παράγουν διαδοχικούς ηχητικούς παλμούς συγκεκριμένης συχνότητας (~6kHz, διαφορετική για κάθε ρυθμό επανάλληψης του laser) και με μια καλά καθορισμένη φάση. Η αποδοτικότητα παραγωγής ήχου είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος του laser και από τη διάρκεια του παλμού διέγερσης. Όταν η ισχύς του laser αυξηθεί στα 50 mW, ήχος φτάνει στα αυτιά σε απόσταση 10 cm από το δείγμα. Όταν η δέσμη laser κόπει ο ήχος εξαφανίζεται. Όταν η ισχύς του λέιζερ αυξηθεί, η ένταση του ήχου αυξάνεται αναλόγως.

Από τους Choong Sun Kim et al. [30] τοποθετήθηκε πολυστρωματικό CVD γραφένιο σε πολυμερές υπόστρωμα τύπου πλέγματος (πολυ-ιμίδιο (PI) με χαμηλή θερμική χωρητικότητα και θερμική αγωγιμότητα) με κενά πλέγματος ~ (0,9×0,9) mm² διαφορετικών αναλογιών OARs (opening-area-ratios) 0%, 51% και 77%. Η στάθμη ηχητικής πίεσης του δείγματος με 77% OAR αυξήθηκε κατά ~15 dB στα 10 kHz σε σύγκριση με OAR 0%, που σημαίνει 90 φορές υψηλότερο πλάτος ηχητικής πίεσης.

Θερμοακουστική συσκευή κατασκευάστηκε από τους Lu-Qi Tao et al [31] μετατρέποντας το πολυϊμίδιο (PI) σε πορώδες γραφένιο (PG) με μια μονοβηματική πολύ γρήγορη (15 min) τεχνική απευθείας εγγραφής με laser στερεάς κατάστασης (450nm), πετυχαίνοντας μεγάλα στρώματα εύκαμπτου πορώδους γραφενίου. Η PG έχει μια επίπεδη συχνοτική απόκριση στην περιοχή των 5-20 kHz της οποίας η στάθμη μειώνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς του laser γιατί μετατρέπεται περισσότερο PI σε PG δημιουργώντας παχύτερα φύλλα γραφενίου που αυξάνουν την θερμική χωρητικότητα τους.

Επίσης υφάσματα γραφενίου (Graphene woven fabrics GWFs)[32] αποτελούμενα από μεγάλο αριθμό επικαλυπτόμενων μικροταινιών γραφενίου που αναπτύχθηκαν σε χάλκινο πλέγμα με CVD μπορούν και εκπέμπουν ήχο με απόδοση συγκρίσιμη με SLG και νανοσωλήνες άνθρακα CNT. Όταν τοποθετήθηκαν σε πορώδη υπόστρωμα, η απόδοση παραγωγής ήχου ενισχύθηκε περισσότερο από 20 dB, φθάνοντας τα 90 dB για η ισχύς εισόδου 1W λόγω της εξαιρετικά χαμηλής HCPUA.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν δύο ολοκληρωμένες κατασκευές ακουστικών γραφενίου που φαίνονται στο (Σχ. 3). Η πρώτη βασίστηκε σε μεμβράνη GO όπου έχει εγγραφεί με laser μέσω της τεχνικής laser-scribed graphene (LSG) σε υπόστρωμα PET[33]. Σε σύγκριση με ένα εμπορικό ακουστικό (Earthworks M50), το ακουστικό γραφενίου έχει μια ευρύτερη συχνотική απόκριση (100 Hz έως 50 kHz) και υποτριπλάσια διακύμανση (10 dB). Οι αριθμητικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι η συχνότητα ήχου που εκπέμπεται από το γραφένιο μπορεί να φτάσει μέχρι και 1MHz, οπότε θα μπορούσε χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση ζώων (π.χ. σκύλος), όπου απαιτούνται ηχητικά κύματα συχνότητας 35 kHz.

Η δεύτερη βασίστηκε σε γραφένιο CVD μονής στρώσης.[34] Λειτουργεί σε εύρος συχνοτήτων από 20 Hz έως 200 kHz και έχει υψηλότερη τιμή SPL 70dB σε απόσταση 1 cm. Αναπαράγει πιστά τη μουσική, έχει ευρύτερη συχνотική απόκριση και χαμηλότερη διακύμανση σε σχέση με εμπορικό ακουστικό (Earthworks M50). Η απόδοση των SLG ακουστικών συγκριτικά με προηγούμενες προσπάθειες η SPL του είναι υψηλότερη κατά: 10dB από το ακουστικό CNT, 35dB από το ακουστικό rGO λόγω της χαμηλότερης HCPUA και 24dB από παρόμοιο ηχείο γραφενίου χάρη στην καλύτερη ποιότητα φιλμ γραφενίου.[34]



Σχήμα 3 Φωτογραφίες ακουστικού με μεμβράνη γραφενίου

2. Διεθνής πατέντες εφαρμογής γραφενίου στην ηλεκτροακουστική

<https://patents.google.com/patent/US9900698B2/>
<https://patents.google.com/patent/US20170155993>
<https://patents.google.com/patent/WO2014100012A1/en>
<https://patents.google.com/patent/WO2011142637A2/en>
<https://patents.google.com/patent/WO2016054723A1>
<https://patents.google.com/patent/WO2016054723A1>
<https://patents.google.com/patent/US8842857B2/>

3. Αναφορές

- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. et al. «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films» *Science* **306**, pp 666-669, (2004).
- [2] Otakar F., Tsoukleri G. et al. «Development of a universal stress sensor for graphene and carbon fibres» *Nature Comms*. DOI: 10.1038/ncomms1247, (2011)
- [3] Lee, C., Wei, X. et al. «Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene.» *Science* **321**, pp 385–388 (2008)
- [4] Geim AK, «Graphene: Status and Prospects» *Science* **324** (5934) pp 1530–1534. doi:10.1126/science.1158877, (2009)
- [5] A. K. Geim and K. S. Novoselov, «The rise of graphene» *Nat. Mater.*, **6**, pp 183–191, (2007)

- [6] Lee C, Wei X, Kysar JW and Hone J, «Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.» *Science* **321** pp 385–8, (2008)
- [7] Kim KS, Zhao Y et al. «Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. » *Nature* **457** pp 706–10, (2009)
- [8] J. W. Suk et al. «Thermoacoustic sound generation from monolayer graphene for transparent and flexible sound sources» *Adv. Mater.*, **24**, pp 6342, (2012)
- [9] A. A. Balandin et al. «Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene», *Nano Lett.*, **8**, pp 902-907, (2008)
- [10] Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos et al. «100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. » *Science*, **327**, pp 662. (2010)
- [11] Marcelo A. Kuroda et al. «Conductance through Multilayer Graphene Films» *Nano Lett.* **11(9)** pp 3629–33, (2011)
- [12] Keun-Young Shin et al. «Flexible and transparent graphene films as acoustic actuator electrodes using inkjet printing. *Chem. Commun*», **47**, 8527, (2011)
- [13] Sang-Hoon Bae et al. «Graphene-P(VDF-TrFE) Multilayer Film for Flexible Applications.», *ACS Nano*, VOL. **7** NO. 4 pp 3130–3138 (2013)
- [14] S. C. Xu et al. «Flexible and transparent graphene-based loudspeakers *APPLIED PHYSICS LETTERS* **102**, 151902 (2013)
- [15] Shicai Xu et al. «Graphene–silver nanowire hybrid films as electrodes for transparent and flexible loudspeakers.» *CrystEngComm*, **16**, 3532, (2014)
- [16] Qin Zhou and A. Zettl «Electrostatic graphene loudspeaker» *APPLIED PHYSICS LETTERS* **102**, 223109 (2013)
- [17] Qin Zhou et al. «Graphene electrostatic microphone and ultrasonic radio.» *PNAS*, vol. **112** no. 29, pp 8942 (2015)
- [18] Dejan Todorović et al. «Multilayer graphene condenser microphone» *2D Mater.* **2** 045013, (2015)
- [19] SeongTak Woo et al. «Realization of a High Sensitivity Microphone for a Hearing Aid Using a Graphene–PMMA Laminated Diaphragm» *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9** (2), pp 1237 (2017)
- [20] Lin Xiao et al. «Flexible, Stretchable, Transparent Carbon Nanotube Thin Film Loudspeakers», *Nano Lett.* **8**, 12, pp 4539-4545, (2008)
- [21] M. Daschewski et al. «Physics of thermo-acoustic sound generation» *J. Appl. Phys.* **114**, pp 114903 (2013)
- [22] He Tian et al. «Graphene-on-Paper Sound Source Devices.» *ACS Nano*, 5 (6), pp 4878, (2011)
- [23] He Tian et al. «Static behavior of a graphene-based sound-emitting device.» *Nanoscale*, **4**, 3345, (2012)
- [24] Ji Won Suk et al. «Thermoacoustic Sound Generation from Monolayer Graphene for Transparent and Flexible Sound Sources.» *Adv. Mater.* **24**, 6342, (2012)
- [25] He Tian, et al. «Single-layer graphene sound-emitting devices: experiments and modeling.» *Nanoscale*, **4**, 2272, (2012)
- [26] He Tian, et al. «A reduced graphene oxide sound-emitting device: a new use for Joule heating.» *RSC Advances*, 3, 17672, (2013)
- [27] Lu-Qi Tao, et al. «A Flexible 360-Degree Thermal Sound Source Based on Laser Induced Graphene.» *Nanomaterials* **6**, 112, (2016)
- [28] Lu-Qi Tao, et al. «Flexible graphene sound device based on laser reduced graphene.» *Appl. Phys. Lett.* **111**, 103104 (2017)

- [29] Yichao Tian, et al. «Coherent Generation of Photo- Thermo-Acoustic Wave from Graphene Sheets.» Scientific Reports vol. **5**, Article number: 10582 (2015)
- [30] Choong Sun Kim, et al. «Free-Standing Graphene Thermophone on a Polymer-Mesh Substrate.» Small **12**, No. 2, 185, (2016)
- [31] Lu-Qi Tao, et al. «A novel thermal acoustic device based on porous graphene.» AIP ADVANCES **6**, 015105 (2016)
- [32] Zihan Zhang, et al. «High-performance sound source devices based on graphene woven fabrics.» Appl. Phys. Lett. **110**, 093110 (2017)
- [33] He Tian, et al. «Graphene Earphones: Entertainment for Both Humans and Animals» ACS Nano, **8 (6)**, pp 5883, (2014)
- [34] He Tian, et al. «A flexible, transparent and ultrathin single-layer graphene earphone.» RSC Adv., **5**, 17366, (2015)

Ακουστική Συμπεριφορά συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες λιναριού

Αναστάσιος	Ευγενία	Βασίλειος	Διονύσιος
Κόκκινος	Κόλλια	Κωστόπουλος	Κατερέλος
Δρ. Μηχ/γος	Μηχ/γος	Δρ. Μηχ/γος	Δρ. Μηχ/γος
Μηχ/κος	Μηχ/κος	Μηχ/κός	Μηχ/κος
akokkin@teion.gr	kollia@mech. upatras.gr	kostopoulos@mech. .upatras.gr	d.katerelos@gmail. com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ακουστική μελέτη των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένης με ίνες λιναριού και συγκεκριμένα την επιρροή της ακουστικής συμπεριφοράς του συνθέτου από τον προσανατολισμό των ινών. Για τις ανάγκες των πειραμάτων κατασκευάστηκαν σε συνθήκες αυτόκλειστου φούρνου πλάκες πολύστρωτου συνθέτου υλικού από ίνες λιναριού 5 και 10 στρώσεων και κατασκευάστηκαν από υφάσματα διαξονικής πλέξης (0-90). Ο ποιοτικός έλεγχος των πολύστρωτων πλακών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο C-scan και τα δοκίμια εξετάστηκαν για την ακουστική τους συμπεριφορά σε σωλήνα ακουστικής εμπέδησης στάσιμων κυμάτων (Kundt) της Bruel & Kjaer. Τα αποτελέσματα έδειξαν να μην υπάρχει σημαντική επιρροή του προσανατολισμού των ινών στην ακουστική συμπεριφορά του υλικού.

Acoustic behavior of flax reinforced polymeric matrix composite materials

ABSTRACT

The present study aims at the acoustic study of polymeric matrix composite materials, reinforced with flax fibers, in particular the influence of the acoustic behavior of the composite on the orientation of the fibers. For the purposes of the experiments, laminated composite flax materials of 5 and 10-layer were fabricated via autoclave conditions and made of biaxial woven fabrics (0-90). Quality control of the laminated plates was performed by the C-scan method and the specimens were examined for their acoustic behavior in Kundt's acoustic impedance tube (made by Bruel & Kjaer). The results showed that there was no significant influence of the orientation of the fibers on the acoustic behavior of the material.

Εισαγωγή

Τα ινώδη σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα βρίσκουν, συνεχώς, όλο και περισσότερες εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή. Οικιακοί εξοπλισμοί, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, ποδήλατα, σκάφη αναψυχής και αθλητικά είδη είναι μερικά

από τα πεδία εφαρμογών των υλικών αυτών. Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν ακόμη, ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής. Αυτό οφείλεται στις ελκυστικές τους ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Οι φυσικές ίνες είναι υλικά που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση και μπορούν να αποικοδομηθούν μέσω φυσικών διεργασιών ή ακόμα να καούν χωρίς να παράγουν τοξικές ουσίες, ενώ είναι δυνατό να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Δε χρειάζονται χρονοβόρες ή κοστοβόρες διαδικασίες κατεργασίας και επεξεργασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται να έχουν χαμηλό κόστος. Επίσης, οι φυσικές ίνες έχουν συνήθως χαμηλό βάρος σε σχέση με αυτό των παραδοσιακών υλικών και αυτό οδηγεί στις αυξημένες ειδικές τους ιδιότητες. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση φυσικών ινών χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αυτοκινητοβιομηχανία, λόγω του ότι συνδυάζουν το χαμηλό κόστος, το χαμηλό βάρος και τα περιβαλλοντικά οφέλη. Έτσι, μπορούν να ανταγωνιστούν ή ακόμη να αντικαταστήσουν συμβατικά ινώδη σύνθετα υλικά. Επίσης, εξαιτίας της δομής τους, οι φυσικές ίνες προσφέρουν ηχητική και θερμική μόνωση. Υπάρχουν αρκετά επιστημονικά άρθρα που δείχνουν ότι οι ίνες λιναριού παρέχουν καλύτερη απόσβεση των ταλαντώσεων, συγκρινόμενη με αυτή του γυαλιού και του άνθρακα. [1,2] Μία εφαρμογή του λιναριού ως φυσική ενίσχυση είναι στο λεωφορείο Travego της Daimler-Chrysler. Οι κλωβοί της μηχανής του οχήματος είναι εξοπλισμένοι με θερμοπλαστικό πολυμερές ενισχυμένο με ίνες λιναριού, επιτυγχάνοντας υψηλά επίπεδα ηχομόνωσης. [3,4]

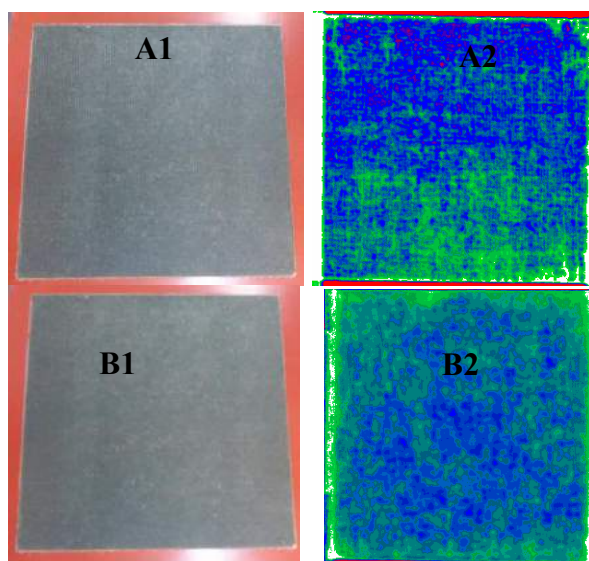
Στις μέρες μας υπάρχει έρευνα για τη χρήση των υλικών αυτών ως αντικαταστάτη του ανισότροπου ξύλου, δηλαδή ως δομικό στοιχείο κατασκευής ακουστικών οργάνων, λόγω της υποτίμησης των ιδιοτήτων του ξύλου (λόγω μόλυνσης του περιβάλλοντος) και λόγω δυσκολίας εύρεσης σπάνιας και ακριβής ξυλείας για την κατασκευή (πχ. καπνακιών) κιθάρας και άλλων μουσικών οργάνων. Μια μελέτη του S. Phillips στο Μόντρεαλ του Καναδά, έδειξε ότι είναι εφικτή η κατασκευή κιθάρας εξ ολοκλήρου από σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες λιναριού. [5]. Παρόμοιες μελέτες για τη χρήση συνθέτων υλικών από αντίστοιχα υλικά έχουν ήδη πραγματοποιηθεί. [6-8]

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ακουστική μελέτη των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένης με ίνες λιναριού και συγκεκριμένα την επιρροή της ακουστικής συμπεριφοράς του συνθέτου από τον προσανατολισμό των ινών.

1. Παρασκευή συνθέτου υλικού

Για τις ανάγκες των πειραμάτων, παρασκευάστηκαν 2 πλάκες από σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένα με ίνες λιναριού. Για τις πλάκες χρησιμοποιήθηκαν προεμποτισμένα πανιά λιναριού με εποξειδική ρητίνη XB 3515 (Flax Prepreg Lineo, France) και με σκληρυντή Aradur 5021. Οι πλάκες αποτελούνταν από 5 και 10 στρώσεις και κατασκευάστηκαν από υφάσματα διαξονικής πλέξης (0-90). Τα υλικά αυτά κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο αυτόκλειστου φούρνου (μέθοδος Autoclave). Στον αυτόκλειστο φούρνο (autoclave) πολυμερίστηκαν με ελεγχόμενη πίεση για 2 ώρες σε θερμοκρασία 110°C και πίεση 6 bar (θερμικό προφίλ), όπως προτείνει το πρότυπο του κατασκευαστή. Ο ποιοτικός έλεγχος των πολύστρωτων πλακών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο C-scan.

Η μέθοδος C-scan, είναι μια μία μη καταστροφική δοκιμή ποιοτικού ελέγχου που ανιχνεύει ελαττώματα σε βάθος. Μπορεί να ανιχνεύσει τα ακριβή σημεία διαστρωματικής αποκόλλησης στην πολύστρωτη πλάκα, μεταξύ συγκεκριμένων στρώσεων. Στο σχήμα 1 που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα του C-Scan στις πλάκες του συνθέτου υλικού υπό μελέτη που κατασκευάστηκαν, από τις οποίες προέκυψαν τα δοκίμια για την ακουστική μελέτη. Δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά τον ποιοτικό έλεγχο με βάση το χρωματικό κώδικα.



Σχήμα 1.1 Διαδικασία ποιοτικού ελέγχου συνθέτου C-Scan. A1 και B1 οι πλάκες των 5 και 10 στρώσεων αντίστοιχα και A2 και B2 τα αντίστοιχα αποτελέσματα C-Scan

2. Πειραματική διαδικασία – Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα ακουστικής συμπεριφοράς σε σωλήνα ακουστικής εμπέδησης στάσιμων κυμάτων (Kundt) της Bruel & Kjaer και μετρήθηκε ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης των πολύστρωτων δοκιμίων (Absorption Coefficient) και η απώλεια ηχητικής διάδοσης (Transmission Loss), σε διάφορες γωνίες του προσανατολισμού των ινών στο σύνθετο υλικό σε σχέση με τον κάθετο άξονα, από 0°-180° ανά 15°. Για το λόγο αυτό διαμορφώθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100mm και 29mm με κοπτικό ακριβείας 0.1mm τρία από κάθε πλάκα (5 στρώσεις και 10 στρώσεις).

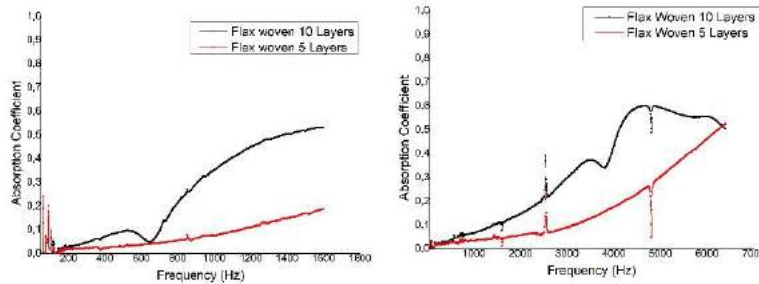
Ο σωλήνας στάσιμων κυμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι σύμφωνος με το πρότυπο ISO 10534-2:1998 (Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method) και του ASTM E 1050-98 (Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System), ενώ στο σχήμα 2.1 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση ακουστικής εμπέδησης στάσιμων κυμάτων (Kundt) της Bruel & Kjaer, για συχνότητες 50-6400Hz.

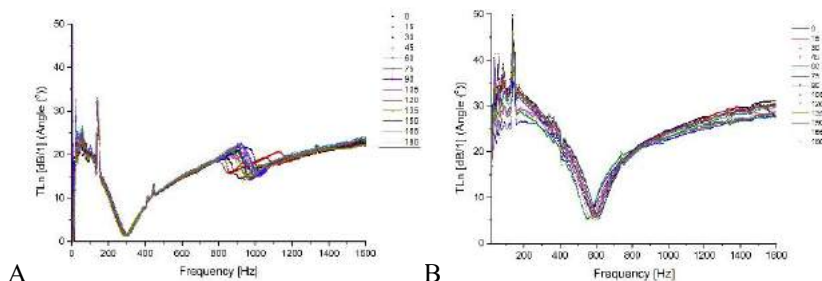
3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν να υπάρχει μικρή διαφορά στην ακουστική συμπεριφορά των υλικών σε συνάρτηση με τη μεταβολή της διεύθυνσης τοποθέτησης του κυλινδρικού δοκιμίου στο σωλήνα Kundt ανεξάρτητα από το πάχος του δοκιμίου. Υπάρχει αισθητή διαφορά στο συντελεστή ηχοαπορρόφησης όπως φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2 στα δοκίμια των 5 και 10 στρώσεων, όπως είναι φυσικό, μιας και υπάρχει διαφορά λόγω περισσότερων στρώσεων στο πάχος του δοκιμίου.



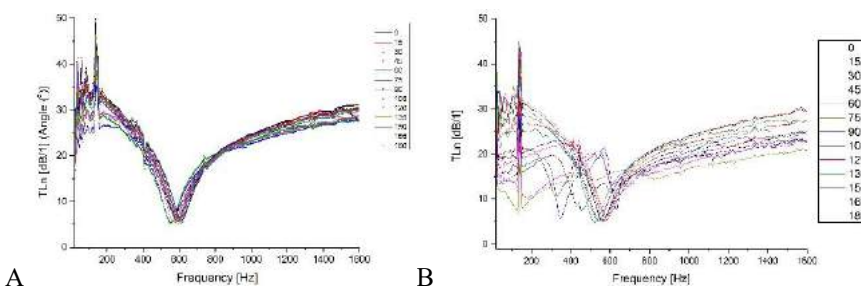
Σχήμα 3.1 Συντελεστής ηχοαπορρόφησης των δοκιμίων 5 και 10 στρώσεων, σε 50-1600Hz και 50-6400Hz.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο πέντε φορές, με σκοπό τον έλεγχο επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.2 Α. Απώλεια ηχητικής διάδοσης (Transmission Loss) για δοκίμια 5 στρώσεων, Β. απώλεια ηχητικής διάδοσης (Transmission Loss) για δοκίμια 10 στρώσεων.

Τα υλικά που μελετήθηκαν είναι πολύ ευαίσθητα στη μεταβολή υγρασίας και είναι εφικτή μια μεταβολή της τάξης του 30-40% στο μέτρο ελαστικότητας των εν λόγω υλικών πριν και μετά την πρόσληψη υγρασίας. Μια μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού προκαλεί μεταβολή στην ακουστική συμπεριφορά του.



Σχήμα 3.3 Α. Απώλεια ηχητικής διάδοσης (Transmission Loss) για δοκίμια 10 στρώσεων υγρασίας 40%, Β. Απώλεια ηχητικής διάδοσης (Transmission Loss) για δοκίμια 10 στρώσεων υγρασία 70%.

Το σχήμα 3.3 φαίνεται η ακουστική συμπεριφορά των δοκιμών ενισχυμένων με ίνες λιναριού, για δύο διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, 40 και 70 % αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η διαφοροποίηση στα δοκίμια των 10 στρώσεων είναι πολύ έντονη όσο αλλάζει η διεύθυνση των ινών αλλά και η υγρασία, αλλά δεν ακολουθεί κάποια λογική τάση όπως αντίστοιχα στις 0 και 180°. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ερευνητική ομάδα πραγματοποίησε επαναληπτικά πειράματα σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και φάνηκε να υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, όταν δεν ελέγχθηκε η υγρασία των δοκιμών. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία και την εμπειρία της ερευνητικής ομάδας κυρίως του Πανεπιστημίου Πατρών, τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες λιναριού, όταν βρεθούν σε περιβάλλον που περιέχει υγρασία, έχουν τη τάση να την απορροφούν υγρασία μέχρι το σημείο κορεσμού τους. Η υγρασία είναι μια σημαντική παράμετρος που, σε συνδυασμό με

την ακτινοβολία, είναι συνήθως η κυριότερη αιτία διάβρωσης των υλικών. Η απορρόφηση μορίων νερού, συμβάλλει δραστικά στη φυσική υποβάθμιση του υλικού λόγω των μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται συναρτήσει του χρόνου. Οι μηχανισμοί της απορρόφησης στα σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι και αφορούν, κυρίως, αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων του νερού και των μορίων της ρητίνης, ενώ ως αποτέλεσμα υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου υλικού. [9-10]

Υπάρχει έρευνα σε εξέλιξη από μέλη της ερευνητικής ομάδας που αφορά την επιρροή της υγρασίας και της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών και τον ποιοτικό ή/και ποσοτικό προσδιορισμό τους. [11]

4. Αναφορές

[1] M. Kaup, M. Karus και S. Ortmann, *The Use of Natural Fibres in Composite Materials in the German and Austrian Automotive Industry*, Nova Institut GmbH: Hürth, Germany, 2002.

[2] L. Yan, N. Chouh και K. Jayaraman, *Flax fibre and its composites—A review*. *Compos.*, 2014.

[3] Κόλλια Αλεξάνδρα, «Κατασκευή και Μελέτη της Επίδρασης της Απορρόφησης Φυσιολογικού Ορού στη Βισκοελαστική Συμπεριφορά Σύνθετου Υλικού Εποξικής Ρητίνης Ενισχυμένης με Ύφασμα Ινών Λιναριού», *Διπλωματική εργασία, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία των Πολυμερών*, 2017.

[4] Z. I. Jinchun, Z. Huijun, J. Njuguna και A. Hrushikesh, «Recent Development of Flax Fibres and Their Reinforced Composites Based on Different Polymeric Matrices», *Materials*, 5171-5198, Volume 6, Issue 11, 2013.

[5] S. Phillips, *Bio-Composite Materials Applications to musical instruments*, Montreal: Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree of Master of Engineering, 2009.

[6] D. J. a. P.Killingback, "The Development of a Carbon Fibre Violin," in 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, SCO, 2009.

[7] U. Wegst, "Bamboo and Wood in Musical Instruments," *Annual Review of Materials Research*, vol. 38, no. 1, p. 323, 2008.

[8] T. M. U. W. Ono, "Acoustic characteristics of unidirectionally fiber-reinforced polyurethane foam composites for musical instrument soundboards," *Acoustical Science and Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 135-142, 2002.

[9] K. Mongkolsutirat, *Time and temperature dependence of viscoelastic stress relaxation in Au and Au alloy thin films*, Lehigh University, PhD Thesis, 2013.

[10] V. SETHURAMAN, «VISCOELASTIC MODELING OF STRESS RELAXATION BEHAVIOR IN BIODEGRADABLE POLYMERS,» Oklahoma State University, Master of Science, 2013.

[11] X. Saridaki, E. Kollia, D. Karagiannis, S. Tsantzalis, M. Wonneberger, F. Dungen and V. Kostopoulos, «EFFECT OF HYDROTHERMAL AGEING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF FLAX FIBRE/ BIO-BASED RESIN COMPOSITES», *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, Athens, Greece, 24-28th June 2018.

Αναπαραγωγή ήχου από οπτικά οδηγούμενες ηχητικές πηγές (Laser Audio)

Κωνσταντίνος Καλέρης
Υποψήφιος Διδάκτορας¹
kkaleris@upnet.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής¹
moutrjop@upatras.gr

Ιωάννης Ορφανός
ΕΤΕΠ²
yorphanos@staff.teicret
e.gr

Ευθύμιος Μπακαρέζος
Αναπλ. Καθηγητής²
bakarezos@staff.teicret
e.gr

Νεκτάριος Παπαδογιάννης
Καθηγητής²
nrapadogiannis@staff.teicre
te.gr

¹Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας, Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών

²Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, ΤΕΙ Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει στοιχεία της φυσικής και της τεχνολογίας της οπτοακουστικής μετατροπής μέσω ιονισμού από ακτινοβολία laser με σκοπό την ελεγχόμενη αναπαραγωγή ήχου από οπτικά οδηγούμενες πηγές. Αναλύονται οι φυσικές διεργασίες πίσω από την παραγωγή ήχου μέσω ιονισμού από υπερ-ισχυρούς και βραχείς παλμούς laser (laser induced breakdown - LIB) και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία για την μέτρηση και τον χαρακτηρισμό τους. Παρουσιάζονται αποτελέσματα οπτικών μετρήσεων για διαφορετικές ενέργειες οπτικού παλμού σε διαφορετικές αποστάσεις από την ακουστική πηγή και αναδεικνύονται τα χρονικά και συχνотικά χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος LIB. Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα πρωτότυπου συστήματος και αντίστοιχες εξομοιώσεις ψηφιακών διαμορφώσεων παλμοσειρών ήχου LIB για την αναπαραγωγή συνεχών και ελεγχόμενων ηχητικών σημάτων στον αέρα.

Sound reproduction from laser-driven sound sources (Laser Audio)

ABSTRACT

In this work, physical and technological aspects of the optoacoustic transduction through Laser Induced Breakdown are presented, with a focus on controlled reproduction of complex acoustic signals from optically-driven sound sources. The physical processes behind laser-induced breakdown from short, high-power laser pulses are analysed and the experimental procedures and setups for precise measurements are described. Moreover, results from optical measurements are

presented regarding different laser pulse energies and measuring distances, which allow for the characterisation of temporal and spectral features of the LIB acoustic signal. Finally, a LIB sound reproduction prototype is described and simulation results of reproduction of complex and continuous sound signals through LIB pulse trains in the air are presented and evaluated.

Εισαγωγή

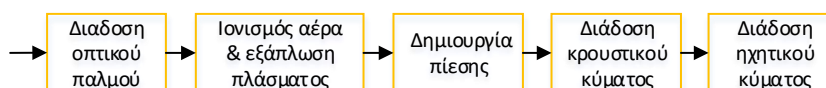
Η οπτικά οδηγούμενη αναπαραγωγή ήχου μέσω ιονισμού του αέρα από παλμούς laser (Laser Induced Breakdown - LIB), είναι μια νέα διεπιστημονική περιοχή έρευνας που συνδυάζει την φυσική πλάσματος, τη ρευστομηχανική, την ακουστική και την επεξεργασία σήματος [1,2,3]. Σκοπός είναι η αξιοποίηση της παλμικής ηχητικής πίεσης που παράγεται από τον ιονισμό ενός «στοχευόμενου μέσου» (target medium) για την παραγωγή συνεχούς και ελεγχόμενου ήχου. Το ακουστικό σήμα μπορεί να είναι είτε αναλογικό, όπως σε ένα συμβατικό μεγάφωνο, είτε ψηφιακό, διαμορφωμένο κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνεται απευθείας αποδιαμόρφωση κατά την διάδοσή του στον αέρα. Ηχητικοί παλμοί LIB έχουν αξιοποιηθεί σε πειραματικό επίπεδο ως σήματα διέγερσης i) σε ακουστικές μετρήσεις χώρων [4], ii) στην δημιουργία ακουστικών πηγών ελεγχόμενης κατευθυντικότητας [5], iii) σε ευέλικτη εικονική μέτρηση ακουστικών συστημάτων [6] και iv) στην υλοποίηση υπερηχητικών ακουστικών μετατροπέων [7]. Αντιθέτως, η παραγωγή συνεχών ηχητικών σημάτων (π.χ. ομιλίας, μουσικής) από παλμούς LIB και κατ' επέκταση η δυνατότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένων συστημάτων αναπαραγωγής ήχου (μεγάφωνα) LIB αποτελεί ένα νέο αδιερεύνητο πεδίο με μεγάλο εύρος δυνατοτήτων και προεκτάσεων.

Όταν παλμοί laser υψηλής ενέργειας και εξαιρετικά μικρής διάρκειας εστιάζονται σε μικρό όγκο αέρα (ή άλλο μέσο), παράγουν ισχυρό ακουστικό παλμό με σημαντική ποσότητα ενέργειας εντός του ακουστού φάσματος. Τα χαρακτηριστικά των ακουστικών παλμών LIB είναι ελέγξιμα μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης της ακτινοβολίας του laser (π.χ. μήκος κύματος, διάρκεια, ενέργεια, κλπ.). Οι παλμοί LIB εμφανίζουν υψηλή επαναληψιμότητα ενώ η μικρή διάρκεια ζωής του πλάσματος (της τάξης των δεκάδων nanoseconds), επιτρέπει την γρήγορα επαναλαμβανόμενη διέγερση στο ίδιο σημείο του χώρου. Έτσι, μια παλμική οπτική πηγή μπορεί να δημιουργήσει, ανάλογα με το σημείο εστιασμού, εικονικές ηχητικές πηγές σε διάφορα σημεία του χώρου. Οι πηγές μπορεί να παρουσιάζουν παντοκατευθυντική ή οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή μορφή κατευθυντικής εκπομπής μέσω διαδοχικής διέγερσης πολλαπλών χωρικά κατανεμημένων σημείων (volumetric arrays) [5].

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, η οπτοακουστική τεχνολογία αναπαραγωγής ήχου μπορεί εν δυνάμει να αποτελέσει εναλλακτική πρόταση στην υπάρχουσα μη αποδοτική ηλεκτρομηχανική τεχνολογία, όντας παράλληλα συμβατή με τις ανάγκες της αγοράς και των χρηστών για ευέλικτα ηχητικά συστήματα, τόσο σε εφαρμογές μικρής-μεσαίας κλίμακας (σπίτι, χώρους εργασίας, κλπ.), όσο και μεγάλης κλίμακας (κινηματογράφοι, συναυλίες, κλπ.) όπου απαιτούνται πολλαπλές χωρικά κατανεμημένες πηγές/κάναλια με ελεγχόμενη κατευθυντικότητα εκπομπής.

1. Οπτοακουστική μετατροπή

Το φαινόμενο της οπτοακουστικής μετατροπής μέσω ιονισμού του αέρα από βραχείς και υπερ-ισχυρούς παλμούς laser μπορεί να αναπαρασταθεί ως αλυσίδα διαδοχικών διεργασιών, η οποία ξεκινάει από την διάδοση του οπτικού παλμού στον αέρα και ολοκληρώνεται με την άφιξη του παραγόμενου ηχητικού σήματος στον ακουστικό δέκτη (Σχ.1.1). Ο παλμός απορροφάται (μερικώς) από τον αέρα στο σημείο εστίασης και δημιουργεί πλάσμα με αποτέλεσμα οι ελεύθεροι φορείς που παράγονται να μεταφέρουν κινητική ενέργεια στον περιβάλλοντα αέρα, δημιουργώντας πολύ γρήγορη και ισχυρή μεταβολή της πίεσης. Σε αυτό το επίπεδο διέγερσης ο αέρας συμπεριφέρεται μη γραμμικά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας υπερηχητικός παλμός (shock wave) ο οποίος αρχικά διαδίδεται με ταχύτητα μερικών mach, ενώ κατά την διάδοσή του η ταχύτητά του μειώνεται έως ότου να εξισωθεί με την ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Από εκεί και μετά, η συμπεριφορά του αέρα γίνεται γραμμική και ο παλμός διαδίδεται ως ακουστικό κύμα ώσπου να φτάσει στον δέκτη.



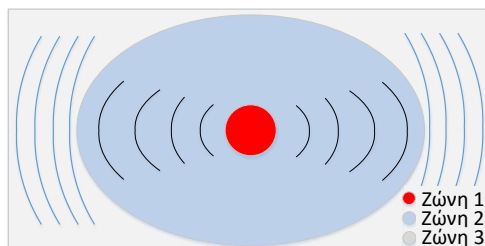
Σχ.1:1 Αλυσίδα οπτοακουστικής μετατροπής μέσω ιονισμού του αέρα από laser

Κατά την αλληλεπίδραση οπτικών παλμών laser, πυκνότητας ισχύος κοντά στο κατώφλι ιονισμού, με τον αέρα, επικρατούν πέντε φυσικές διεργασίες, μέσω των οποίων δημιουργούνται και καταστρέφονται ελεύθεροι φορείς¹ [9,10]. Ελεύθεροι φορείς δημιουργούνται μέσω: α) πολυφωτονικού ιονισμού (multi-photon ionization - MPI) και β) ιονισμού χιονοστιβάδας (cascade ionization) λόγω του φαινομένου inverse Bremsstrahlung. Ο πολυφωτονικός ιονισμός δημιουργεί αρχικά ελεύθερους φορείς οι οποίοι επιταχύνονται υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του οπτικού παλμού και δημιουργούν νέους ελεύθερους φορείς μέσω της σύγκρουσής τους με ουδέτερα μόρια (cascade ionization). Αντίθετα, διαδικασίες που καταστρέφουν τους ελεύθερους φορείς είναι: α) η απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εστιακό όγκο λόγω διάχυσης (diffusion), β) η επανασύνδεση των ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα (recombination) και γ) η προσάρτηση ηλεκτρονίων σε ουδέτερα μόρια (electron attachment).

Η απότομη εξάπλωση του πλάσματος (Ζώνη 1, Σχ.2) οδηγεί στην ραγδαία μεταφορά κινητικής ενέργειας στα μόρια του περιβάλλοντα αέρα με αποτέλεσμα την δημιουργία κρουστικού κύματος πίεσης (shock wave) [3,11]. Η γεωμετρία της ιονισμένης περιοχής είναι κυλινδρική [12], με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά ακουστικής εκπομπής να προσομοιάζουν κυλινδρική πηγή ήχου. Στην περιοχή γύρω από το πλάσμα (Ζώνη 2, Σχ. 1.2) όπου η πίεση είναι πολύ υψηλή, η απόκριση του αέρα είναι μη γραμμική και η διαταραχή διαδίδεται με υπερηχητική ταχύτητα, ενώ εμφανίζονται φαινόμενα στροβιλισμού των σωματιδίων του μέσου (τουρβώδης ροή). Κατά την διάδοσή του μακριά από τον ιονισμένο όγκο, το κύμα μετατρέπεται

¹ Για πυκνότητες ισχύος πολύ μεγαλύτερες του κατωφλίου ιονισμού, επικρατούν φαινόμενα όπως ο ιονισμός σήραγγος (tunnel ionization).

σταδιακά σε ηχητικό (Ζώνη 3, Σχ. 1.2). Η δημιουργία και διάδοση των παλμών LIB στον αέρα έχει περιγραφεί θερμοδυναμικά (συμπίεστες εξισώσεις Navier-Stokes [3]) με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας στον ιονισμένο όγκο, όπου λαμβάνονται υπόψιν χημικές διεργασίες και αλλαγές στις θερμοδυναμικές ιδιότητες του μέσου λόγω της πίεσης.



Σχ.1.2: Αναπαράσταση ζωνών πλάσματος (1), μη γραμμικής απόκρισης του αέρα (2) και γραμμικής απόκρισης του αέρα (3) κατά την παραγωγή ήχου μέσω LIB

2. Μεθοδολογία μετρήσεων και ακουστικά χαρακτηριστικά παλμών LIB

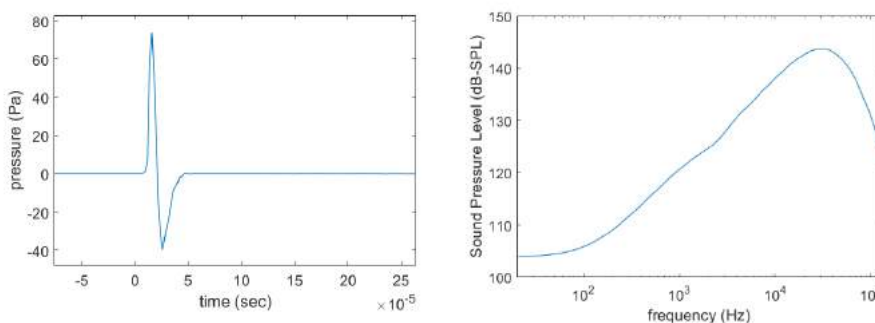
Τα χαρακτηριστικά των ακουστικών παλμών LIB εξαρτώνται από τον οπτικό παλμό που τους δημιουργεί και κυρίως από την πυκνότητα ισχύος, τον εστιακό όγκο, το προφίλ (Gaussian etc.), το μήκος κύματος και την διάρκεια του. Εν γένει, όπως είναι γνωστό από προηγούμενες εργασίες [1,4,11], τα σήματα LIB έχουν την μορφή «παλμών N» (N-pulses) με τυπική διάρκεια μερικές δεκάδες microsecond και φάσμα που ξεκινάει από τις πολύ χαμηλές συχνότητες (περιοχή sub-woofer) και εκτείνεται μέχρι τους υπέρηχους (δεκάδες ή εκατοντάδες kHz). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι παλμοί LIB οδηγήθηκαν από laser Quantel Brilliant B (Nd: YAG), με παλμούς διάρκειας 6ns, μήκος κύματος 532nm και ενέργειας έως 230mJ. Η εστίαση των παλμών στον αέρα έγινε με χρήση φακών 7.5, 10, 20 και 30cm. Η καταγραφή των προκαλούμενων ηχητικών σημάτων έγινε με δύο τρόπους:

i) με χρήση μετρητικού μικρόφωνο ευρέως φάσματος και δυναμικής περιοχής (AKO 7012, 3Hz-35kHz). Για την αποφυγή της γρήγορης ακουστικής ανάκλασης από τον φακό τοποθετήθηκε ίριδα μεταξύ του φακού και του σημείου εστίασης με γωνία έτσι ώστε η ανάκλαση να κατευθύνεται μακριά από το μετρητικό μικρόφωνο. Η δειγματοληψία έγινε με κάρτα ήχου RME Fireface 800 σε συχνότητα δειγματοληψίας 192kHz.

ii) με οπτική μέτρηση απόκλισης δέσμης laser (pump-probe beam deflection). Σε αυτή την περίπτωση η καταγραφή μέσω παλμογράφου επιτρέπει μέτρηση ευρέως φάσματος με πολύ υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας (εδώ 500kHz). Για το triggering του παλμογράφου χρησιμοποιήθηκε το σήμα του οπτικού παλμού κατά την εκπομπή του από το laser, ενώ για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε κάθε μέτρηση (ενέργεια παλμού, απόσταση μέτρησης) λήφθηκε μέσος όρος από 250 επαναλήψεις.

Στο Σχ.2.1 φαίνεται η κυματομορφή και το φάσμα ενός τυπικού παλμού LIB παραγόμενου από οπτικό παλμό 40mJ, με φακό εστίασης 7.5cm και απόσταση μέτρησης 7mm από την πηγή, όπως καταγράφηκε με την οπτική μέθοδο. Στο σήμα έχει γίνει παραθύρωση προκειμένου να αφαιρεθεί ο θόρυβος και η συνεισφορά του

χώρου μετρήσεων (ανακλάσεις κτλ.). Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1(α), το χαρακτηριστικό N-pulse διαρκεί 35μs ενώ τα επίπεδα ηχητικής στάθμης ξεπερνάει τα 140dB στην περιοχή των υπερήχων. Ο παλμός δεν είναι απόλυτα συμμετρικός καθώς η θετική κορυφή είναι ισχυρότερη από την αρνητική ενώ η χρονική διάρκεια ανόδου (rise time) είναι μικρότερη από την διάρκεια επαναφοράς (relaxation time). Στο Σχ. 2.1(β) παρουσιάζονται τα φασματικά χαρακτηριστικά του παλμού LIB όπως προκύπτουν από μετασχηματισμό Fourier του χρονικού σήματος. Το φάσμα ξεκινάει από τις πολύ χαμηλές συχνότητες ενώ από τα $\sim 2\text{kHz}$ και πάνω αυξάνει με ρυθμό ανάλογο της συχνότητας ($\sim f$) έως το μέγιστο στα $\sim 31\text{kHz}$. Για συχνότητες κάτω των 100Hz το φάσμα του παλμού φαίνεται να γίνεται σταθερό. Από τις έως τώρα μετρήσεις όμως (όπως και από άλλες εργασίες στον χώρο [4,11]) δεν μπορεί να προκύψει βέβαιο συμπέρασμα καθώς σε εκείνη την συχνοτική περιοχή το φάσμα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην επεξεργασία μέσω παραθύρου και στην επίδραση του ακουστικού θορύβου υποβάθρου. Σε κάθε περίπτωση, ο παλμός LIB έχει σημαντική ενέργεια εντός του ακουστού φάσματος, εμφανίζοντας χαρακτηριστικά υψηλερατού φίλτρου πρώτης τάξης, τουλάχιστον από τη συχνότητα των 100Hz και πάνω.



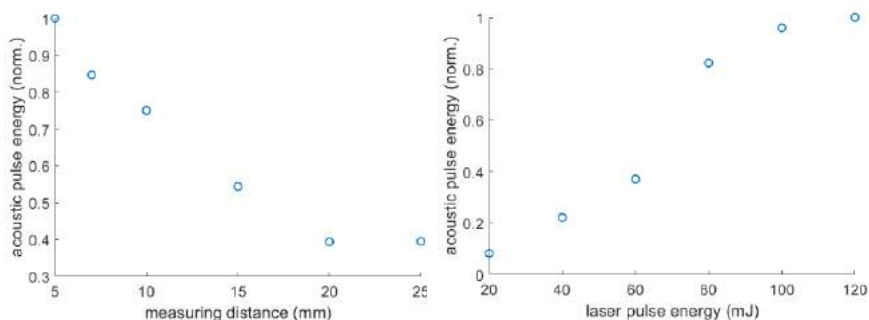
Σχ.2.1: α) Κυματομορφή και β) φάσμα ενός τυπικού ακουστικού παλμού LIB, παραγόμενου από οπτικό παλμό 6ns και ενέργειας 40mJ

3. Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αρχικά αποτελέσματα από μετρήσεις παλμών LIB που πραγματοποιήθηκαν στο Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ του ΤΕΙ Κρήτης, καθώς και πρώιμα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση του φαινομένου, όσον αφορά στην παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρονίων από την απορρόφηση της οπτικής ακτινοβολίας από τον αέρα. Επίσης παρουσιάζεται διάγραμμα πειραματικής διάταξης και αντίστοιχες εξομοιώσεις ελεγχόμενης αναπαραγωγής συνεχούς ήχου από παλμοσειρές LIB, οι οποίες βασίζονται σε ψηφιακές διαμορφώσεις ηχητικών σημάτων (S/D, PWM).

3.1 Εξάρτηση της ενέργειας ακουστικού παλμού LIB από την απόσταση μέτρησης και την ενέργεια οπτικού παλμού.

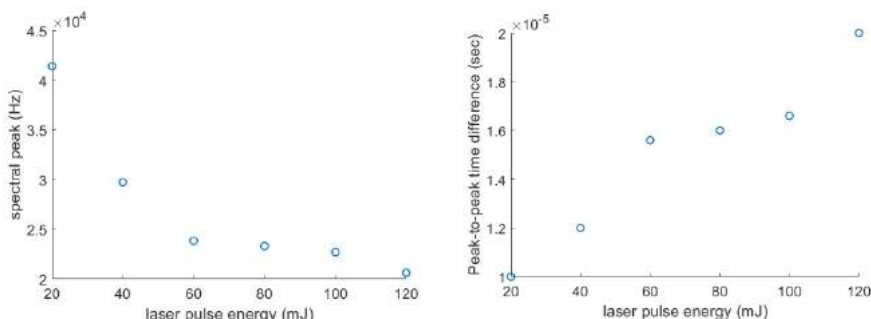
Στο Σχ.3.1 παρουσιάζεται η εξάρτηση της ενέργειας του ακουστικού παλμού από την απόσταση από την πηγή, για σταθερή ενέργεια οπτικού παλμού 20mJ. Όπως είναι αναμενόμενο, η ενέργεια του ακουστικού παλμού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης, όχι όμως με τον ρυθμό που επιτάσσει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου (6dB/οκτάβα). Αυτό υποδηλώνει την μη γραμμική συμπεριφορά του αέρα στις αποστάσεις μέτρησης, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις άλλων εργασιών [13]. Σημειώνεται ότι η ενέργεια 20mJ βρίσκεται κοντά στην ενέργεια κατωφλίου για ιονισμό του αέρα (με δεδομένη την διάρκεια των 6ns). Στο Σχ. 3.1(β) παρουσιάζεται η εξάρτηση της ενέργειας του ακουστικού παλμού από την ενέργεια του οπτικού παλμού για απόσταση μέτρησης 25mm. Αύξηση της ενέργειας του παλμού laser οδηγεί, όπως είναι αναμενόμενο, σε αύξηση της ενέργειας του ακουστικού παλμού.



Σχ.3.1: Κανονικοποιημένη ενέργεια ακουστικού παλμού LIB ως προς α) την απόσταση μέτρησης για οπτικούς παλμούς 20mJ (near threshold) και β) την ενέργεια του οπτικού παλμού.

3.2 Εξάρτηση του φάσματος ακουστικού παλμού από την ενέργεια οπτικού παλμού

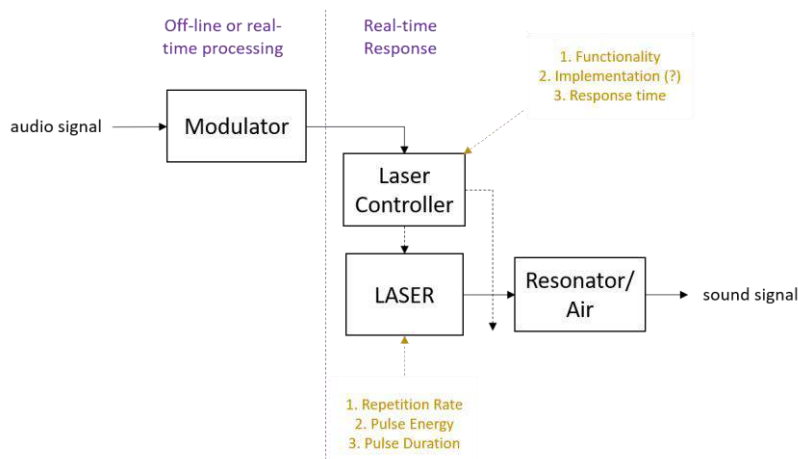
Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Σχ. 3.2, όπου φαίνεται η εξάρτηση του φασματικού μεγίστου των ακουστικών παλμών LIB από την ενέργεια των οπτικών παλμών. Με την αύξηση της ενέργειας του οπτικού παλμού, το ακουστικό φασματικό μέγιστο μετατοπίζεται προς τα αριστερά, με αποτέλεσμα το σήμα LIB να γίνεται πιο χαμηλόσυχνο. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται στην διάρκεια του ακουστικού παλμού, όπως φαίνεται από το Σχ. 3.2(β) όπου παρουσιάζεται η σχέση της διάρκειας του ακουστικού παλμού (υπολογισμένη ως η χρονική διαφορά μεταξύ μεγίστου και ελάχιστου του N-pulse) με την ενέργεια του οπτικού παλμού. Καθώς το σήμα LIB γίνεται πιο «αργό», το φασματικό του περιεχόμενο μετατοπίζεται προς τις χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο αξιοποιήσιμο σε ηλεκτροακουστικές εφαρμογές.



Σχ. 3.2: α) φασματικό μέγιστο και β) χρονική απόσταση peak-to-peak ακουστικών παλμών LIB συναρτήσει της ενέργειας του οπτικού παλμού

3.3 Εξομοιώσεις για αναπαραγωγή ήχου από παλμοσειρές LIB με χρήση ψηφιακών διαμορφώσεων PWM και Sigma/Delta

Για να συντεθεί ένα σύνθετο ακουστικό σήμα από ηχητικούς παλμούς LIB στον αέρα, το σήμα θα πρέπει να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να μπορεί αφ' ενός να οδηγηθεί μέσω του συστήματος laser και αφ' ετέρου να επιτυγχάνεται αποδιαμόρφωση στον αέρα (ή σε κάποια ειδική διάταξη / υλικό) με υψηλή ηχητική πιστότητα. Ένα γενικό διάγραμμα συστήματος αναπαραγωγής ήχου μέσω LIB προτείνεται στο Σχ. 3.3. Το σύστημα απαρτίζεται από έναν διαμορφωτή για την επεξεργασία του ηχητικού σήματος, ένα σύστημα ελέγχου του laser, το σύστημα laser και την διάταξη αποδιαμόρφωσης του σήματος (εάν υπάρχει). Ο διαμορφωτής δέχεται ως είσοδο ένα αναλογικό ή ψηφιακό ακουστικό σήμα και το μετατρέπει στην κατάλληλη κωδικοποίηση τροφοδοτώντας το σύστημα ελέγχου του laser. Το σύστημα ελέγχου μετατρέπει το διαμορφωμένο σήμα σε μια σειρά από σήματα

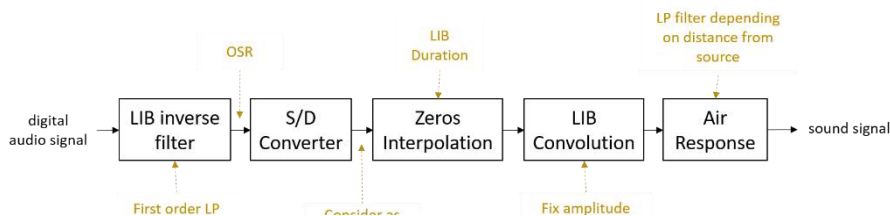


Σχ.3.3: Σύστημα ελεγχόμενης αναπαραγωγής ηχητικών σημάτων μέσω ιονισμού του αέρα από laser

ελέγχου που διαμορφώνουν την ακτινοβολία του laser ώστε να εκπέμπεται η κατάλληλη οπτική παλμοσειρά. Τέλος, οι παλμοί του laser εστιάζονται στην διάταξη αποδιαμόρφωσης ή απευθείας στον αέρα.

Για την διαμόρφωση του ηχητικού σήματος σε ψηφιακή παλμοσειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη διαμόρφωση πυκνότητας παλμών Σίγμα/Δέλτα (Σ/Δ) ή διαμόρφωση πλάτους παλμών PWM (Pulse Width Modulation), καθώς και στις δύο περιπτώσεις, για την αποδιαμόρφωση του σήματος απαιτείται απλώς χαμηλοπερατό φίλτρο. Στο Σχ. 3.4 παρουσιάζεται η διαδικασία εξομοίωσης του ηχητικού σήματος που παράγεται από παλμοσειρά LIB με διαμόρφωση Σ/Δ . Σημειώνεται πως το πρώτο στάδιο της αλυσίδας αντιστοιχεί σε φίλτρο αντιστροφής του φάσματος των παλμών LIB με απόκριση $1/f$ (βλ. ενότητα 2) ώστε να επιτυγχάνεται ισοστάθμιση του συνολικού φάσματος εντός της ακουστικής περιοχής.

Ενδεικτικά αποτελέσματα για τις παραπάνω διαμορφώσεις παρουσιάζονται στο Σχ. 3.5. Το Σχ. 3.5(α) δείχνει το φάσμα ψηφιακού σήματος PCM (Pulse Code

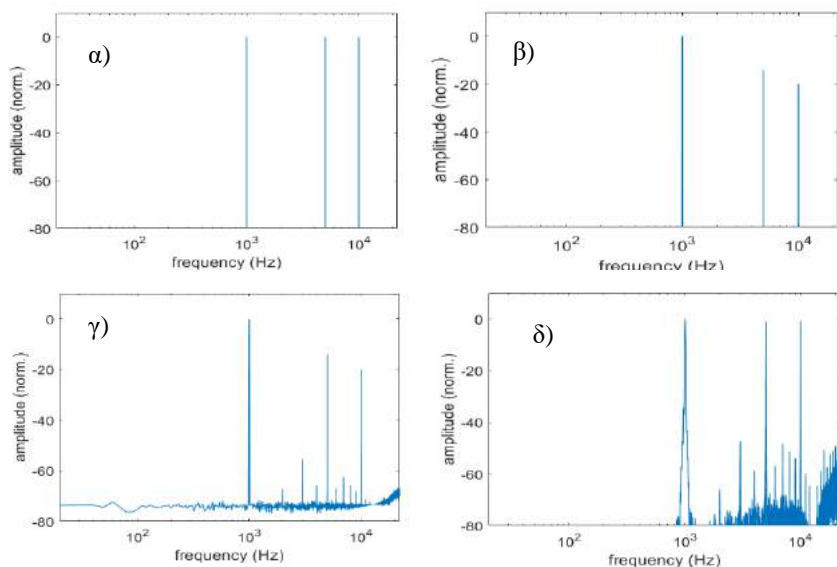


Σχ.3.4: Αλυσίδα εξομοίωσης αναπαραγωγής ήχου μέσω παλμοσειρών LIB Σίγμα/Δέλτα

Modulation) τριών συχνοτήτων, στο οποίο γίνεται προ-επεξεργασία με χαμηλοπερατό φίλτρο 1^{ης} τάξης (Σχ. 3.5(β)). Το επεξεργασμένο σήμα στην συνέχεια διαμορφώνεται κατά Σ/Δ με απλό διαμορφωτή πρώτης τάξης. Το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος στην ακουστική περιοχή φαίνεται στο Σχ. 3.5(γ). Όπως είναι γνωστό για τις διαμορφώσεις Σ/Δ και PWM [8,14,15], το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος επεκτείνεται σε συχνότητες πολύ υψηλότερες από την ακουστική περιοχή συχνοτήτων (~MHz), όμως εντός της ακουστικής περιοχής, το φάσμα του αρχικού σήματος διατηρείται, με κάποιες σχετικά μικρές και αντιμετωπίσιμες παραμορφώσεις [16]. Τέλος, το Σχ. 3.5(δ) παρουσιάζει το ακουστό φάσμα της ακολουθίας των παλμών LIB όπως προκύπτει από συνέλιξη του κωδικοποιημένου σήματος Σίγμα/Δέλτα με την χρονοσειρά του παλμού LIB (βλ. Σχ. 3.4). Από το Σχ.3.5(δ) φαίνεται πως μετά από αναπαραγωγή του αρχικού ηχητικού σήματος μέσω παλμοσειράς LIB και στην συνέχεια αποδιαμόρφωση μέσω χαμηλοπερατού φίλτρου, το φάσμα έχει διατηρηθεί, με περιορισμένες παραμορφώσεις. Μελλοντικά, οι παραμορφώσεις αυτές θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη προεπεξεργασία του αρχικού σήματος.

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι βασικοί φυσικοί μηχανισμοί που επιτρέπουν τη δημιουργία του ακουστικού σήματος LIB μέσω ιονισμού του αέρα από βραχείς και υπερ-ισχυρούς παλμούς laser καθώς και οι πειραματικές διαδικασίες για την μέτρηση των παλμών LIB με ακουστικές και οπτικές μεθόδους. Επιπλέον,



Σχ. 3.5 Μέτρο φάσματος α) αρχικού σήματος, β) σήματος προ-φιλτραρισμένου με φίλτρο αντριστροφής της απόκρισης των παλμών LIB, γ) σήματος κωδικοποιημένου κατά Σ/Δ και δ) εξομοιωμένου σήματος αναπαραγμένου από παλμοσειρά LIB

παρουσιάστηκαν μερικά πρώιμα αποτελέσματα από μετρήσεις των ακουστικών παλμών LIB και περιγράφηκαν τα κύρια χρονικά και φασματικά χαρακτηριστικά τους, συναρτήσε της απόστασης μέτρησης και της ενέργειας του οπτικού παλμού. Τέλος, περιγράφηκε πρόταση για σύστημα αναπαραγωγής ήχου από παλμοσειρές LIB και παρουσιάστηκαν αποτελέσματα εξομοιώσεων του ηχητικού φάσματος που προκύπτει με χρήση διαμόρφωσης Σίγμα/Δέλτα.

Στο μέλλον πρόκειται:

α) να βελτιωθεί η ποιότητα των ακουστικών μετρήσεων με χρήση μικροφώνου ευρύτερου φάσματος (αποτελούσε περιοριστικό παράγοντα στις έως τώρα μετρήσεις) αλλά και των οπτικών μετρήσεων, με βελτίωση της θωράκισης από την οπτική ακτινοβολία του πλάσματος και της ποιότητας της οπτικής δέσμης για μείωση του θορύβου. Σκοπός είναι να μελετηθούν οι χρονοσυχνοτικές διαφορές μεταξύ παλμών LIB που προκύπτουν από οπτικούς παλμούς nanosecond και femtosecond καθώς και να μετρηθεί με ακρίβεια το φάσμα των παλμών LIB στις πολύ χαμηλές συχνότητες,

β) να υλοποιηθεί πλατφόρμα ελεγχόμενης αναπαραγωγής σύνθετων ηχητικών σημάτων από LIB, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.3 προκειμένου να πραγματοποιηθούν ακουστικές μετρήσεις παλμοσειρών LIB,

γ) να αναπτυχθεί μοντέλο περιγραφής της οπτοακουστικής μετατροπής από την εκπομπή του οπτικού παλμού έως την διάδοση του παραγόμενου ηχητικού σήματος, μέσω του οποίου θα μπορούν να εξομοιωθούν οι παλμοσειρές LIB. Το μοντέλο θα συνεισφέρει στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών πίσω από την οπτοακουστική μετατροπή καθώς και στην μελέτη της βελτιστοποίησης του συστήματος αναπαραγωγής και της ποιότητας του παραγόμενου ήχου.

Ευχαριστίες

Ο κ. Κωνσταντίνος Καλέρης ευχαριστεί την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την υποστήριξη αυτής της ερευνητικής εργασίας.

5. Αναφορές

- [1] M. Oksanen and J. Hietanen, *Photoacoustic breakdown sound source in air*, *Ultrasonics*, 32(5), 1994
- [2] P.Pandey, R.K. Thareja, *Plume dynamics of laser produced air plasma*, *J. Phys.: Conference Series* 208 (2010)
- [3] S. Ghosh and K. Mahesh, *Numerical simulation of laser induced breakdown in air*, 46th AIAA Aero-space Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, Feb. 2008
- [4] J.G.Bolaños et al., *Laser-induced acoustic point source for accurate impulse response measurements within the audible bandwidth*, *J. Acoust. Soc. Am.* 133, EL221, 2014
- [5] J. Eskelinen et al., *Beamforming with a volumetric array of massless laser spark sources - Application in reflection tracking*, *J. Acoust. Soc. Am.*, 137, 2015
- [6] S. Delikaris-Manias et al., *Auralization of source radiation pattern synthesized with laser spark room responses*, *J. Audio Eng. Soc.*, 64, 2016
- [7] M. Oksanen et al., *Testing method for air ultrasonic transducers using a photoacoustic pulse source*, *Quantitative Nondestructive Evaluation*, 14, 1995
- [8] N.A. Tatlas et al., *Design and Performance of a Sigma Delta Digital Loudspeaker Array Prototype*, *J. Audio Eng. Soc.*, 57(1), 2009
- [9] Hamam, K. A., Gaabour, L. H., & Gamal, Y. E. (2017). Numerical modeling for investigating the optical breakdown threshold of laser-induced air plasmas at different laser characteristics. *Physics of Plasmas*, 24(7).
- [10] Gaabour, L. H., Gamal, Y. E., & Abdellatif, G. (2012). Numerical Investigation of the Plasma Formation in Distilled Water by Nd-YAG Laser Pulses of Different Duration. *Journal of Modern Physics*, 03(10), 1683-1691.
- [11] Qin, Qin, and Keith Attenborough. "Characteristics and Application of Laser-Generated Acoustic Shock Waves in Air." *Applied Acoustics*, vol. 65, no. 4, 2004, pp. 325–340.
- [12] Harilal, S.S. & Harilal, B. *Diagnostics of Laser Induced Spark in Air Using Fast ICCD Photography*, Internal Lab Report, University of California, San Diego Laser Plasma and Laser Matter Interactions Laboratory, 2002.
- [13] Chen, X., Bian, B. M., Shen, Z. H., Lu, J. and Ni, X. W. (2003), Equations of laser-induced plasma shock wave motion in air. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 38: 75-79.
- [14] K. Kaleris and J. Mourjopoulos, "Analysis and derivation of discrete-time PWM spectra", *Signal Processing*, ELSEVIER (corrections submitted after major revision), July 2018

[15] K. Kaleris and J. Mourjopoulos, "Dual-Band PWM for filterless class-D audio amplification", presented at the 144th International Pro Audio Convention, AES 2018, Milan, May 2018

[16] A. Floros and J. Mourjopoulos, "Distortion-Free 1-Bit PWM Coding for Digital Audio Signals," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007

**Μεθοδολογίες για το νανοσκοπικό δυναμικό
χαρακτηρισμό υλικών, με τη χρήση επιφανειακών
ακουστικών κυμάτων παραγόμενων από υπερβραχείς
παλμούς laser**

Κυριακή Κοσμά^{1α}, Ιωάννης Ορφανός^{1β}, Ευάγγελος
Κασελούρης^{1α}, Βασίλειος Δημητρίου^{1γ}, Ευθύμιος
Μπακαρέζος^{1δ}, Νικόλαος Βάινος^{2ε}, Μιχαήλ Ταταράκης^{1ε}
και Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{1ε}

¹Κέντρο Φυσικής Πλάσματος & Laser, Σχολή
Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τρία
Μοναστήρια, Τ.Κ. 74100, Ρέθυμνο

²Τμήμα Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τ.Κ.
26500 Ρίο Πάτρα / ^αΕπιστημονικός Συνεργάτης, ^β Μέλος
Ε.Τ.Ε.Π., ^γ Επίκουρος Καθηγητής, ^δ Αναπληρωτής
Καθηγητής, ^ε Καθηγητής

kosma@staff.teicrete.gr, yorphanos@staff.teicrete.gr,
vkas@chania.teicrete.gr, dimvasi@chania.teicrete.gr,
bakarezos@staff.teicrete.gr, vainos@upatras.gr,
m.tatarakis@chania.teicrete,
npapadogiannis@staff.teicrete.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τεχνικές μέτρησης πλήρους πεδίου, βασισμένες στην οπτική συμβολομετρία, για την ανάλυση και το χαρακτηρισμό Επιφανειακών Ακουστικών Κυμάτων (ΕΑΚ) υψηλών συχνοτήτων, παραγόμενων από υπερβραχείς παλμούς laser femtosecond χρονικής διάρκειας σε μεταλλικό φιλμ-υπόστρωμα. Διερευνάται επίσης αριθμητικά η δυναμική απόκριση του υλικού και παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων όσο αφορά τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ΕΑΚ.

Surface acoustic waves in Au thin films deposited on glass substrates, generated by fs radiation

ABSTRACT

In this paper we present full-field measurement techniques, based on optical interferometry, for the analysis and characterization of high-frequency Surface Acoustic Waves (SAWs), generated by femtosecond laser pulses on a metallic film deposited on glass substrate. The dynamic response of the material is also numerically investigated and satisfactory agreement between experimental and numerical results regarding the propagation characteristics of SAWs is observed.

Εισαγωγή

Η πρόοδος στους τομείς των προηγμένων υλικών, της τεχνολογίας των λεπτών υμενίων και της νανοτεχνολογίας οδήγησε στην ταυτόχρονη ανάπτυξη νέων, μη επεμβατικών τεχνικών χαρακτηρισμού της δομικής κατάστασης υλικών μικρο-και νανο-κλίμακα. Η δημιουργία Rayleigh EAK σε στερεά υλικά αποτελεί μία διαγνωστική μέθοδο μη καταστρεπτικής αξιολόγησης και έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την ανίχνευση ιδιοτήτων επιφανειών στερεών στόχων, καθώς και για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά των υποκείμενων στρωμάτων τους [1].

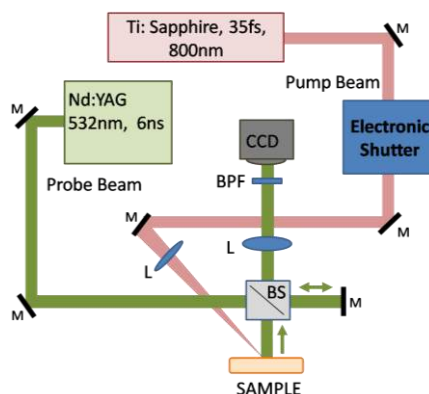
Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε το δυναμικό νανοσκοπικό χαρακτηρισμό EAK, που παράγονται από την εστίαση παλμών laser fs διάρκειας, σε λεπτά φιλμ χρυσού και ανιχνεύονται από παλμούς laser ns διάρκειας, σε μία οπτική διάταξη «άντλησης-ανίχνευσης». Η πειραματική διάταξη που αναπτύσσουμε βασίζεται στην ολογραφική απεικόνιση πλήρους πεδίου, για την παρακολούθηση με ειδικό λογισμικό ανάλυσης, τις επαγόμενες επιφανειακές παραμορφώσεις, οι οποίες δημιουργούνται λόγω της παρουσίας των ελαστικών κυμάτων. Διερευνώνται η επίδραση των παλμών laser με διάρκεια 35 fs και ενέργεια παλμού 8,3 J/cm² σε λεπτό μεταλλικό φιλμ χρυσού, που εναποτίθεται σε διηλεκτρικό υπόστρωμα. Ταυτόχρονα, επικυρώνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με αριθμητικά μοντέλα που συνδυάζουν το μοντέλο δύο θερμοκρασιών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

1. Πειραματική Μελέτη

Τα EAK δημιουργούνται και ανιχνεύονται με δύο διαφορετικές πηγές laser, συγκεκριμένα ένα femtosecond (fs) laser με παλμούς διάρκειας 35 fs στα 800 nm και μέγιστη ενέργεια ανά παλμό 1,5 mJ, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των επιφανειακών κυμάτων και ένα nanosecond (ns) laser με παλμούς διάρκειας 6 ns στα 532 nm και μέγιστη ενέργεια ανά παλμό 350 mJ, που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των επιφανειακών κυμάτων.

Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Η διάταξη του Σχήματος 1.1 ενσωματώνει τις δύο πηγές laser σε μία οπτική γεωμετρία «άντλησης-ανίχνευσης», με τον fs παλμό να αλληλεπιδρά πρώτα με το δείγμα (δέσμη άντλησης) για την δημιουργία του επιφανειακού κύματος, και τον ns παλμό (δέσμη ανίχνευσης) να χτυπά το δείγμα και να ανακλάται από αυτό, με μεταβλητή καθυστέρηση, η οποία φτάνει μέχρι και τα 200 ns σε σχέση με τη δέσμη άντλησης. Όπως δείχνεται στο Σχήμα 1.1, δέσμη ανίχνευσης (ns παλμοί) φτάνει στον διαχωριστή δέσμης (BS), και οι δύο δέσμες που προκύπτουν χτυπούν μία CCD κάμερα (Allied Vision - Pike F505B). Εκεί οι δέσμες συμβάλλουν, αφού έχουν ταξιδέψει στο σχηματιζόμενο συμβολόμετρο Michelson, που σχηματίζεται από από την επιφάνεια του δείγματος και το μεταλλικό κάτοπτρο M, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η CCD κάμερα καταγράφει τους κροσσούς συμβολής που προκύπτουν από την υπέρθεση των δύο δεσμών, οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την τροποποιημένη μεταλλική επιφάνεια λόγω των επιφανειακών κυμάτων που έχουν ωριότερα προκληθεί από την αλληλεπίδραση της fs δέσμης άντλησης με το λεπτό φιλμ. Η ακτινοβολία laser στα 532 nm που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των κροσσών συμβολής εξασφαλίζει υψηλή χωρική ανάλυση, η οποία είναι της τάξεως μερικών νανομέτρων. Για να φιλτραριστεί το ποσοστό της ακτινοβολίας διέγερσης που απομένει στα 800 nm μετά

την παραγωγή των επιφανειακών κυμάτων, τοποθετήθηκε κατάλληλο φίλτρο ζώνης διέλευσης (BPF) πριν από την κάμερα CCD, αποφεύγοντας έτσι πιθανή βλάβη του αισθητήρα λόγω της ισχυρής fs ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.5 Πειραματική διάταξη δημιουργίας επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) από fs παλμούς laser και ανίχνευσής τους από ns παλμούς laser. M- Κάτοπτρα, L-Φακός, BS-Διαχωριστής Δέσμης, BPF- Φίλτρο, CCD-Κάμερα

Για το συγχρονισμό της πηγής fs με την πηγή ns, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική χρονοκαθυστέρηση. Πραγματοποιήθηκε συγχρονισμός με την δημιουργία εφαρμογής αυτοματισμού η οποία λαμβάνει σήμα διέγερσης (trigger) από την πηγή fs και μέσω μιας γεννήτριας χρονοκαθυστέρησης (delay generator–SRSDG535) εισάγει τον επιθυμητό χρόνο ανάμεσα στην παραγωγή και την ανίχνευση των υπερήχων.

Η πηγή fs laser παρέχει 1000 παλμούς ανά δευτερόλεπτο (1kHz), ενώ μόνο ένας έπρεπε να επιλεγεί για την δημιουργία των ελαστικών κυμάτων. Η επιλογή των επιθυμητών παλμών της πηγής fs έγινε με την χρήση ηλεκτρονικού κλείστρου (ElectronicShutter–LS2-UNIBLITZ). Το ηλεκτρονικό κλείστρο έχει ελάχιστο χρόνο έκθεσης 1,5 msec, παράθυρο αρκετό για να ληφθεί ένας μόνο παλμός του fs laser. Η τροποποίηση αντίστοιχου παλμού έγινε από την γεννήτρια χρονοκαθυστέρησης.

Ο συγχρονισμός ξεκινάει από την πηγή fs laser με σήμα ακολουθίας 1 kHz το οποίο λαμβάνεται από κατάλληλη έξοδο του συστήματος laser και είναι συγχρονισμένο με την έξοδο των παλμών. Με το σήμα αυτό συγχρονίζεται η κάρτα NI-6014 ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και δημιουργεί δικό της σήμα που με τη σειρά του ξεκινάει συγχρονισμένα την ns πηγή laser. Τέλος, αφού εισαχθεί ο επιθυμητός χρόνος καθυστέρησης στην εφαρμογή ελέγχου, συγχρονίζονται το ηλεκτρονικό κλείστρο ώστε να εισαχθεί η κατάλληλη χρονική καθυστέρηση στους ns παλμούς και αντίστοιχα η κάμερα, για την καταγραφή του συμβολογράμματος της επιφάνειας. Η χρονοκαθυστέρηση ελέγχεται μέσω φωτοδιόδου που έχει χρόνο απόκρισης μερικά ps, χρόνο μικρότερο από αυτόν που θέλουμε να μετρήσουμε. Η φωτοδίοδος είναι συνδεδεμένη σε παλμογράφο ώστε να καταγράφεται η ακριβής άφιξη των δύο διαφορετικών δεσμών στην επιφάνεια του δείγματος. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται υπόψη τυχόν σφάλματα λόγω μικρομετατοπίσεων του συγχρονισμού των δύο πηγών laser.

Τα δείγματα που μετρήθηκαν αποτελούνται από γυάλινο υπόστρωμα (BK7, πάχος 1 mm), πάνω στο οποίο εναποτίθενται φιλμ χρυσού Au με πάχος 500 nm. Η εναπόθεση λεπτού φιλμ διεξήχθη με την τεχνική του ψεκασμού ιόντων.

2. Αριθμητική μοντελοποίηση

Έχουμε πρόσφατα αναπτύξει αριθμητικό μοντέλο ικανό να περιγράψει τη θερμομηχανική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της ns αλληλεπίδρασης λέιζερ και υλικού, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές φάσης από τη στερεά στη φάση πλάσματος [1-3]. Στην εργασία αυτή λαμβάνουμε υπόψη της αλληλεπίδρασης της ύλης με fs χρονικής διάρκειας παλμούς.

Η εναπόθεση ενέργειας από παλμούς λέιζερ femtosecond χρονικής διάρκειας στο στόχο μετάλλου-υποστρώματος περιγράφεται από το μοντέλο δύο θερμοκρασιών [4]. Για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας του λέιζερ με την ύλη, χρησιμοποιείται 1-Δ Λαγκρανζιανός κώδικας, όπου η εξέλιξη της συμπεριφοράς του υλικού περιγράφεται χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας για τα υποσυστήματα ηλεκτρονίων και φωνονίων. Οι υδροδυναμικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1/\rho)}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial m} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(P_i + P_e)}{\partial m} &= 0 \\ \frac{\partial E_e}{\partial t} + P_e \frac{\partial v}{\partial m} &= -\frac{\gamma_{ei}(T_e - T_i)}{\rho} + \frac{S(z, t)}{\rho} + \frac{\partial}{\partial m} \left(\rho \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial m} \right) \\ \frac{\partial E_i}{\partial t} + P_i \frac{\partial v}{\partial m} &= \frac{\gamma_{ei}(T_e - T_i)}{\rho} \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου m η μάζα, ρ η πυκνότητα, v η ταχύτητα, κ_e η θερμική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων, P_e και P_i οι πιέσεις των ηλεκτρονίων και των φωνονίων αντίστοιχα και οι E_e και E_i υποδηλώνουν την ειδική ενέργεια των ηλεκτρονίων και των φωνονίων αντίστοιχα. Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ηλεκτρονίων και φωνονίων περιγράφεται από το συντελεστή σύζευξης γ_{ei} . Επιπλέον, η απορρόφηση της ενέργειας των λέιζερ από τα ηλεκτρόνια λαμβάνεται υπόψη από τον όρο $S(z, t)$ πηγής θερμότητας, ενώ η εξάρτηση των κ_e και γ_{ei} από τη θερμοκρασία των ηλεκτρονίων T_e λαμβάνεται υπόψη από ένα μοντέλο ευρείας κλίμακας [5,6]. Αναφορικά με τις παραμέτρους του λέιζερ, η FWHM χρονική διάρκεια του παλμού, t_0 , είναι 35 fs, η FWHM ακτίνα της δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος, r_0 , είναι 17.5 μm, όπως μετρήθηκε πειραματικά και το μήκος κύματος λ είναι 800 nm. Το προφίλ της έντασης του λέιζερ έχει τη μορφή [7]:

$$S(z, t) = \frac{F_L(1 - R)}{\sqrt{\ln(16)} t_0 d} \exp\left(-\ln(16) \frac{t^2}{t_0^2}\right) \exp\left(-\frac{z}{d}\right) \quad (2.2)$$

όπου F_L ενέργεια του λέιζερ ανά μονάδα επιφάνειας, R η ανακλαστικότητα και d το βάθος απορρόφησης. Το σύστημα των εξισώσεων κλείνει με τη βοήθεια της ημι-εμπειρικής καταστατικής εξίσωσης δύο θερμοκρασιών για Au [7], όπου

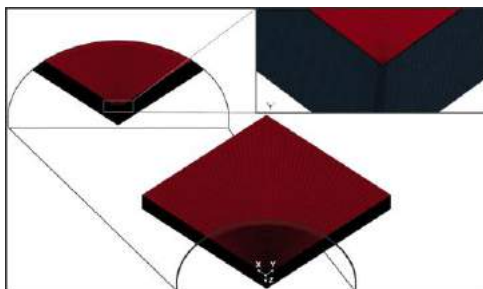
χρησιμοποιείται η εξίσωση των Thomas-Fermi για τη θερμική συνεισφορά των ηλεκτρονίων [8].

Όταν επιτυγχάνεται θερμική ισοροπία μεταξύ ηλεκτρονίων και φωνονίων τα αποτελέσματα της κατανομής πίεσης των φωνονίων από το TTM μοντέλο, παρέχουν τις αρχικές συνθήκες φόρτισης σε υπολογιστικό μοντέλο 3Δ που δημιουργήθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA [9]. Λόγω των υψηλών ενεργειών ανά μονάδα επιφάνειας του λέιζερ, που υπερβαίνουν το κατώφλι φωτοαποδόμησης του υλικού, η αριθμητική προσέγγιση, από αυτό το σημείο, λαμβάνει υπόψη μόνο τα φωτομηχανικά αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης του στόχου με το λέιζερ, αγνοώντας τα φωτοθερμικά. Οι υψηλές πιέσεις στο στόχο προκαλούν τη δημιουργία και διάδοση μηχανικών κυμάτων που διαδίδονται στο υλικό. Οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας, ορμής και ενέργειας που επιλύονται είναι οι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \mathbf{v} &= 0 \\ \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} &= \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial^2 k} + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial i} \left(\frac{\partial U_k}{\partial k} \right) - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \frac{\partial T}{\partial i} \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} &= \sigma_{ij} \nabla \mathbf{v} \end{aligned} \quad (2.3)$$

όπου U είναι η μετατόπιση, ρ η πυκνότητα, λ και μ οι συντελεστές Lamé, α_T ο συντελεστής θερμικής διαστολής, E η ενέργεια και σ_{ij} ο τανυστής των τάσεων. Η υδροδυναμική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά του στόχου λαμβάνονται υπόψη από μια καταστατική εξίσωση (αναλυτική Grüneisen) συζευγμένη με το Johnson-Cook μοντέλο περιγραφής της αντοχής υλικού [10,11]. Οι σταθερές υλικού για την καταστατική εξίσωση και το μοντέλο αντοχής υλικού λαμβάνονται υπόψη από τη βιβλιογραφία για το χρυσό [12].

Το 3Δ μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι τέταρτο-συμμετρικό. Οι διαστάσεις του στόχου είναι 1 mm x 1 mm x 100 μm, όπου το φιλμ χρυσού έχει πάχος 500 nm (με κόκκινο χρώμα, Σχήμα 2.1). Το Λαγκρανζιανό πλέγμα είναι δυνατό να προσαρμόζεται τοπικά ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης [1,2]. Επιπλέον, επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες συμμετρίας στις εσωτερικές επιφάνειες XZ και YZ, μη ανάκλασης στις εξωτερικές XZ και YZ και στην επιφάνεια βάσης του στόχου. Οι φυσικές και οπτικές ιδιότητες των χρυσού και BK7 γυαλιού λαμβάνονται υπόψη από βιβλιογραφικά δεδομένα [1-3].



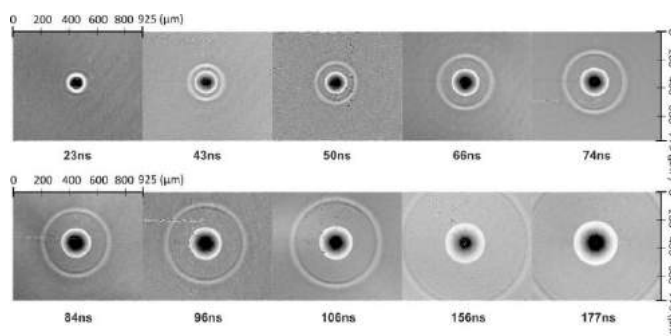
Σχήμα 2.1 Πλέγμα και οριακές συνθήκες του μοντέλου (στην κορυφή, zoomed όψη του επίκεντρου όπου εφαρμόζονται οι υψηλές πιέσεις).

Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες, τα δεδομένα για την κατανομή πίεσης των ιόντων κατά μήκος του βάρους του στόχου δίδονται ως αρχικές συνθήκες στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, από το μοντέλο TTM. Η χωρική ακτινική κατανομή της πίεσης δίνεται από [13]:

$$P(r) = P_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2r_0^2}\right) \quad (2.4)$$

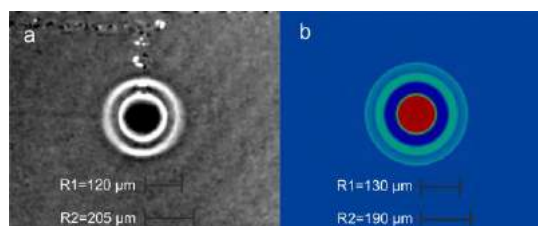
3. Αποτελέσματα

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα διαδιδόμενα κύματα σε λεπτό φιλμ πάχους 500 nm με υπόστρωμα BK7 γυαλιού, που διεγείρονται από ενέργεια του λέιζερ ανά μονάδα επιφάνειας 8,3 J/cm². Ανάλογα με το χρόνο καθυστέρησης περισσότεροι του ενός δαχτύλιοι μπορεί να γίνουν ορατοί και ονομάζονται SAW1 (εσωτερικό επιφανειακό ακουστικό κύμα) και SAW2 (εξωτερικό επιφανειακό ακουστικό κύμα).



Σχήμα 3.1 Ελαστικά κύματα σε χρυσό φιλμ πάχους 500-nm με υπόστρωμα BK7 γυαλί Au, για χρόνους καθυστέρησης ως 177 ns

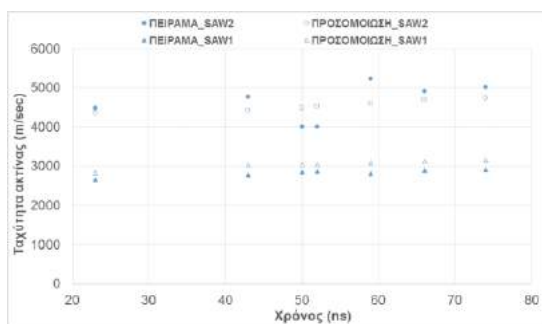
Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό πειραματικό (a) και αριθμητικό (b) αποτέλεσμα των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων τη χρονική στιγμή 43 ns. Μεταξύ των πειραματικών και των αριθμητικών αποτελεσμάτων παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία, αναφορικά με την ακτινική διαστολή των κυμάτων. Επιπλέον, τα πλάτη μετατόπισης των εσωτερικών και εξωτερικών κυμάτων στα 43 ns που εξάγονται από το πείραμα μετρήθηκαν ότι είναι 10 nm and 1,8 nm αντίστοιχα, ενώ η προσομοίωση τα υπολόγισε να είναι 13 nm and 2,3 nm, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2 Πειραματικό (a) και αριθμητικό (b) αποτέλεσμα της διάδοσης κυμάτων, για ενέργεια διέγερσης ανά μονάδα επιφάνειας 8,3 J/cm²

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται οι ταχύτητες ακτίνας για το πρώτο και το δεύτερο επιφανειακό ακουστικό κύμα (SAW1, SAW2 αντίστοιχα) που λαμβάνονται από τα

αναλυθέντα πειραματικά αποτελέσματα της συμβολομετρίας και τα αριθμητικά αποτελέσματα. Παρατηρείται ότι οι τιμές των ταχυτήτων αντιστοιχούν στην τυπική ταχύτητα των Rayleigh ελαστικών κυμάτων σε μεταλλικά φιλμ, η οποία κυμαίνεται από 2 έως 5 km/s [14], ενώ οι τιμές <3 km/s που βρέθηκαν για το πρώτο επιφανειακό κύμα σε χρυσό είναι επίσης σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία [15].



Σχήμα 3.3 Ταχύτητες των παραγόμενων SAW1 και SAW2 για ενέργεια διέγερσης ανά μονάδα επιφάνειας $8,3 \text{ J/cm}^2$ συναρτήσει του χρόνου

4. Συμπεράσματα

Η ολογραφική απεικόνιση πλήρους πεδίου σε συνδυασμό με τις αριθμητικές προσομοιώσεις αποτελεί ολοκληρωμένη τεχνική ικανή να μελετήσει την γέννηση και δημιουργία ακουστικών κυμάτων διεγερμένων από πηγή fs παλμικού λέιζερ. Ο συνδυασμός αυτός αποτελεί ανεκτίμητο εργαλείο που μπορεί να βρει πληθώρα εφαρμογών στον μη καταστροφικό έλεγχο και στο χαρακτηρισμό υλικών, καθώς και στην ανίχνευση πιθανών ατελειών του υλικού.

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «Συνέργεια ELI - LASERLAB Europe, HiPER & IPERION-CH.gr» (MIS 5002735) που εντάσσεται στη Δράση «Ενίσχυση των Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).

Η παρούσα ερευνητική εργασία υποστηρίχθηκε με υπολογιστικό χρόνο από το Εθνικό Δίκτυο Έρευνας & Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ) στην Εθνική Υπερ-Υπολογιστική Υποδομή -ARIS- στα πλαίσια του προγράμματος ID pr005024-LaMIPlaS.

5. Αναφορές

[1] V. Dimitriou, E. Kaselouris, Y. Orphanos, M. Bakarezos, N. Vainos, I. Nikolos, M. Tatarakis, N. A. Papadogiannis «The thermo-mechanical behavior of thin metal films under nanosecond laser pulse excitation above the thermoelastic regime» Applied Physics A **118**, pp 739-748 (2014)

- [2] Y. Orphanos, V. Dimitriou, E. Kaselouris, E. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis, N.A. Papadogiannis, «An integrated method for material properties characterization based on pulsed laser generated surface acoustic waves» *Microelectronic Engineering* **112**, pp 249-254 (2013)
- [3] V. Dimitriou, E. Kaselouris, Y. Orphanos, M. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis, N.A. Papadogiannis, «Three dimensional transient behavior of thin films surface under pulsed laser excitation» *Applied Physics Letters* **103**, pp 114104 (2013)
- [4] S. Anisimov, B. L. Kapeliovich, T. L. Perelman, «Electron Emission from Metal Surfaces Exposed to Ultra-Short Laser Pulses» *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **39**, pp 375 (1974)
- [5] M.E. Povarnitsyn, N.E. Andreev, P.R. Levashov, K.V. Khishchenko, O.N. Rosmej, «Dynamics of thin metal foils irradiated by moderate-contrast high-intensity laser beams» *Physics of Plasmas* **19**, pp 023110 (2012)
- [6] M.E. Povarnitsyn, N.E. Andreev, E.M. Apfelbaum, T.E. Itina, K.V. Khishchenko, O.F. Kostenko, P.R. Levashov, M.E. Veysman, «A wide-range model for simulation of pump-probe experiments with metals» *Applied Surface Science* **258**, pp 9480-9483 (2012)
- [7] M.E. Povarnitsyn, K.V. Khishchenko, P.R. Levashov, «Phase transitions in femtosecond laser ablation» *Applied Surface Science* **255**, pp 5120-5124 (2009)
- [8] O.P. Shemyakin, P.R. Levashov, L.R. Obruchkova, K.V. Khishchenko, «Thermal contribution to thermodynamic functions in the Thomas-Fermi model» *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **43**, pp 335003 (2010)
- [9] J. O Hallquist, *LS-Dyna Theory manual*, 2006
- [10] K. Nagayama, *Introduction to the Grüneisen Equation of State and Shock Thermodynamics*, 1st Kindle Edition ed. (2011)
- [11] G.R. Johnson, W.H. Cook, «Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures» *Engineering Fracture Mechanics* **21**, pp 31-48 (1985)
- [12] D. Steinberg, *Equation of state and strength properties of selected materials*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, (1996)
- [13] A.F.M. Arif, «Effect of input variability on the quality of laser shock processing», *Journal of Mechanical Science and Technology* **23**, pp 2603 (2009)
- [14] S.-Y. Zhang, L. Guo, A. Hu, Q.-S. Gao, Z.-N. Lu, «Temperature dependence of surface acoustic wave velocity in thin metal films», *Thin Solid Films* **202**, pp 171-179 (1991)
- [15] D.V. Lioubtchenko, T.A. Briantseva, I.A. Markov, «Surface acoustic wave monitoring of thin Au film deposition on GaAs surface», *Materials Physics and Mechanics* **12**, pp 64-75 (2011)

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6 Μουσική Ακουστική

Ακουστική Συμπεριφορά Ανακαινισμένων Παλαιών Κιθαρών και Αντιγράφων τους. Συγκρίσεις

Διονύσιος Κατερέλος Δρ. Μηχ/γος Μηχ/κος d.katerelos@gmail. com	Αναστάσιος Κόκκινος Δρ. Μηχ/γος Μηχ/κος akokkin@teiiion. gr	Στυλιανός Ανδρέου Κατ/στής Μουσικών Οργάνων stellouin90@gmail. com	Παναγής Σκλάβος Κατ/στής Μουσικών Οργάνων sklavos_p@yahoo. gr
---	--	---	--

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μουσικά όργανα πρέπει να ανιχνεύονται, όπου βρίσκονται και να διατηρούνται ως σημαντικά στοιχεία της παγκόσμιας υλικής και άυλης πολιτιστικής κληρονομιάς. Το θέμα του παρόντος αφορά δυο κιθάρες κατασκευασμένες το 19ο αι, οι οποίες σώζονται σε ιδιωτικές συλλογές στην Κεφαλονιά. Στο παρόν, θα παρουσιαστούν και θα περιγραφούν με λεπτομέρειες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την αναπαλαίωση των παλαιών αυτών μουσικών οργάνων. Έπειτα θα παρουσιασθεί η κατασκευή πιστών αντιγράφων, τα οποία παράγουν παρόμοια αν όχι την ίδια ποιότητα ήχου με τα πρωτότυπα όργανα.

ABSTRACT

Musical instruments must be traced, where they are and are preserved as important elements of the world's material and intangible cultural heritage. The subject here concerns two guitars made in the 19th century, which are preserved in private collections in Kefalonia. Here, the procedures followed for the restoration of these old musical instruments will be presented and described in detail. Next, the production of copies, which produce similar, if not the same sound quality as the original instruments, will be presented.

Εισαγωγή

Τα μουσικά όργανα πρέπει να ανιχνεύονται, όπου βρίσκονται και να διατηρούνται ως σημαντικά στοιχεία της παγκόσμιας υλικής και άυλης πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι περιοχές, στις οποίες αναμίχθηκαν διαφορετικοί πολιτισμοί και γέννησαν ένα νέο και ιδιαίτερο, ενέχουν μεγάλο ενδιαφέρον με την παραπάνω έννοια. Το νησί της Κεφαλονιάς είναι ένας από αυτούς τους τόπους, όπου η κουλτούρα της Δυτικής Ευρώπης ήρθε σε επαφή και αλληλοεπηρεάστηκε με τον Ανατολικό πολιτισμό, αλλά και τοπικές παραδόσεις. Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της Κεφαλληνιακής μουσικής είναι η γέννηση κατηγοριών τοπικών παραδοσιακών τραγουδιών, των γνωστών ως «αριέτα» και «καντάδα». Ενώ στην πρώτη κατηγορία τα τραγούδια δε συνοδεύονταν

από μουσικά όργανα, στη δεύτερη είθιστο να συνοδεύονται από κυρίως δύο όργανα, το μαντολίνο και την κιθάρα. Έτσι, η κιθάρα κατέστη ιδιαίτερα σημαντική για τη μουσική έκφραση του λαού της Κεφαλονιάς.

Η παρούσα εργασία αφορά την ανακατασκευή, μελέτη και αντιγραφή (κατασκευή ρέπλικας) για δυο κιθάρες κατασκευασμένες το 19^ο αι, οι οποίες σώζονται σε ιδιωτικές συλλογές στην Κεφαλονιά. Η πρώτη είναι μια ακουστική κιθάρα κατασκευασμένη στην Κατάνια της Ιταλίας, στα τέλη του 19ου αι από την εταιρία των αδελφών Cassela (Mario και Gaetano) όπως γράφεται στην ετικέτα του οργάνου. Η δεύτερη είναι μια κιθάρα – λύρα (κιθάρα με σχήμα αρχαιοελληνικής λύρας) που κατασκευάστηκε από το φημισμένο Έλληνα οργανοποιό Δημήτριο Μούρτζινο το 1896 και είναι, πιθανώς, το μόνο δείγμα αυτού του τύπου οργάνου, που κατασκευάστηκε και μπορεί να βρεθεί στην Ελλάδα. [1-6]

1. Αναπαλαίωση μουσικών οργάνων

Στο παρόν, θα παρουσιαστούν και θα περιγραφούν με λεπτομέρειες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την αναπαλαίωση των παλαιών οργάνων. Στην αρχή, αναλύθηκε μέσω παρατήρησης η παρούσα λειτουργική κατάσταση των οργάνων και εντοπίστηκαν τα μέρη αυτών που έπρεπε να επιδιορθωθούν. Κατόπιν, αναγνωρίστηκαν τα αυθεντικά υλικά κατασκευής, ειδικά για τα μέρη που θα ανακατασκευάζονταν ή αναπαλαιώνονταν. Το επόμενο βήμα ήταν η αποσυναρμολόγηση των οργάνων και η αντικατάσταση ή/και αναπαλαίωση των κατεστραμμένων τμημάτων. Τέλος, τα όργανα συναρμολογήθηκαν και πάλι.

1.1 Κιθάρα M. Fratelli & G. Casella

Η πρώτη επαφή με την κιθάρα έγινε το 2014 στο τμήμα κατασκευής του τμήματος τεχνολογίας ήχου και μουσικών οργάνων. Η κιθάρα με βάση μαρτυρίες, ανήκε σε έναν βιολιστή στη Σάμη Κεφαλονιάς (1898). Στο πάνω μέρος της ετικέτας αναγράφεται ο τίτλος «L' internazionale premiata fabbrica di strumenti musicali a corda ed accessori» που σημαίνει « Το πρώτο διεθνές εργοστάσιο σε είδη μουσικών οργάνων και αξεσουάρ».



Εικόνα 1.1 : Επεξήγηση ετικέτας κιθάρας

Δεξιά και αριστερά στα άκρα της ετικέτας αναφέρονται τα είδη των μουσικών οργάνων τα οποία κατασκευάζονταν στο εργαστήριο των δύο κατασκευαστών. Στο

κάτω μέρος της ετικέτας αναγράφεται η οδός στην οποία στεγαζόταν το εν λόγω εργαστήριο κατασκευής μουσικών οργάνων.

Παρατηρώντας κάτω από τον τίτλο της ετικέτας, δεξιά και αριστερά από τα ονόματα των κατασκευαστών είναι τυπωμένα τα 6 βραβεία τα οποία έχουν δοθεί στους δυο κατασκευαστές. Ένας από τους τίτλους του βραβείου φέρει το όνομα «Grand Prix» το οποίο προφανώς δόθηκε στους δύο κατασκευαστές από μια γαλλική έκθεση μουσικών οργάνων η οποία διεξάχθηκε το 1849.

Μετά την άντληση πληροφοριών για τους κατασκευαστές ξεκίνησε η καταγραφή των ζημιών της κιθάρας και έπειτα ξεκίνησε η αποσυναρμολόγηση του μουσικού οργάνου.

Το πρώτο μέρος το οποίο αφαιρέθηκε από την κιθάρα, ήταν το μπράτσο που ήταν εφαρμοσμένο στο σώμα της κιθάρας με ένα τρόπο που δε βλέπουμε πλέον συχνά σε ακουστικές κιθάρες. Η αποσυναρμολόγηση σε μια τόσο παλιά κατασκευή έγινε με θέρμανση και αποκόλληση λόγω του συστατικού συγκόλλησης «ψαρόκολλα», χαρακτηριστικό συστατικό των κατασκευαστών της εποχής.



Εικόνα 1.2: Το μπράτσο και το καπάκι της κιθάρας πριν και μετά τον καθαρισμό

Έπειτα αποσυναρμολογήθηκαν και τα υπόλοιπα μέρη της κιθάρας και αφού αφαιρέθηκαν ίχνη κόλλας και ακαθαρσίες, αποκαταστάθηκαν όλες οι βλάβες της κιθάρας χρησιμοποιώντας υλικά (έλατο Picea Excels, παλίσανδρο, έβενο, φλαμούρι) οργανοποιίας της εποχής κατασκευής της. [7-9]

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, έπρεπε να ληφθούν ιδιαίτερες αποφάσεις, ώστε να ανιχνευθούν οι μέθοδοι των παλαιών οργανοποιών, οι οποίες πιθανόν διαφέρουν από τις νεότερες μεθόδους και να υπάρξει συμμόρφωση με τις παλαιές. Επίσης, έγινε προσπάθεια όπου ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα ίδια κομμάτια ξύλου της κιθάρας κατά την ανακατασκευή. Όπου αυτό δεν ήταν δυνατό, χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχο υλικό (ξύλο), με παρόμοιες ιδιότητες. Κατά την αποκατάσταση της βαφής χρησιμοποιήθηκε τεχνική βαφής, ίδιας με αυτή της εποχής κατασκευής της κιθάρας (βερνίκι μπάλας).

1.2 Κιθαρολύρα

Στην περίπτωση της κιθάρας-λύρας ακολουθήθηκαν οι παραδοσιακές διαδικασίες των Ελλήνων κατασκευαστών κιθαρών.

Στο συγκεκριμένο μουσικό όργανο, το μοναδικό πρόβλημα που χρειαζόταν επιδιόρθωση εντοπίστηκε στον καβαλάρη, ο οποίος είχε αποκολληθεί λόγω της τάσης που προκαλούν οι χορδές και εξαιτίας των περιβαλλοντικών μεταβολών στη διάρκεια των χρόνων. Το μουσικό όργανο αποσυναρμολογήθηκε στο κάτω μέρος του, προστέθηκαν πολύ μικρά κομμάτια ίδιου ξύλου (ως προς το είδος) και συναρμολογήθηκε χρησιμοποιώντας την ίδια κόλλα συγκόλλησης.

2. Σχεδιασμός και κατασκευή αντιγράφου κιθάρας και κιθαρολύρας

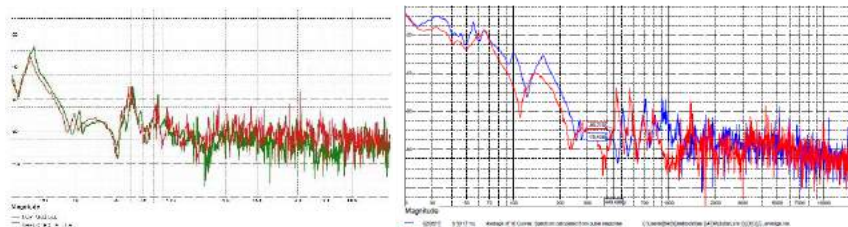
Τα δύο μουσικά όργανα μετρήθηκαν με μετρητικά όργανα μεγάλης ακρίβειας και αφού δημιουργήθηκαν κατασκευαστικά σχέδια σε πρόγραμμα Η/Υ (AutoCad), εκτυπώθηκαν τα σχέδια σε κλίμακα 1:1 προς κατασκευή των αντιγράφων μουσικών οργάνων.

Τα υλικά κατασκευής ήταν αντίστοιχα με αυτά του αρχικού μουσικού οργάνου κάθε φορά, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα υπολογισμού με μηχανικές και ακουστικές δοκιμές των μηχανολογικών χαρακτηριστικών των μουσικών οργάνων, λόγω γήρανσης των υλικών και ανισοτροπίας του ξύλου ως δομικό υλικό.

Μεγάλη σημασία δόθηκε στην κατασκευή του καπακιού και των δύο οργάνων, εφόσον η βιβλιογραφία και η εμπειρία της ερευνητικής ομάδας έχει δείξει ότι παίζει πρωταρχικό ρόλο στην ποιότητα του ήχου ενός μουσικού οργάνου. [10, 11]

3. Σύγκριση πρωτότυπου και αντιγράφου μουσικού οργάνου

Όταν ολοκληρώθηκαν οι διαδικασίες αναπαλαίωσης των παλαιών οργάνων και κατασκευής των πιστών αντιγράφων, τα όργανα αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας κατάλληλα συστήματα διαθέσιμα στο Εργαστήριο. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα VIAS (Versatile Instruments Analysis System) το οποίο διατίθεται από το Ινστιτούτο Μουσικής Ακουστικής του Πανεπιστημίου Μουσικής και Παραστατικών Τεχνών της Βιέννης. Με το σύστημα αυτό είναι εφικτό να μετρηθούν οι καμπύλες εμπέδησης των οργάνων καθώς και να κατασκευαστούν τα φασματογραφήματα αυτών. [12]



Εικόνα 3.1: Σύγκριση εμπέδησης κιθαρών και κιθαρολυρών.

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στα όργανα συγκρίθηκαν ανά ζεύγος πρωτότυπου – πιστού αντιγράφου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.

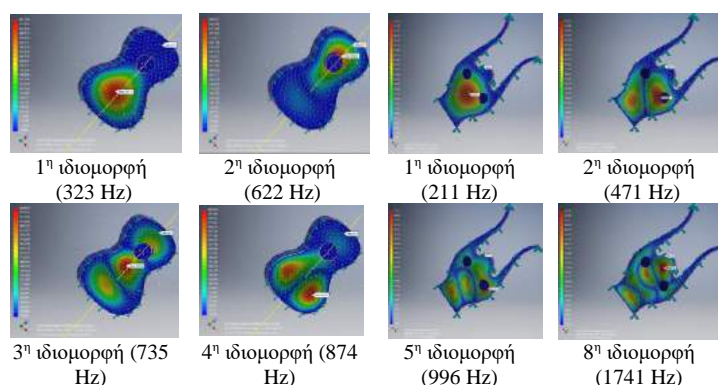
Ταυτόχρονα, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, των δύο κιθαρών, προκειμένου να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ταλάντωσης, τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στην εικόνα 3.2.

Στην εικόνα 3.3 που ακολουθεί φαίνονται τα φασματογραφήματα που προκύπτουν από το σύστημα VIAS που αναφέρθηκε παραπάνω, για τα δύο μουσικά όργανα σε σύγκριση με τα πιστά αντίγραφα τους.

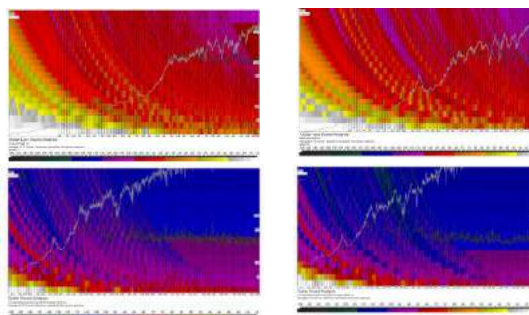
Το σύστημα VIAS αποτελείται από ένα κρουστικό σφυρί με ενσωματωμένο αισθητήρα δύναμης, ένα επιταχυνσιόμετρο 0.2 γρ. και έναν ενισχυτή σήματος-κάρτα

ήχου ο οποίος συνδέεται με Η/Υ και οδηγείται από κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας σήματος (ROGA Plug.n.DAQ USB charge amplifier).

Με βάση την ανισοτροπία των υλικών κατασκευής της κιθάρας, το εγχείρημα της κατασκευής αντιγράφων μουσικών οργάνων είναι αρκετά πολύπλοκο. Το συγκεκριμένο σύστημα, μας δίνει τη δυνατότητα να καταγράψουμε τη συμπεριφορά ενός συστήματος ταλάντωσης, όπως μιας κιθάρας ή ενός οποιουδήποτε έγχορδου ακουστικού μουσικού οργάνου, η οποία είναι μοναδική για κάθε μουσικό όργανο. Έχοντας την καμπύλη της εικόνας 3.1 μπορούμε να συγκρίνουμε δύο ή περισσότερα μουσικά όργανα και να πιστοποιήσουμε ποιοτικά, τις ομοιότητες και τις διαφορές αυτών.



Εικόνα 3.2. Ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές ταλάντωσης μέσω μοντελοποίησης κιθάρας και κιθαρολύρας με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 3.3. Καμπύλες εμπέδησης για την κιθαρολύρα και το αντίγραφό της (πάνω αριστερά και δεξιά αντίστοιχα) και για την κιθάρα ομοίως.

Η σύγκριση έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα, έτσι ώστε να μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το πιστό αντίγραφο είναι όντως πιστό αντίγραφο του πρωτοτύπου. Το τελικό αυτό συμπέρασμα είναι σημαντικό, διότι έτσι είναι εφικτό να διατηρηθούν τα πρωτότυπα μουσικά όργανα και ταυτόχρονα να μη στερείται ο ενδιαφερόμενος μελετητής ή/και ακροατής της δυνατότητας να μετέχει στο σκοπό για τον οποίο

κατασκευάστηκαν πρωταρχικά, ο οποίος δεν είναι άλλος από το να παράγουν μουσική. Η χρήση των πιστών αντιγράφων δε μειώνει το τελικό ηχητικό μουσικό αποτέλεσμα.

4. Αναφορές

- [1] Bonamini, Gabriele, “The Assessment and Functional Rehabilitation of Historic Wooden Musical Instruments”, The “Reference Voice” Method and its Application to the Grand Piano”, *Journal of Cultural Heritage*, **Vol. 135**, pp. 5149-5153, (2012)
- [2] M. L. West. *Ancient Greek Music*. Oxford, England: Oxford University Press, ISBN 0-19-814975-1, (1992).
- [3] Wade, Graham A *Concise History of the Classic Guitar*. Mel Bay. ISBN 078664978X, (2001).
- [4] Scheherezade Qassim Hassan; Morris, R. Conway; Baily, John; During, Jean Sadie, Stanley; Tyrrell, John, eds. *The New Grove Dictionary of Music and Musicians*. London: Macmillan. **xxv (2 ed.)**, pp. 61–62, (2001).
- [5] Ray, John, García, Aarón, Manjón, Antonio and Holt Thomas, “A Review of Basic Procedures for an Organological Examination of Plucked-String Instruments”, *Journal of Cultural Heritage*, **Vol 27**, Supplement, pages S1-S130, (2017)
- [6] Pinto, L., Roncella, R. and Forlani, G., “Photogrammetric Survey of Ancient Musical Instruments”, in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. **Vol. XXXVII**. Part B5, pp. 309-314, Beijing (2008)
- [7] Hideo Kamimoto, *Complete Guitar Repair*, Oak Publications, ISBN: 978-1-78323-518-6, (2014)
- [8] Schofield, Mark, “How strong is your glue?” *Fine Woodworking Magazine*, **V. 192**, p. 36–40, (2007)
- [9] "How Shellac Is Manufactured". *The Mail* (Adelaide, SA: 1912–1954). 18 December 1937. (2014)
- [10] Le Conte, S., Le Moynes, S., Ollivier, F., Vaiedelich, S., “Using mechanical modelling and experimentation for the conservation of musical instruments”, *Journal of Cultural Heritage*, **Vol. 13S**, pp. S161-S164 (2012)
- [11] Voichita Bucur, *Handbook of Materials for String Musical Instruments*, Springer, ISBN: 978-3-319-32078-6, p. 53, (2016)
- [12] Acoustic Rating Technology for instrument makers G.m.b.H. www.artim.at

Ηχητική Σύνθεση Βασισμένη σε Κοινωνική Συμπεριφορά στο Ακουστικό Πεδίο

Ανδρέας Απέργης
Ελληνικό Ανοικτό
Πανεπιστήμιο
Πάτρα
e-mail:
std083780@ac.eap.gr

Μάξιμος Καλιακάτσος –
Παπακώστας
Ερευνητικό Κέντρο Αθηνά
Αθήνα
e-mail: maximos@ilsp.gr

Ανδρέας Φλώρος
Αναπλ. Καθηγητής
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Κέρκυρα
e-mail:
floros@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία προσεγγίζει το ζήτημα της ηχητικής σύνθεσης μέσω της μοντελοποίησης της κοινωνικής συμπεριφοράς ατόμων / πρακτόρων στο ακουστικό πεδίο. Ο συνολικός αλγόριθμος αποτελεί την επέκταση του ευρύτερα γνωστού στο χώρο της τεχνητής νοημοσύνης μοντέλου των boids, το οποίο ορίζει το πλαίσιο της κοινωνικής αλληλεπίδρασης των μελών ενός σμήνους εντός ενός εικονικού χώρου, με βασικό στόχο την προσομοίωση της ομαδικής κίνησης ζωντανών οργανισμών, όπως η κίνηση π.χ. σμήνους πτηνών και κοπαδιού ψαριών. Μέσω της επέκτασης της προσέγγισης αυτής στο ακουστικό πεδίο, ορίζονται τα sonoids, των οποίων η αλληλεπίδραση στηρίζεται σε ερεθίσματα τα οποία παράγονται, μεταδίδονται και τελικά λαμβάνονται από τα άτομα αυτά αποκλειστικά μέσω του ακουστικού καναλιού.

Sound Synthesis Based on Social Behaviour in the Acoustic Domain

ABSTRACT

This work approaches the issue of sound synthesis by modelling the social behaviour of individuals / agents in the acoustic domain. The overall algorithm is the extension of the well-known artificial intelligence boids' model, which defines the context of the social interaction of the members of a cluster within a virtual space, with the basic objective of simulating the collective movement of living organisms, e.g. bird flocks and fish flocks. By extending this approach to the acoustic domain, the sonoids are defined, whose interaction is based on stimuli that are produced, transmitted and eventually received by these individuals exclusively through the acoustic channel.

Εισαγωγή

Η Τεχνητή Νοημοσύνη επέτρεψε την εξερεύνηση ενδιαφερουσών αναμειξέων Τέχνης και Τεχνολογίας με τη χρήση διαδραστικών μέσων. Η κατηγορία των αλγορίθμων Νοημοσύνης Σμήνους μοντελοποιεί την συλλογική ευφυή συμπεριφορά που επιδεικνύει ένα πλήθος οντοτήτων όπως τα σμήνη πτηνών και τα κοπάδια ψαριών στην φύση και σύντομα βρήκε εφαρμογή στην υπολογιστική δημιουργικότητα κυρίως λόγω της ύπαρξης τόσο τυχαιότητας όσο και εσωτερικής δομής. Ένας ευρέως διαδεδομένος αλγόριθμος της κατηγορίας είναι το μοντέλο Boids (bird-oids) του C. Reynolds [1] με αρχική εφαρμογή στις Τέχνες της Εικόνας και μετέπειτα εξάπλωση στις Τέχνες του Ήχου ως βοηθητικό εργαλείο παραγωγής συμβολικής μουσικής πληροφορίας [2,3,4], ηχητικής σύνθεσης [5,6] και χωροθέτησης ηχητικών προβολών [7]. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια επέκταση του μοντέλου Boids στο Ακουστικό Πεδίο ορίζοντας το μοντέλο των υπολογιστικών οντοτήτων με ονομασία Sonoids (sonic-oids) και τις ιδιότητες εκπομπής, λήψης και επεξεργασίας ηχητικού σήματος με σκοπό τόσο την εννοιολογική προσέγγιση του αρχικού μοντέλου στην φύση των επικείμενων ηχοκεντρικών εφαρμογών (ηχητική σύνθεση) όσο και τη ηχητικά πληροφορημένη διάδραση του χρήστη με τις εφαρμογές αυτές.

1. Παρουσίαση Αλγορίθμων Boids και Sonoids

1.1 Boids

Ο Reynolds εφοδιάζει τα Boids με την ικανότητα να ενεργούν κινητικά σε όλη την ελεύθερη έκταση του περιβάλλοντός τους, ενώ παράλληλα τα περιορίζει στο να αντιλαμβάνονται μόνο ένα μέρος της έκτασης αυτής, την γειτονιά τους. Με αυτόν τον περιορισμό εξασφαλίζεται λειτουργικά η τοπικότητα της συμπεριφοράς του ατόμου, που ο Reynolds αποδίδει στην αισθητηριακή αντίληψη του περιβάλλοντος κυρίως μέσω της όρασης. Εντούτοις, το μοντέλο των Boids δεν προσομοιώνει κάποια συγκεκριμένη αίσθηση των ατόμων (όραση ή ακοή), αλλά τους παρέχει έτοιμη την πληροφορία που θα εξήγαγαν αν ήταν εφοδιασμένα με *αντιληπτικούς* και *γνωστικούς* μηχανισμούς. Η πληροφορία αυτή αποτελείται από την θέση και την ταχύτητα (συμπεριλαμβανομένου και του προσανατολισμού) κάθε άλλου ατόμου στο περιβάλλον και γίνεται διαθέσιμη στα άτομα μέσω μιας διαμοιραζόμενης βάσης δεδομένων. Έστω \vec{p}_i και \vec{v}_i είναι αντίστοιχα η θέση και η ταχύτητα του boid “i” στο τρέχον βήμα του αλγορίθμου, τότε στο επόμενο βήμα η θέση του και η ταχύτητά του αντίστοιχα είναι:

$$\vec{p}_i' = \vec{p}_i + \vec{v}_i \quad (1.1)$$

$$\vec{v}_i' = \vec{v}_i + \vec{a}_i \quad (1.2)$$

όπου \vec{a}_i είναι το συγκεντρωτικό διάνυσμα των δυνάμεων που ασκούνται στο boid από την επίδραση των κανόνων συντονιστικής συμπεριφοράς. Ο Reynolds ορίζει τρεις βασικούς κανόνες: (α) **Κανόνας Διαχωρισμού** για την αποφυγή συγκρούσεων με γειτονικά άτομα, (β) **Κανόνας Ευθυγράμμισης** για τη σύνταξη με το μέσο προσανατολισμό των γειτονικών ατόμων, (γ) **Κανόνας Συνεκτικότητας** για τη σύνταξη με τη μέση χωρική κατανομή των γειτονικών ατόμων.

Αν η συμβολή κάθε κανόνα είναι τα διανύσματα \vec{a}_s , \vec{a}_a , \vec{a}_c αντίστοιχα, τότε:

$$\vec{a}_i = \vec{a}s_i + \vec{a}a_i + \vec{a}c_i = \vec{v}s_i + \vec{v}a_i + \vec{v}c_i - 3 \cdot \vec{v}_i \quad (1.3)$$

Αν d_{min} η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ δύο Boids, d_{nei} η ακτίνα της γειτονιάς του Boid “ i ” και $j \in C$, όπου C είναι το σύνολο N στοιχείων, με στοιχεία τα Boids για τα οποία ισχύει $\|\vec{p}_i - \vec{p}_j\| < d_{min}$ για τον πρώτο κανόνα και $\|\vec{p}_i - \vec{p}_j\| < d_{nei}$ για τον δεύτερο και τρίτο κανόνα, με $j \neq i$, τότε:

$$\vec{v}s_i = \frac{1}{N} \sum_{j \in C} \vec{p}_i - \vec{p}_j \quad (1.4)$$

$$\vec{v}a_i = \frac{1}{N} \sum_{j \in C} \vec{v}_j \quad (1.5)$$

$$\vec{v}c_i = \frac{1}{N} \sum_{j \in C} \vec{p}_j \quad (1.6)$$

1.2 Sonoids

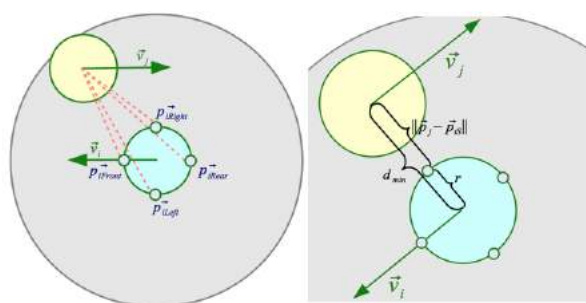
Τα Sonoids, προσδοκώντας να επιδείξουν ανάλογη συλλογική συμπεριφορά με τα Boids, οφείλουν κατ’ αρχάς να εφοδιαστούν με την ικανότητα να ενεργούν κινητικά σε όλη την ελεύθερη έκταση του περιβάλλοντός τους κληρονομώντας από τα τελευταία τις ιδιότητες της θέσης και της μεταβολής αυτής. Επιπλέον, οφείλουν να περιορίζονται στην αντίληψη της γειτονιάς τους όπου και συντάσσονται με τους τρεις κανόνες συντονιστικής συμπεριφοράς. Πρωταρχική διαφοροποίησή τους από τα Boids, επιλέγεται να είναι ο τρόπος αντίληψης του περιβάλλοντος, που είναι μεν αισθητηριακός αλλά βασίζεται αποκλειστικά στη αίσθηση της ακοής. Για την προσομοίωσή της κρίνεται απαραίτητο να εφοδιαστεί το Sonoid με τρεις μηχανισμούς: (α) **Ηχοπαραγωγικός Μηχανισμός** για την εκπομπή ηχητικού σήματος ώστε να γίνεται αντιληπτό από τα γειτονικά άτομα, (β) **Αντιληπτικός Μηχανισμός** για την λήψη του ηχητικού σήματος ώστε να αντιλαμβάνεται τα γειτονικά άτομα και την ανάλυσή του, (γ) **Γνωστικός Μηχανισμός** για την επεξεργασία του αναλυμένου ηχητικού σήματος και την εξαγωγή πληροφορίας θέσης, προσανατολισμού και ταχύτητας των γειτονικών ατόμων.

Η ιδιαιτερότητα στη μοντελοποίηση των Sonoids έγκειται στους διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης τους στη διαμοιραζόμενη βάση δεδομένων ανά Μηχανισμό σε λειτουργία. Ενώ τους δίνεται το δικαίωμα ανάκτησης πληροφορίας θέσης των άλλων Sonoids για την πραγματοποίηση του ελέγχου γειτνίασης κατά τη λειτουργία του Αντιληπτικού Μηχανισμού, το δικαίωμα αυτό τους αφαιρείται όταν πλέον ο Γνωστικός Μηχανισμός τίθεται σε λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο το νεοεισαχθέν στο μοντέλο δεδομένο, αυτό του ηχητικού σήματος, προσαρμόζεται στις γεωμετρικές αναλογίες του ήδη υπάρχοντος δεδομένου θέσης, και είναι η επεξεργασία του πρώτου εκείνη που καθορίζει την ενημέρωση του τελευταίου και επεκτείνει το αρχικό μοντέλο. Θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις που συνδέουν την ένταση I του ηχητικού σήματος με το πλάτος του A και την χωρική απόσταση d από την πηγή:

$$I \propto A^2 \quad (1.7)$$

$$I \propto \frac{1}{d^2} \quad (1.8)$$

Οι κανόνες παραμετροποίησης του σήματος που εκπέμπεται από ένα Sonoid “*i*” συνθέτουν το πρωτόκολλο επικοινωνίας τους και κατ’ επέκταση υλοποιούν τον Ηχοπαραγωγικό Μηχανισμό τους: (1) **Μορφή Σήματος:** ημιτονικό $x_i(n) = A_0 \cos(\omega_i n T_s)$, ώστε το φάσμα συχνοτήτων του να αποτελείται από μία συχνότητα, όπου T_s η περίοδος δειγματοληψίας του σήματος. (2) **Συχνότητα Σήματος:** διακριτή συχνότητα ω_i για κάθε Sonoid την ίδια χρονική στιγμή, ώστε να διακρίνεται από ένα Sonoid που αντιλαμβάνεται ταυτόχρονα και άλλα. (3) **Πλάτος Σήματος:** A_0 σταθερό στον χρόνο, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή πληροφορίας θέσης μέσω της απόστασης. (4) **Σημείο Εκπομπής Σήματος:** από το κέντρο μάζας του Sonoid \vec{p}_i με παγκρατευθυντικό διασκορπισμό.



Σχήμα 1.1 Αντιληπτικός Μηχανισμός

Ο **Αντιληπτικός Μηχανισμός** ενός Sonoid “*i*” αποτελείται από τέσσερις αισθητικούς υποδοχείς που κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιφέρεια του σώματός του στα σημεία \vec{p}_{iFront} , \vec{p}_{iRight} , \vec{p}_{iRear} και \vec{p}_{iLeft} (βλ. Σχήμα 1.1 αριστερά). Η μεταφορά του μοντέλου στις τρεις διαστάσεις είναι εύκολη εφόσον αυτή θα απαιτούσε μόνο την ύπαρξη έξι υποδοχέων. Η λειτουργία του Μηχανισμού λαμβάνει χώρα σε δύο φάσεις: την πρώτη για τη συλλογή των σημάτων και τη δεύτερη για την ανάλυσή τους. Κατά την πρώτη φάση για $j \in C$, όπου C είναι το σύνολο των Sonoids για τα οποία ισχύει $\|\vec{p}_i - \vec{p}_j\| < d_{nei}$ και εκπέμπουν σήμα $x_j(n)$, στον υποδοχέα με θέση \vec{p}_{iS} ενός Sonoid “*i*” (έναν από τους τέσσερις) και με $j \neq i$ συλλέγεται το σήμα:

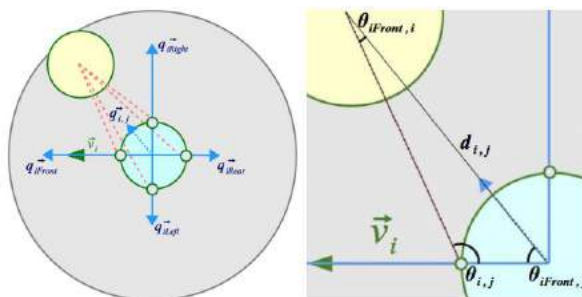
$$x_{iS}(n) = A_{max}(d_{min} - r) \sum_{j \in C} \frac{x_j(n)}{\|\vec{p}_j - \vec{p}_{iS}\|} \tag{1.9}$$

όπου d_{min} η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ δύο Sonoids και A_{max} μια προκαθορισμένη τιμή του πλάτους σήματος που δέχεται ένα Sonoid από ένα άλλο όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων μάζας τους είναι ίση με d_{min} . Συγκεκριμένα, η τιμή πλάτους A_{max} αντιστοιχεί στην απόσταση $(d_{min} - r)$ αφού ο υποδοχέας της θέσης \vec{p}_{iS} βρίσκεται στην περιφέρεια του σώματος ακτίνας r και το πλάτος λαμβάνει την τιμή αυτή όταν τα \vec{p}_j , \vec{p}_{iS} και \vec{p}_i είναι συνευθειακά (βλ. Σχήμα 1.1 δεξιά). Παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (1.7) και (1.8) για την βάρθρωση του πλάτους του σήματος $x_j(n)$ στον υποδοχέα \vec{p}_{iS} . Κατά την φάση της ανάλυσης το ηχητικό σήμα που έχει συγκεντρωθεί σε κάθε υποδοχέα του Αντιληπτικού Μηχανισμού ενός Sonoid μετασχηματίζεται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier. Αν $x_{iS}(n)$ είναι το σήμα

στον υποδοχέα θέσης \vec{p}_{iS} του Sonoid “i”, το φασματικό δείγμα που αντιστοιχεί στη συχνότητα ω_k είναι:

$$X_{iS}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{iS}(n)e^{-j\omega_k nT_s} \quad (1.10)$$

όπου N το μήκος του σήματος και $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.



Σχήμα 1.2 Γνωστικός Μηχανισμός

Ο Γνωστικός Μηχανισμός των Sonoids τους παρέχει την ικανότητα της περαιτέρω επεξεργασίας των αναλυμένων ηχητικών σημάτων για την εξαγωγή πληροφορίας θέσης των πηγών τους. Εφόσον οι πηγές είναι άλλα Sonoids που συνυπάρχουν στο περιβάλλον, κάθε Sonoid κατέχει ως πρωθύστερη γνώση τις διακριτές συχνότητες των σημάτων που εκπέμπονται. Μέσω του Μηχανισμού επιλέγονται τα μεγαλύτερου πλάτους φασματικά δείγματα και ελέγχονται για ταύτιση με συχνότητες που βρίσκονται στο σύνολο πρωθύστερης γνώσης του Sonoid. Απόλυτη ταύτιση υπάρχει μόνο για τις συχνότητες ω_j που είναι ακέραια πολλαπλάσια της $\Omega = 2\pi f_s/N$, όπου f_s η συχνότητα δειγματοληψίας σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο. Για όλες τις υπόλοιπες, η ταύτιση επιτυγχάνεται αν η ω_j είναι εντός του διαστήματος $(\omega_{k-1/2}, \omega_{k+1/2})$, όπου ω_k είναι η κεντρική συχνότητα του φασματικού δείγματος. Από τα παραπάνω παρουσιάζεται η ανάγκη προσθήκης ενός επιπλέον κανόνα παραμετροποίησης στον Ηχοπαραγωγικό Μηχανισμό: (5) διαδοχικές συχνότητες σημάτων πρέπει να διαφέρουν τουλάχιστον κατά Ω . Όταν ολοκληρωθούν οι αντιστοιχίσεις το Sonoid γνωρίζει “ποιοί” είναι οι γείτονές του. Για το “που” βρίσκονται, το Sonoid χρειάζεται τα δεδομένα της απόστασης και της γωνίας του σε σχέση με εκείνους. Ξεκινώντας με την εκτίμηση της γωνίας, για κάθε υποδοχέα που το σήμα εισόδου του περιέχει την ταυτοποιημένη συχνότητα ω_j υπολογίζεται το διάνυσμα:

$$\vec{q}_{iS} = |X_{iS}(\omega_l)| \frac{\vec{p}_{iS} - \vec{p}_l}{\|\vec{p}_{iS} - \vec{p}_l\|} \quad (1.11)$$

όπου $|X_{iS}(\omega_l)|$ το εύρος του φασματικού δείγματος συχνότητας ω_l που έχει ταυτιστεί με την ω_j . Το άθροισμα $\vec{q}_{i,j}$ των αντίστοιχων διανυσμάτων από κάθε υποδοχέα ενός Sonoid “i” δείχνει πλέον στο γειτονικό του Sonoid “j” (βλ. Σχήμα 1.2 αριστερά). Για την εκτίμηση της απόστασής τους, το πρόβλημα ανάγεται σε εκείνο της επίλυσης ενός τριγώνου με γνωστές τις δύο πλευρές του και μια μη-περικλειόμενη σε αυτές γωνία (S-S-A) για το οποίο, όπως είναι γνωστό, είναι δυνατή η μη ύπαρξη μοναδικής λύσης (διφορούμενη περίπτωση). Εντούτοις, στο παρόν υπάρχει η πολυτέλεια των

τεσσάρων τριγώνων, ένα για κάθε υποδοχέα, και ξεκινώντας από τον εμπρόσθιο ερευνάται κυκλικά κάθε τρίγωνο μέχρι να βρεθεί μοναδική λύση. Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα το τρίγωνο που δημιουργείται από την θέση του εμπρόσθιου υποδοχέα (βλ. Σχήμα 1.2 δεξιά) η εκτιμώμενη απόσταση του Sonoid “i” από το γειτονικό του Sonoid “j” είναι:

$$d_{i,j} = \frac{r \sin(\theta_{i,j})}{\sin(\theta_{iFront,i})} \quad (1.12)$$

όταν

$$\theta_{i,j} = \pi - \theta_{iFront,j} - \theta_{iFront,i} \quad (1.13)$$

$$\theta_{iFront,j} = \arccos\left(\frac{\langle \vec{q}_{i,j}, \vec{q}_{iFront} \rangle}{\|\vec{q}_{i,j}\| \cdot \|\vec{q}_{iFront}\|}\right) \quad (1.14)$$

$$\theta_{iFront,i} = \arcsin\left(\frac{2|X_{iFront}(\omega)|}{A_{max}(d_{min}-r)} r \sin(\theta_{iFront,j})\right) \quad (1.15)$$

2. Σχεδίαση Ηχητικής Διαδραστικής Σύνθεσης και Υλοποιήσεις

2.1 Σχεδίαση Ηχητικής Διαδραστικής Σύνθεσης

Αν το ελάχιστο επιθυμητό αποτέλεσμα του αλγορίθμου των Sonoids είναι να εμφανίσει ανάλογη συμπεριφορά, ακουστικά παρατηρήσιμη και αισθητικά ενδιαφέρουσα, θα απαιτηθεί ικανοποιητικού μεγέθους ηχητικός “χώρος” προς εξερεύνηση. Ο “χώρος” αυτός αποτελείται από σήματα διαφορετικά των λειτουργικών σημάτων του αλγορίθμου (αλλιώς ο χώρος θα περιοριζόταν κατά την τήρηση των κανόνων παραμετροποίησης του Ηχοπαραγωγικού Μηχανισμού) αλλά η έξοδος του τελευταίου εξυπηρετεί τον χρήστη στην εξερεύνηση του “χώρου” ελέγχοντας τις παραμέτρους των σημάτων που τελικά θα φτάσουν στα αυτιά του. Ο χρήστης αποτιμά την έξοδο του αλγορίθμου βάσει του ακουστικού αποτελέσματος. Μια δεύτερη αποτίμηση της εξόδου μπορεί να λάβει χώρα στο εσωτερικό του συστήματος πριν την ακουστικοποίησή της με σκοπό την περαιτέρω διεύρυνση του ηχητικού “χώρου”. Εφόσον είναι εφικτή η παράλληλη με τον αλγόριθμο των Sonoids εκτέλεση του αλγορίθμου των Boids, σε κάθε βήμα η έξοδος του πρώτου αποτιμάται για το κατά πόσο κοντά βρίσκεται στην έξοδο του δεύτερου ή αλλιώς το “κατά πόσο Boïd είναι ένα Sonoid”. Θέτοντας κατάλληλα βάρη στις αποκλίσεις θέσης και ταχύτητας που κατέχει ένα Sonoid από εκείνες που θα κατείχε αν ήταν Boïd λαμβάνονται νέα δεδομένα για συμβολή στο ακουστικό αποτέλεσμα που τελικά αποτιμά ο χρήστης. Για την εκμετάλλευση του κυριότερου πλεονεκτήματος των Sonoids έναντι των Boids, αυτού της ακουστικής συναίσθησης, και για να εξυπηρετήσει το τελευταίο διαδραστικούς σκοπούς επιλέχθηκε η μη τήρηση του 3ου κανόνα του Ηχοπαραγωγικού Μηχανισμού, του σχετικού με το πλάτος των λειτουργικών σημάτων. Ο χρήστης θέτει τις στιγμιαίες τιμές πλάτους των λειτουργικών σημάτων με πιθανό αποτέλεσμα την διαστρέβλωση της κρίσης των ατόμων για την θέση των γειτόνων τους.

Αντί της συμβολικής μουσικής πληροφορίας για την εξέταση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ηχητική χροιά εφόσον κρίθηκε ως

το καταλληλότερο των βασικών χαρακτηριστικών του μουσικού ήχου για παραλληλισμό του τελευταίου με το Σμήνος που ο αλγόριθμος μοντελοποιεί. Όπως η συνολική αναδύομενη συμπεριφορά του Σμήνους προκύπτει από την αλληλεπίδραση των οντοτήτων που το απαρτίζουν σε τοπικό επίπεδο, η χροιά ενός μουσικού ήχου μπορεί να ιδωθεί ως το συνολικό αποτέλεσμα της επιρροής που έχουν οι σχέσεις των μερικών συχνότητων του στην αντιληπτή ταυτότητά του. Τα σήματα που συνθέτουν τον τελικά παραγόμενο ήχο είναι ημιτονικής μορφής και αποτελούν τις μερικές συχνότητες που θα καθορίσουν την χροιά του. Ο χρήστης επιλέγει το τονικό ύψος και την ένταση του ήχου θέτοντας τις αρχικές τιμές συχνότητας και πλάτους του σήματος που αντιστοιχεί στην πρώτη μερική ή βασική συχνότητα. Οι στιγμιαίες τιμές συχνότητας και πλάτους ενός σήματος τίθενται από ένα άτομο του Σμήνους, με το *i*-οστό άτομο Sonoid να εκπροσωπεί την *i*-οστή Αρμονική και να ελέγχει την *i*-οστή μερική συχνότητα του ήχου. Η ένταση της *i*-οστής μερικής συχνότητας ρυθμίζεται βάσει του προσανατολισμού και της απόστασης που κατέχει το *i*-οστό άτομο Sonoid (*i*-οστή Αρμονική) σε σχέση με το άτομο που εκπροσωπεί την πρώτη Αρμονική. Η τιμή της *i*-οστής μερικής συχνότητας ρυθμίζεται βάσει της απόκλισης θέσης που κατέχει το *i*-οστό άτομο Sonoid (*i*-οστή Αρμονική) από εκείνη που θα κατείχε αν ήταν Boid. Συνολικά, κάθε συμμετέχων στο διαδραστικό περιβάλλον ελέγχει μερικώς τα ηχητικά σήματα του άλλου και το τελικά παραγόμενο ηχητικό αποτέλεσμα βασίζεται με τον τρόπο αυτό στην αμφίπλευρη ακουστική ανατροφοδότηση.

2.2 Υλοποιήσεις

Ο αλγόριθμος βάσει του σεναρίου της προηγούμενης υποενότητας ενσωματώθηκε σε δύο υλοποιήσεις. Η πρώτη ως εφαρμογή για φορητή υπολογιστική συσκευή με λειτουργικό σύστημα iOS και η δεύτερη ως πρόσθετο (AU plugin) για τρίτες εφαρμογές τύπου Digital Audio Workstation σε desktop λειτουργικό σύστημα Mac OS. Η αποκλειστική συμβατότητα με τα παραπάνω λειτουργικά συστήματα προέκυψε λόγω της χρήσης του Accelerate Framework της Apple για το DSP μέρος του αλγορίθμου. Για τον “σκελετό” των υλοποιημένων εφαρμογών χρησιμοποιήθηκαν η βιβλιοθήκη openFrameworks στην περίπτωση του iOS και η βιβλιοθήκη Juce Framework στην περίπτωση του Mac OS, ενώ και στις δύο περιπτώσεις η παραγωγή του ήχου προήλθε από μεταγλωττισμένο σε C++ κώδικα της γλώσσας προγραμματισμού Faust.

Οι δύο υλοποιήσεις μοιράζονται τον ίδιο τρόπο ελέγχου της διάρκειας του παραγόμενου ήχου υιοθετώντας τη απλή σύμβαση μετάβασης μεταξύ δύο γενικών καταστάσεων του σμήνους των Sonoids: την κατάσταση ήχησης κατά την οποία τα άτομα παράγουν ήχο και το σμήνος αυτο-οργανώνεται και την αντίθετη αυτής κατάσταση σιγής. Το σμήνος τίθεται σε κατάσταση ήχησης στη μεν φορητή εφαρμογή με το άγγιγμα του χρήστη στην οθόνη της συσκευής ενώ στην περίπτωση του plugin με την εμφάνιση ενός MIDI γεγονότος έναρξης νότας. Για τον έλεγχο της τονικότητας και της έντασης του παραγόμενου ήχου ο χρήστης της φορητής εφαρμογής επιλέγει το κατάλληλο σημείο επαφής του με την οθόνη σε κάθε άξονα της οποίας έχει αντιστοιχηθεί μία από τις παραμέτρους ενώ στο plugin αυτές διαμορφώνονται μέσω των pitch και velocity συνιστωσών του παραπάνω MIDI γεγονότος καθώς και μέσω μιας περιβάλλουσας τεσσάρων σταδίων για την παράμετρο της έντασης. Τέλος, για τον έλεγχο της έντασης των λειτουργικών σημάτων του αλγορίθμου που κατ' επέκταση διαμορφώνουν την χροιά του

παραγόμενου ήχου επιλέχθηκαν οι ίδιες αντιστοιχίες με εκείνες της έντασης του ως πιο διαισθητικά σαφείς στον χρήστη.

3. Συμπεράσματα

Η διαδικασία δοκιμής των τελικών εφαρμογών που ενσωμάτωσαν τον αλγόριθμο των Sonoids παρείχε την εκτίμηση ότι ανάλογα σενάρια που διαμορφώνονται για πειραματικούς σκοπούς και συνδέουν τους χώρους των Τεχνών και των Επιστημών μπορούν να αποτελέσουν προσβάσιμα εκπαιδευτικά εργαλεία για τριβή με έννοιες ποικίλων διεπιστημονικών πεδίων.

4. Βιβλιογραφία

[1] C. W. Reynolds, "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model," in *ACM SIGGRAPH computer graphics*, vol. 21, no. 4. ACM, pp. 25–34 (1987).

[2] T. M. Blackwell and P. Bentley, "Improvised music with swarms," in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002. CEC '02*, vol. 2. IEEE, pp. 1462–1467 (2002).

[3] T. M. Blackwell, "Swarm Music: improvised music with multi-swarms," in *Proceedings of the 2003 AISB Symposium on Artificial Intelligence and Creativity in Arts and Science*, pp. 41–49 (2003).

[4] T. M. Blackwell, "Swarming and music," in *Evolutionary Computer Music*, E. R. Miranda and J. A. Biles, Eds. Springer London, pp. 194–217 (2007).

[5] T. Blackwell and M. Young, "Swarm Granulator," in *Applications of Evolutionary Computing, Proceedings of the 2nd European Workshop on Evolutionary Music and Art, EVOMUSART 2004*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 399–408 (2004).

[6] T. Blackwell, "Swarm granulation," in *The Art of Artificial Evolution*, ser. Natural Computing Series, J. Romero and P. Machado, Eds. Springer Berlin Heidelberg, pp. 103–122 (2008).

[7] S. Wilson, "Spatial Swarm Granulation," *Proceedings of the 2008 International Computer Music Conference*, (2008).

Εφαρμογή συμβολομετρικών μεθόδων laser στη μελέτη των παραδοσιακών και αρχαίων Ελληνικών μουσικών οργάνων

Ευθύμιος Μπακαρέζος^{1,2,α}, Ιωάννης Ορφανός^{1,2,β}, Ευάγγελος Κασελούρης^{2,γ}, Βασίλειος Δημητρίου^{2,3,δ}, Μιχαήλ Ταταράκης^{2,4,ε} και Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{1,2,στ}

¹ Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 74133, Ρέθυμνο, ² Κέντρο Φυσικής Πλάσματος & Laser, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 74100, Ρέθυμνο, ³ Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 73133, Χανιά, ⁴ Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 73133, Χανιά
^α Αναπληρωτής Καθηγητής, bakarezos@staff.teicrete.gr
^β Διδάκτωρ, Μέλος Ε.ΤΕ.Π., yorphanos@staff.teicrete.gr,
^γ Διδάκτωρ, Επιστημονικός Συνεργάτης, vkas@chania.teicrete.gr,
^δ Επίκουρος Καθηγητής, dimvasi@chania.teicrete.gr
^ε Καθηγητής, m.tatarakis@chania.teicrete.gr
^{στ} Καθηγητής, npapadogiannis@staff.teicrete.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται πλήρεις απεικονιστικές συμβολομετρικές διατάξεις με τη χρήση laser, καθώς και κατάλληλα λογισμικά ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων πραγματικού χρόνου, που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί με επιτυχία στη δονητική μελέτη τόσο εγχόρδων όσο και κρουστών μουσικών οργάνων. Επιπρόσθετα, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοιώσεων βασισμένα σε πεπερασμένα στοιχεία, των οποίων η ακρίβεια επαληθεύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μελέτες που έχουν γίνει σε παραδοσιακά αλλά και πιστά ανακατασκευασμένα αρχαία Ελληνικά μουσικά όργανα, που μελετήθηκαν για πρώτη φορά διεθνώς με τις τεχνικές αυτές.

Application of laser interferometric methods in the study of traditional and ancient Greek musical instruments

ABSTRACT

Full field laser interferometric techniques have been developed along with appropriate software for the process control and for data acquisition and analysis in real time that have been applied successfully for vibrational studies of string and percussion instruments.. Additionally, simulation methods based on Finite element models have been developed and validated from the experimental results. The studies of traditional and faithfully reconstructed ancient Greek instruments are of particular importance since they studied for the first time with these techniques.

Εισαγωγή

Η μελέτη της ταλαντωτικής συμπεριφοράς δομών και διατάξεων είναι εξαιρετικά σημαντική σε διάφορους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας, για παράδειγμα αναφέρουμε την τεχνολογία κατασκευής μηχανικών μερών αυτοκινήτων για τη μείωση του θορύβου και για την ασφαλή λειτουργία τους (φρένα), την τεχνολογία των υλικών (ανίχνευση ατελειών, ακουστική συμπεριφορά). Σημαντική όμως παραμένει και η μελέτη της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των μουσικών οργάνων, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της λειτουργίας των οργάνων αυτών και κατ' επέκταση στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της κατασκευής τους ή στην πιστή ανακατασκευή οργάνων που δεν υπάρχουν σήμερα.

Στα πλαίσια αυτά σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι οπτικές τεχνικές με προεξάρχουσες αυτές που βασίζονται στη σύμφωνη ακτινοβολία των Laser. Έτσι ήδη από την δεκαετία του '80 εμφανίζονται χρήσεις της σύμφωνης ακτινοβολίας των Laser στην μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς των μουσικών οργάνων [1, 2] οι οποίες βασίζονται στην ολογραφική συμβολομετρία. Η βασική διαφορά μεταξύ της κλασσικής ολογραφίας [3] και της συμβολομετρικής ολογραφίας βρίσκεται στο γεγονός ότι η δέσμη αντικειμένου συγκρίνεται με τον εαυτό της. Έτσι η δέσμη αντικειμένου παραμένει στο σημείο αποτύπωσης και εάν μεταξύ δύο διαδοχικών αποτυπώσεων το αντικείμενο δονηθεί η σχετική φάση των δύο οπτικών πεδίων αποτυπώνεται μέσω της συμβολής αυτών. Τα επόμενα χρόνια και καθώς η τεχνολογία έγινε ψηφιακή η αποτύπωση των ολογραμμάτων γίνεται σε πάνω CCD/CMOS αισθητήρες και η μέθοδος λαμβάνει το όνομα «TV Holography» ή «Electronic Holography». Στα τέλη της δεκαετίας του '80 και στην δεκαετία του '90 εμφανίζεται η ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων «Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI». Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την συμβολομετρική ολογραφία τραχειών επιφανειών και μάλιστα χωρίς ιδιαίτερη επίδραση των ταλαντώσεων του περιβάλλοντος χώρου έδωσε τεράστια ώθηση στην μελέτη της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των επιφανειών [4, 5, 6].

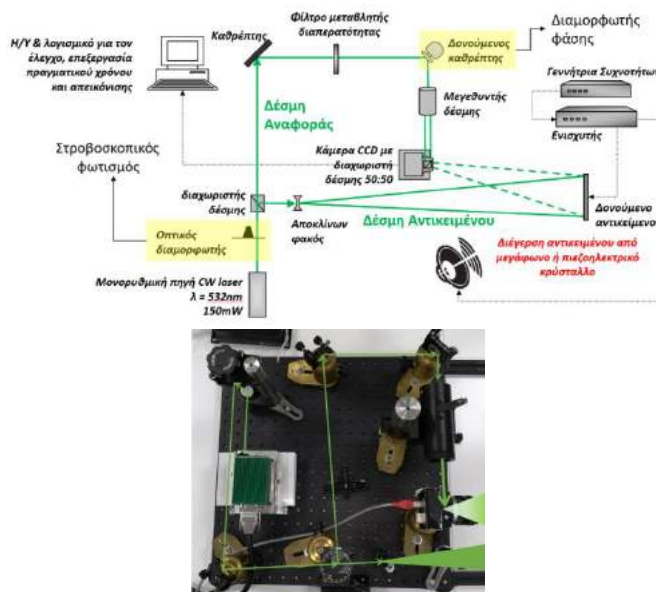
Οι παραπάνω οπτικές τεχνικές προσφέρουν εξαιρετικά πλεονεκτήματα στη μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς εγχόρδων και κρουστών κυρίως μουσικών οργάνων σε σχέση με άλλες «μηχανικές» τεχνικές επαφής (π.χ. Chladni Plates, συστοιχίες πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων) ή ακουστικές τεχνικές χωρίς επαφή (συστοιχίες μικροφώνων [7]). Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι ότι οι οπτικές τεχνικές είναι μη επεμβατικές, άμεσης καταγραφής ολικού πεδίου ταλάντωσης, έχουν εξαιρετική διακριτική ικανότητα στην επιφάνεια μελέτης, μπορούν υπό συνθήκες να έχουν εξαιρετική χρονική διακριτική ικανότητα, μπορούν υπό συνθήκες να έχουν ανίχνευση της φάσης της ταλάντωσης και της κατευθυντικότητας της δόνησης.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται ειδικές πειραματικές διατάξεις τύπου ESPI που αναπτύχθηκαν στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης, η χρήση τους για τη μελέτη παραδοσιακών και αρχαίων μουσικών οργάνων καθώς και μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων των οποίων η ακρίβεια επαληθεύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα.

1. Πειραματικές διατάξεις τύπου ESPI

Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η οπτική διάταξη τύπου ESPI που αναπτύχθηκε πλήρως στα εργαστήρια του τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Η διάταξη αυτή με τις κατάλληλες τροποποιήσεις (βλ. στοιχεία

κίτρινο χρώμα) μπορεί να προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες στη μελέτη της δονητικής συμπεριφοράς των υπό-μελέτη μουσικών οργάνων.



Σχήμα 1.6 Φορητή διάταξη ESPI που αναπτύχθηκε στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης (πάνω: σχηματική οπτική διάταξη, κάτω: φωτογραφία)

Η βασική αρχή λειτουργίας της έγκειται στην γρήγορη συμβολομετρική καταγραφή των αλλαγών της υπό-μελέτης επιφάνειας καθώς αυτή δονείται διεγερόμενη από ένα ηχείο χαμηλής παραμόρφωσης. Η καταγραφή και η επεξεργασία των συμβολογραμμάτων γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ώστε ο ερευνητής να έχει τη δυνατότητα να επέμβει για την βελτιστοποίηση των καταγραφόμενων αποτελεσμάτων ή να αλλάξει παραμέτρους του πειράματος και να καταγράψει σε πραγματικό χρόνο την επίδρασή τους στο δονούμενο αντικείμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται σε συντομία οι διαφορετικές της δυνατότητας με τις τροποποιήσεις της οπτικής διάταξης.

1.1 Χρονικά ολοκληρωμένη ESPI

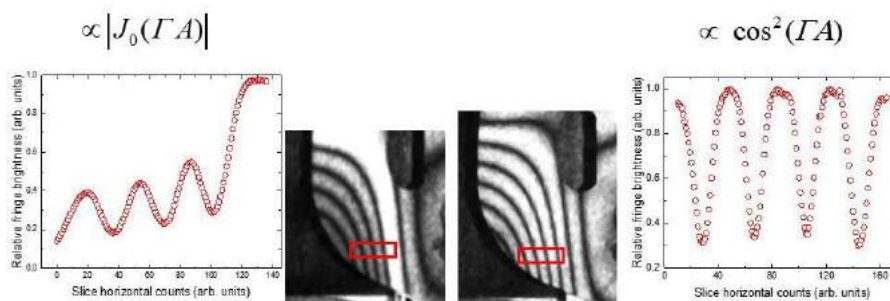
Για την διάταξη αυτή στο σχήμα 1.6, απουσιάζει ο οπτικός διαμορφωτής δέσμης και ο δονούμενος καθρέπτης είναι στατικός. Αυτή η διάταξη είναι κατάλληλη για τη μέτρηση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης μιας επιφάνειας όπου οι δονήσεις λαμβάνουν χώρα κάθετα σε αυτήν και έχουν πλάτος δόνησης μέχρι λίγες φορές το μήκος κύματος του μονοχρωμικού συνεχούς συστήματος Laser που χρησιμοποιεί η διάταξη (τυπικά μέχρι μερικά μm) διότι οι ισοϋψείς καμπύλες ταλάντωσης των κροσσών συμβολής έχουν συνεχώς μειούμενη ένταση λόγω του ότι ακολουθούν την συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης [8, 9]. Αναλυτική μαθηματική περιγραφή της διάταξης παρουσιάζεται στα άρθρα [8, 9]. Η μέθοδος αυτή επίσης μπορεί να

καταγράφει τις καμπύλες συντονισμού και τους αντίστοιχους παράγοντες ποιότητας (Q-Factors) για τους αντίστοιχους τρόπους ταλάντωσης.

a. Στροβοσκοπική ESPI

Για την διάταξη αυτή στο σχήμα 1.6, χρησιμοποιείται ο οπτικός διαμορφωτής δέσμης για να υπάρχει στροβοσκοπικός φωτισμός του αντικείμενου ενώ ο δονούμενος καθρέπτης είναι στατικός. Το υπό-μελέτη αντικείμενο φωτίζεται σε δύο σημεία του κύκλου δόνησής του, παράγοντας κροσσούς ίσης φωτεινότητας ($\propto \cos^2$) σύμφωνα με την εξίσωση (1.1). Η εφαρμογή στην κρητική λύρα απεικονίζεται στο σχήμα 1.7 [10].

$$I_{STROBOSCOPIC}(x, y) \propto I_0(x, y) \cos^2(\Gamma A) \tag{1.1}$$



Σχήμα 1.7 Αποτελέσματα της ESPI με στροβοσκοπικό φωτισμό (δεξιά) και χωρίς (αριστερά)

Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να ανιχνευθεί ταλάντωση μέχρι και μερικές δεκάδες φορές το μήκος κύματος του laser (μερικές δεκάδες μm) καθώς δεν υπάρχει μείωση της φωτεινότητας των κροσσών.

b. ESPI ανίχνευσης φάσης ταλάντωσης

Για τη διαμόρφωση της διάταξης ESPI (σχήμα 1.6) ώστε να ανιχνευθεί η φάση ταλάντωσης, χρησιμοποιείται δονούμενος από πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο καθρέπτης στην ίδια συχνότητα f με το δονούμενο αντικείμενο, με δυνατότητα αλλαγής φάσης. Η συχνότητα δόνησης του καθρέπτη είναι (1.2):

$$u_{MIRROR}(x, y, t) = A_{MIRROR} \cos(2\pi ft + \varphi_{MIRROR}) \tag{1.2}$$

όπου:

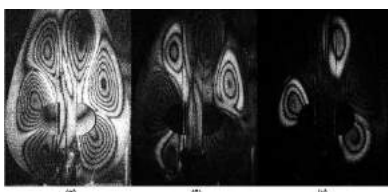
A_{MIRROR} : πλάτος δόνησης του καθρέπτη

f : συχνότητα δόνησης του καθρέπτη = συχνότητα δόνησης του αντικειμένου

φ_{MIRROR} : φάση δόνησης του καθρέπτη

$$I_{PHASEMODULATED}(x, y) \propto I_0(x, y) \left\{ J_0^2 \left(\Gamma \left[A_{OBJECT}^2 + A_{MIRROR}^2 - 2A_{OBJECT} A_{MIRROR} \cos(\varphi_{OBJECT} - \varphi_{MIRROR}) \right]^{\frac{1}{2}} \right) \right\} \tag{1.3}$$

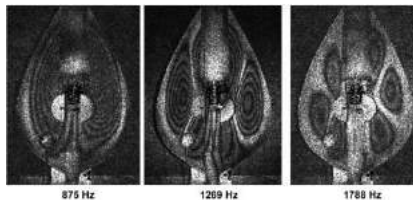
Στην πειραματική διάταξη, χρησιμοποιήθηκε καθρέπτης που δονείται με πλάτος 0.4 μm και με μέγιστη δυνατότητα αντιστάθμισης τα 3 μm . Στο σχήμα 1.8 απεικονίζεται η εφαρμογή στην κρητική λύρα [10].



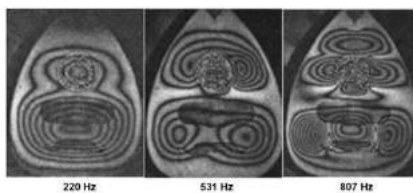
Σχήμα 1.8 (α) Κανονικός τρόπος ταλάντωσης στα 1663Hz χωρίς την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης. (β) και (γ) μετά την εφαρμογή διαμόρφωσης φάσης για πλάτος δόνησης του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου κατά $\sim 0,15\mu\text{m}$ και $\sim 0,30\mu\text{m}$ αντίστοιχα

2. Εφαρμογή μεθόδων ESPI στα αρχαία & παραδοσιακά μουσικά όργανα

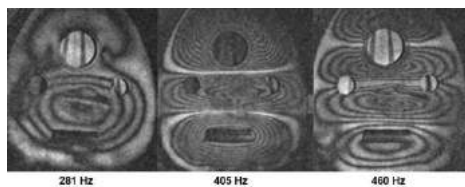
Παρακάτω παρουσιάζονται τυπικές μετρήσεις με τη χρήση της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI για την εύρεση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης και των αντίστοιχων ιδιοσυχνοτήτων παραδοσιακών και αρχαίων Ελληνικών μουσικών οργάνων που μετρήθηκαν με το φορητό σύστημα που αναπτύχθηκε στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης (σχήματα 2.1 – 2.7).



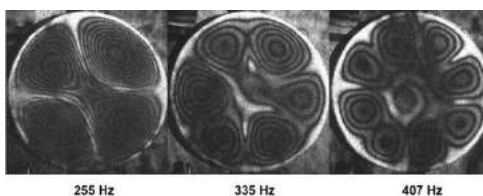
Σχήμα 2.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από την Αχλαδόσχημη Λύρα [11]



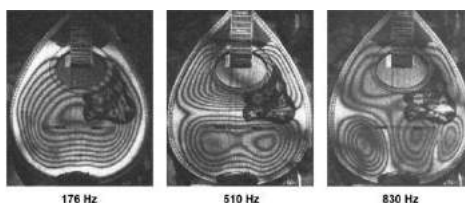
Σχήμα 2.2 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από το Πολίτικο Λαούτο [12]



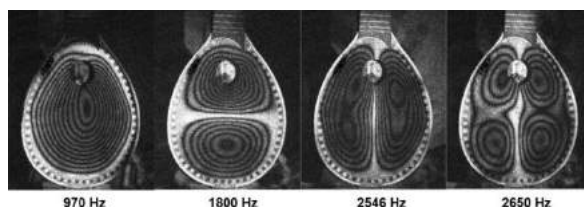
Σχήμα 2.3 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από το Ούτι [12]



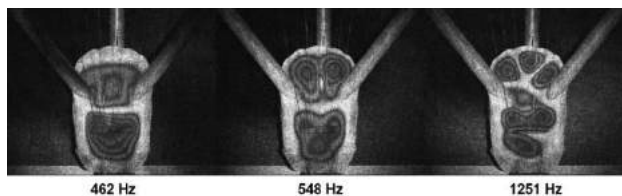
Σχήμα 2.4 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από το Μπεντίρ [13]



Σχήμα 2.5 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από το τετράχορδο Μπουζούκι [14]



Σχήμα 2.6 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από τον Μπαλαμά [14]

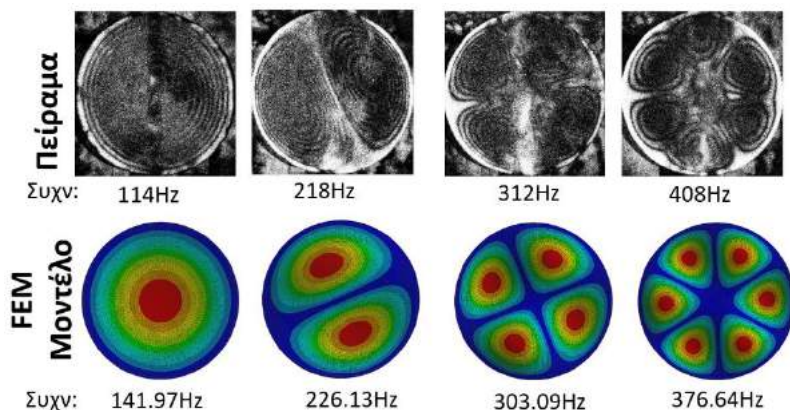


Σχήμα 2.7 Ενδεικτικά αποτελέσματα ESPI από την ανακατασκευασμένη λύρα Χέλυ [15]

3. Σύγκριση μετρήσεων με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης των δονήσεων που βασίζεται σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FE model) για τα όργανα που μελετήθηκαν. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενσωματώθηκαν τα χαρακτηριστικά του φυσικού προβλήματος τα οποία συγκρίθηκαν στην συνέχεια με τα αποτελέσματα από την τεχνική ESPI. Το μοντέλο επικυρώθηκε στην συνέχεια από τα πειραματικά αποτελέσματα με βάση τους κύριους τρόπου ταλάντωσης και τις ιδιοσυχνότητες του οργάνου [17]. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση βρέθηκαν να έχουν ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, έτσι ώστε ο συνδυασμός των δύο τεχνικών να αποτελεί μια μεθοδολογία ικανή να πιστοποιεί και να δίνει μία καθαρή εικόνα των κατασκευαστικών και ακουστικών παραμέτρων των κρουστών οργάνων.

Στο παρόν άρθρο (Σχήμα 3.1) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κρουστού οργάνου μπεντίρ (bendir).



Σχήμα 3.1 Ενδεικτικά συγκριτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση του μπεντίρ με τα αντίστοιχα πειραματικά [16]

4. Συμπεράσματα

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάστηκαν οι τεχνικές Ηλεκτρονικής Συμβολομετρίας Laser που έχουν αναπτυχθεί στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης καθώς και η χρήση τους στη μελέτη των παραδοσιακών και αρχαίων μουσικών οργάνων.

Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από το έργο «Εργαστήρια Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής», ΈΛΚΕ Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Κωδ. έργου 80264, ίδιοι πόροι)

5. Αναφορές

- [1] Baker, L.R. «Holographic and Speckle Interferometry» *Optica Acta: Int. J. Opt.*, **30**, 1041, 1983
- [2] Jones, R., Wykes, C. *Holographic and Speckle Interferometry* Cambridge University Press, Cambridge, 1989

- [3] Dennis Gabor «Holography 1948-1971», Nobel Lecture, Imperial Colleges of Science and Technology, London, 1971
- [4] Sharp, B. «Electronic speckle pattern interferometry (ESPI)», *Opt. Lasers Eng.*, **11**, 241-255, 1989
- [5] Wang, W.-C., Hwang, C.-H. & Lin, S.-Y. «Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods», *Appl. Opt.*, **35**, 4502-4509, 1996
- [6] Molin, N.-E. «Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics» *Opt. Lasers Eng.*, **31**, 93-11, 1999
- [7] Bader R. *Microphone Array - Springer Handbook of Acoustics* Springer, New York, NY, 2014
- [8] E. Bakarezos, V. Vathis, S. Brezas, Y. Orphanos and N. A. Papadogiannis, «Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre», *Applied Acoustics* **73**, 478, 2011
- [9] M. Bakarezos, S. Gymnopoulos, S. Brezas, Y. Orphanos, E. Maravelakis, C.I. Papadopoulos, M. Tatarakis, A. Antoniadis and N.A. Papadogiannis, «Vibration analysis of the top plates of traditional Greek string musical instruments», *13th International Congress of Acoustics and Vibration (ICSV13)*, Vienna, CD-ROM Proceedings, Eds.: J. Eberhardsteiner, H.A. Mang and H. Waubke, 2006
- [10] Κ. Πατσάς «Ανάπτυξη τροποποιημένων τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας ESPI για τη μελέτη κανονικών τροπών ταλάντωσης επιφανειών», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο, 2009
- [11] Μ. Ποιμενίδου «Τρόποι ταλάντωσης επιφανειών εγχόρδων μουσικών οργάνων μέσω μη καταστρεπτικών τεχνικών», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο, 2007
- [12] Θ. Μολής «Συγκριτική ακουστική μελέτη των οργάνων πολίτικο λαούτο και ούτι», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ρέθυμνο, 2015
- [13] Ι. Σιδηράς «Μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με τη χρήση οπτικών συμβολομετρικών τεχνικών», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο, 2013
- [14] Α. Χαρτοφύλακας «Ακουστική και ηχητική ανάλυση των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, τμ. Μουσικών Σπουδών, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα, 2009
- [15] Β. Βάθης, «Ανακατασκευή, ακουστική μελέτη και εκτέλεση αρχαίας Ελληνικής λύρας (Χέλυσ)», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο, 2008
- [16] Ε. Κοκκινάκης «Προσομοίωση συμπεριφοράς & δονητικών χαρακτηριστικών τυμπάνου», πτυχιακή εργασία τμ. Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρέθυμνο, 2013
- [17] M. Bakarezos, V. Dimitriou, Y. Orphanos, I. Sidiras, E. Kaselouris, M Tatarakis and N. A. Papadogiannis «Vibrational features of the traditional percussion instrument bendir using laser holographic interferometry and finite element analysis methods», 9th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Chania, 2018

**Μουσικός Διαδραστικός Αυτοσχεδιασμός Πραγματικού
Χρόνου με Χρήση Δεδομένων
Ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος του Εκτελεστή**

Καλαντζής Αχιλλέας
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
49100 Κέρκυρα
achilleas_crown@yahoo.gr

Ανδρέας Φλώρος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
49100 Κέρκυρα
floros@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια καλλιτεχνική διαδραστική εφαρμογή μουσικού αυτοσχεδιασμού με τίτλο *Mental Palindrome*, η οποία βασίζεται στην ηχητική αναπαράσταση σημάτων ηλεκτροεγκεφαλογράφου (HEG) σε πραγματικό χρόνο. Ο μουσικός/χρήστης εκτελεί αυτοσχεδιαστικά μουσική, εμπνεόμενος από την παραγόμενη από τον υπολογιστή μουσική, εγκαθιστώντας έτσι μια αμφίδρομη ανατροφοδοτική συνθετική αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανής και ανθρώπου. Η μέθοδος της ηχητικής αναπαράστασης χρησιμοποιεί τα καταγραφόμενα δεδομένα HEG για τη διαμόρφωση των ήχων, των εφέ και την επιλογή συγκεκριμένων μελωδιών και ρυθμικών μοτίβων, ενώ επεξεργάζεται συνδυαστικά δεδομένα που σχετίζονται με τις εκφράσεις του προσώπου, στοχεύοντας στην αναγνώριση και ηχοποίηση των καταγεγραμμένων ψυχολογικών καταστάσεων.

***Music Improvisation and Real-Time Interactive Computer
Music based on Performer's EEG Data Input***

ABSTRACT

This paper presents an interactive application of musical improvisation entitled "Mental Palindrome", which is based on real-time sonification of electroencephalography (EEG) signals. During the sonification process, the user performs improvised music while being inspired by the computer-generated music, thus creating a bi-directional process of feedback between the human performer and the machine. The sonification approach inputs the EEG data to modulate sounds and timbre, to select notes and melodies, rhythmic patterns and even uses gyroscope data to place sound in a typical 4-channel output audio system. Furthermore, the overall sound-synthesis process combines data related to facial expressions, thus targeting on acoustically representing any emerged user's approximate emotional status.

Εισαγωγή

Το Mental Palindrome αποτελεί μια καλλιτεχνική εφαρμογή διεπιστημονικού ενδιαφέροντος. Σκοπός της είναι η παραγωγή μουσικής που εκφράζει την ψυχοσωματική κατάσταση του χρήστη, ενώ αντίστροφα, ο χρήστης καλείται να εκτελέσει μουσική έχοντας ως ερέθισμα την μουσική του υπολογιστή. Με αυτό τον τρόπο παρουσιάζεται μια εναλλακτική αυτοσχεδιαστική μουσική παράσταση: ένα μουσικό ντουέτο ανάμεσα σε άνθρωπο και μηχανή, αποτέλεσμα μίας συνεχούς και κυκλικής διάδρασης.

Σε τεχνικό επίπεδο η άμεση μετάφραση των λαμβανόμενων κυμάτων (συχνότητα, πλάτος) των εγκεφαλογράφων σε αντίστοιχες μουσικές συχνότητες και δυναμικές αποτελεί πλέον σχετικά συνηθισμένη προσέγγιση στις μουσικές διεπαφές Εγκεφάλου-Υπολογιστή (Brain Computer Music Interfaces – BCMI) [1]. Η βασική πτυχή πρωτοτυπίας της παρούσας εργασίας σε σχέση με αντίστοιχες έρευνες, επικεντρώνεται στον ακολουθούμενο ηχητικό σχεδιασμό, ο οποίος, μέσω μιας αλγοριθμικής πολυπλοκότητας, καταλήγει σε συνεκτικά δομημένο και αισθητικά αποδεκτό μουσικό περιεχόμενο και όχι στην απλή άμεση μετατροπή σημάτων ΗΕΓ σε ήχο. Επιπροσθέτως, το σύστημα επεξεργάζεται συνδυαστικά δεδομένα που σχετίζονται με τις εκφράσεις του προσώπου του χρήστη και καταλήγει σε ηχητικά συμπεράσματα συμβατά με την ψυχοσωματική του κατάσταση.

Για τη υλοποίηση της παραμετροποιημένης μουσικής σύνθεσης, την επεξεργασία των δεδομένων ΗΕΓ και την τελική σύνθεση των ήχων χρησιμοποιήθηκε το *Super Collider*, μια ευρέως διαδεδομένη πλατφόρμα προγραμματισμού για διαδραστικές εφαρμογές ήχου. Ο Adam Overton χρησιμοποίησε για πρώτη φορά ΗΕΓ και ηλεκτροκαρδιογράφο με το *Super Collider* για την παραγωγή του ήχου στο έργο του “*Sitting, Breathing, Beating*” το 2004 [2].

1. Καταγραφή Δεδομένων Ηλεκτροεγκεφαλογράφου (ΗΕΓ)

Το ηλεκτροεγκεφαλόγραφο αποτελεί τύπο απεικόνισης της δραστηριότητας των νευρώνων. Ο εγκέφαλος παράγει ποσότητες ηλεκτρισμού οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν με την προσαρμογή ηλεκτροδίων στο κρανίο [3]. Τα σήματα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πέντε ζώνες συχνοτήτων γνωστές ως Δέλτα, Θήτα, Άλφα, Βήτα και Γάμμα. Ανεξαρτήτως των συνδυασμών των δραστηριοποιημένων εγκεφαλικών περιοχών, αυτή η γενική κατηγοριοποίηση συμβάλλει στην αναγνώριση συγκεκριμένων εγκεφαλικών καταστάσεων [4].

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, για την καταγραφή των ΗΕΓ σημάτων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Emotiv EPOC [5], το οποίο χρησιμοποιεί 14 αισθητήρες για την σε πραγματικό χρόνο καταγραφή μιας ποικιλίας εγκεφαλικών καταστάσεων που σχετίζονται με την α) μέτρηση καταστάσεων διαλογισμού, ενθουσιασμού, συγκέντρωσης και εκνευρισμού β) αναγνώριση εκφράσεων του προσώπου (κίνησης ματιών, βλεφάρισμα, γέλιο, σφίξιμο δοντιών, συνοφρύωση, γέλιο, χαμόγελο) και γ) αναγνώριση και μέτρηση της έντασης συγκεκριμένης σκέψης του χρήστη (σπράχνω, ανυψώνω, περιστρέφω, μετακινώ ή ελκώω αντικείμενο). Επιπροσθέτως, η συσκευή διαθέτει και ενσωματωμένο γυροσκόπιο με το οποίο ο χρήστης μπορεί να ελέγχει τον κέρσορα στο λειτουργικό σύστημα του υπολογιστή.

Για την αποστολή των επεξεργασμένων δεδομένων στο *Super Collider* χρησιμοποιήθηκε το MindYourOSCs, ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που παρέχει

τη δυνατότητα αποστολής των δεδομένων μέσω μηνυμάτων OSC (Open Sound Control) σε πραγματικό χρόνο.

2. Ηχητική Σύνθεση

Μέσω του *Super Collider* δημιουργήθηκαν ψηφιακοί συνθετητές (synths) που παραμετροποιήθηκαν με σκοπό τον πλήρη έλεγχο τους. Η ενεργοποίηση και λειτουργία των synths γίνεται μέσω ρουτινών λογισμικού που αντιστοιχούν δεδομένα σε διάφορες μουσικές / ηχητικές παραμέτρους των synths και της συνολικής σύνθεσης που δημιουργείται με βάση τον τύπο του εκάστοτε synth και του επιμέρους ρόλου του στο ηχητικό σύνολο. Η υλοποίηση των synths στηρίχθηκε στη χρήση κλασικών μεθόδων “αναλογικής” σύνθεσης ηλεκτρονικής μουσικής, όπως η διαμόρφωση συχνότητας, πλάτους και φάσης, η προσθετική και αφαιρετική σύνθεση και η διαμόρφωση δαχτυλιδιού. Δημιουργήθηκαν συνολικά 6 synths:

1. *synth_alpha*: αποτελεί το σημαντικότερο όργανο της ενορχήστρωσης και εκτελεί τις βασικές μελωδίες. Ο ήχος του είναι τύπου “lead string pad”.
2. *synth_meditation*: Ο ρόλος του είναι η δημιουργία αίσθησης ηρεμίας στο σύνολο εκτελώντας λίγες νότες με μεγάλη διάρκεια (sustain), μεγάλο χρόνο έναρξης (attack) και μεγάλο χρόνο “σβησίματος” (release). Η κατασκευή του βασίζεται σε ημιτονοειδή σήματα με εφέ αντηχήσεων και λευκό θόρυβο.
3. *synth_hihat*: προσομοιώνει τον ήχο ενός πιατινιού hi hat και χρησιμοποιείται για την ρυθμική ενίσχυση του συνόλου. Στηρίζεται σε γεννήτριες θορύβου με κατάλληλη διαμόρφωση του συχνοτικού φάσματος και της δυναμικής περιβάλλουσας.
4. *synth_kick*: προσομοιώνει ήχο κάσας και βοηθάει (όπως και το *synth_hihat*) στο να αποδίδει τον ρυθμό και το μέτρο. Η τονικότητα του είναι σταθερή.
5. *synth_c1* και *synth_c2* (chord synth): είναι δύο πανομοιότυπα synths που παράγουν αρμονικές διτονικές συγχορδίες. Ο ήχος τους θυμίζει μεταλλικά καμπανάκια με καθαρές αρμονικές.
6. *synth_mindpower_arg*: χρησιμοποιείται ως εκτελεστής αρπές τύπου “soft pad” και ακούγεται μόνο με συγκεκριμένες μορφές δεδομένων.

Τα synths διαθέτουν μεταβλητά ορίσματα/παραμέτρους, όπως η θεμελιώδης συχνότητα, η φάση, οι αρμονικές, η στάθμη γεννητριών, τα ηχητικά εφέ και φίλτρα. Για τον αυτοματοποιημένο έλεγχο τους υλοποιήθηκαν έξι ρουτίνες λογισμικού που αντιστοιχούν τα δεδομένα εισόδου σε τιμές παραμέτρων για τον έλεγχο της ροής των μουσικών φθόγγων, των μελωδιών, των ηχοχρωμάτων, των δυναμικών χαρακτηριστικών, της οκτάβας, των εφέ, της στάθμης, της τετραφωνικής θέσης, του κουρδίσματος κτλ.

2. Ηχητική Αναπαράσταση Δεδομένων

Η τεχνική με την οποία γίνεται εισαγωγή δεδομένων σε ένα σύστημα με σκοπό την ενεργοποίηση ηχητικών σημάτων (ως απάντηση στα δεδομένα) ονομάζεται “ηχητική αναπαράσταση δεδομένων” (Data Sonification) [6]. Βιβλιογραφικά, ορίζονται τρεις κατηγορίες τέτοιων τεχνικών: η Εικονική (Iconic Sonification), η Άμεση (Direct Conversion) και η Μουσική (Musical Sonification) [7]. Η τελευταία χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: 1) Αναπαράσταση με βάση ένα συγκεκριμένο

μοντέλο ήχου (Model-Based Sonification) και 2) Σύνδεση δεδομένων σε παραμέτρους ενός ήχου ή μιας ηχητικής σύνθεσης (Parameter-Mapping Sonification) [8]. Η τελευταία μέθοδος είναι και αυτή που ακολουθήθηκε στο *Mental Palindrome* δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον συμμετέχοντα μουσικό να αλληλεπιδράσει με μία μουσικά φιλική σύνθεση και με συγκεκριμένη αισθητική.

3.1 Αναγνώριση και ηχοποίηση συναισθηματικής κατάστασης χρήστη

Η συναισθηματική κατάσταση του χρήστη επηρεάζει την μουσική κλίμακα, με βάση την στερεοτυπική αντίληψη ότι οι ματζόρε κλίμακες ακούγονται “χαρούμενες” και οι μινόρε “λυπηρές”. Τα αποτελέσματα ερευνών υποστηρίζουν αυτή η συναισθηματική απόκριση είναι επίκτητη και όχι εγγενής [9], αλλά στην παρούσα εργασία αποτελεί μια εύκολα κατανοητή και αντικειμενική οδό ως βάση συσχετισμού. Συγκεκριμένα, οι καταγραφόμενες συναισθηματικές καταστάσεις του χρήστη αντιστοιχίζονται σε μουσικές κλίμακες ως εξής:

ΑΓΝΩΣΤΟ -> Αινιγματική κλίμακα (Enigmatic, C, Db, E, F#, G#, A#, B): συνδυάζονται στοιχεία από τη Μείζονα και την Ελάσσονα κλίμακα δημιουργώντας μια «ασαφή» αίσθηση.

ΧΑΡΑ-> Μείζονα Πεντατονική (Major Pentatonic, C, D, E, G, A), η οποία περιγράφεται ως «χαρούμενη», ενώ η επιλογή της πεντατονικής εκδοχής έγινε με σκοπό την διευκόλυνση του χρήστη στον αυτοσχεδιασμό, ώστε να ενθαρρυνθεί το αίσθημα ικανοποίησης και χαράς.

ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ -> Μείζονα (Major: C, D, E, F, G, A, B), η οποία προσφέρει την ικανοποίηση της ολοκλήρωσης της κλίμακας σε σχέση με την πεντατονική.

ΔΥΣΑΡΕΣΚΕΙΑ -> Ελάσσονα (Minor: C, D, D#, F, G, G#, A#), η οποία επιλέχθηκε ως αντίθετο της Μείζονος που εκφράζει ικανοποίηση.

ΑΓΧΟΣ -> Χρωματική Κλίμακα (Chromatic: C, C#, D, D#, E, F... B), η οποία αποτελείται και από τους 12 φθόγγους και επιλέχθηκε για να ενισχύσει το αίσθημα του άγχους αφού ο χρήστης είναι αδύνατο να δημιουργήσει αρμονικές σχέσεις με τον αυτοσχεδιασμό του.

Λόγω της βιολογικής τους προέλευσης οι εκφράσεις του προσώπου θεωρούνται μία παγκόσμια γλώσσα έκφρασης των συναισθημάτων και η επιστημονική τους τεκμηρίωση ξεκινάει από τον Κάρολο Δαρβίνο [10]. Η υπόθεση ότι και τα 6 βασικά συναισθήματα (χαρά, έκπληξη, φόβος, αηδία, θυμός και θλίψη) εκφράζονται παγκοσμίως με τον ίδιο τρόπο, πλέον αμφισβητείται και πιστεύεται ότι εξαρτάται από το πολιτισμικό υπόβαθρο του ανθρώπου [11]. Παρ’ όλα αυτά και ανεξάρτητα από την ορθότητα της παραπάνω υπόθεσης, είναι γεγονός ότι ο άνθρωπος εκφράζει υποσυνείδητα την πνευματική του κατάσταση μέσω του σώματος και του προσώπου του, αλλά και συνειδητά με σκοπό την επικοινωνία του με άλλους ανθρώπους. Ο αλγόριθμος του *Mental Palindrome* συνδυάζει την καταμέτρηση συγκεκριμένων εκφράσεων του προσώπου όπως π.χ. το χαμόγελο με τα επίπεδα των δεικτών Affectiv (βλ. ενότητα 3.2). Για παράδειγμα, εάν τα επίπεδα ενθουσιασμού είναι υψηλά και ο χρήστης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών χαμογελάει (ή γελάει συχνά), τότε συμπεραίνεται ότι είναι χαρούμενος. Αν ο ενθουσιασμός συνδυάζεται με σφίξιμο των δοντιών ή συνοφρύωμα τότε διαπιστώνεται μια κατάσταση άγχους.

3.2 Επίπεδα δεικτών Affectiv

Για την υλοποίηση του συστήματος, αξιοποιήθηκαν τα ακόλουθα επίπεδα δεικτών Affectiv: Το επίπεδο συγκέντρωσης (engagement) ελέγχει το αριθμό των φθόγγων που θα εκτελέσει το synth_alpha αλλά και την ρυθμική πολυπλοκότητα της συνολικής σύνθεσης κατά τη διάρκεια ενός μουσικού κύκλου (4 μέτρα ή 16 περίπου δευτερόλεπτα). Αντιστρόφως το επίπεδο του ενθουσιασμού (excitement) επηρεάζει την ποικιλία των μελωδιών και των δυναμικών. Το επίπεδο διαλογισμού (meditation) ελέγχει συνεχώς τις παραμέτρους των εφέ αντηχήσεων που χρησιμοποιούνται σε όλα τα synths καθώς και την στάθμη του synth_meditation στο ηχητικό σύνολο. Όσο υψηλότερο το επίπεδο διαλογισμού του χρήστη, τόσο μεγαλύτερη η τιμή της προσομοίωσης μεγέθους δωματίου και το επίπεδο μίξης των εφέ αντηχήσεων στον συνολικό ήχο. Επιπλέον όσο μεγαλύτερο το επίπεδο διαλογισμού τόσο μεγαλύτερη και η στάθμη της γεννήτριας λευκού θορύβου του synth_meditation.

Το επίπεδο σύγχυσης (frustration) του χρήστη ελέγχει την ακρίβεια κουρδίσματος των φθόγγων που παράγουν όλα τα synths. Για παράδειγμα, η νότα A ορίζεται στην συχνότητα 440Hz. Εάν ο χρήστης δεν είναι συγχυσμένος ($frustration < 0.2$) τότε το κούρδισμά της θα είναι ακριβές. Εάν ο χρήστης είναι συγχυσμένος ($frustration > 0.2$) τότε η νότα θα ηχησει ελαφρώς ξεκούρδιστη (με έως 2Hz απόκλιση). Εάν ο χρήστης είναι πολύ συγχυσμένος ($frustration > 0.8$) τότε η απόκλιση φτάνει μέχρι και 10Hz με αποτέλεσμα το άκουσμα μίας πολύ δυσαρμονικής και παράφωνης σύνθεσης.

Παράλληλα γίνεται συμπληρωματική χρήση κάποιων μη σημαντικών μετρήσεων (π.χ. βλεφαρίσματα χρήστη) σε ηχητικά εφέ της σύνθεσης που όμως αποτελούν διακοσμητικό στοιχείο και απλά συμβάλουν στην ποικιλία της διάδρασης.

3.3 Λοιπές διαδικασίες ηχοποίησης

Όταν ο χρήστης εκτελεί την ορισμένη σκέψη (π.χ. “σπρώξε”), η στάθμη έντασης του synth_mindpower_arf ενεργοποιείται και όσο πιο έντονη η σκέψη, τόσο μεγαλύτερη η έκταση και η πολυπλοκότητα του αρπέζ. Έτσι, κάθε φορά που ξεκινάει ένα καινούργιο μουσικό μέτρο ακούγεται το αποτέλεσμα της σκέψης στο προηγούμενο μουσικό μέτρο.

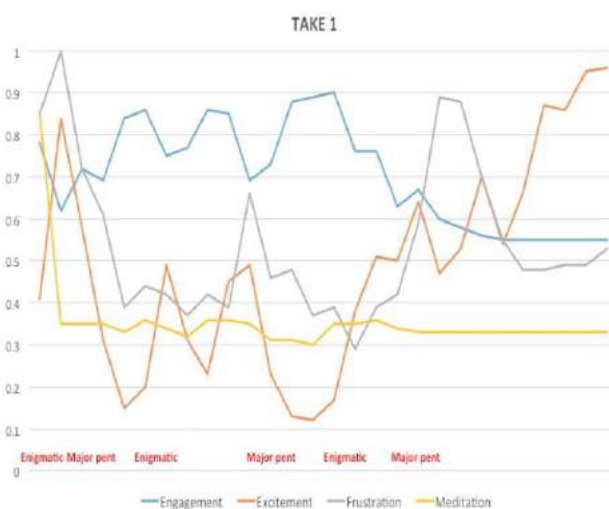
Επιπροσθέτως, η θέση του κύριου συνθεσάιζερ (synth_alpha) στο τετραφωνικό σύστημα αναπαραγωγής ήχου καθορίζεται από τη θέση του κεφαλιού του χρήστη. Το γυροσκόπιο δίνει τη κίνηση σε άξονα x/y στην οθόνη του υπολογιστή με την αυτόματη κίνηση του κέρσορα. Εντοπίζοντας την θέση του κέρσορα στην οθόνη γίνεται εφικτή η αντιστοίχιση με τη θέση του ήχου στο τετραφωνικό σύστημα. Η συγκεκριμένη λειτουργία αποτελεί την μόνη άμεση εντολή ελέγχου από τον χρήστη στο σύστημα. Η θέση των υπόλοιπων ήχων στη τετραφωνία ακολουθεί είτε συγκεκριμένα μοτίβα, είτε είναι απολύτως τυχαία για κάθε νότα.

4. Αποτελέσματα

Για την επίδειξη του συστήματος και την λήψη αποτελεσμάτων από την χρήση του πραγματοποιήθηκε μια ειδική συνεδρία (<https://vimeo.com/257906643>), κατά την οποία ένας μουσικός κάθισε στο κέντρο του τετραφωνικού συστήματος αναπαραγωγής και φόρεσε το Ερος, αφού πρώτα ενημερώθηκε για την γενικότερη λειτουργία του. Στη συνέχεια, ο χρήστης κλήθηκε να συμπληρώσει κατάλληλα

δομημένο ερωτηματολόγιο για την αξιολόγηση της μουσικής σύνθεσης, αλλά και της συνολικής εμπειρίας. Από την αποδελτίωση του ερωτηματολογίου προέκυψε ότι η συνολική εμπειρία ήταν πολύ ψυχαγωγική και ενδιαφέρουσα, τόσο ως αυτοσχεδιασμός, όσο και ως αυτόνομη μουσική εμπειρία. Η τετραφωνία χαρακτηρίστηκε ως καταλυτικός παράγοντας «εμβύθισης», δημιουργώντας έναν ηχητικό θόλο απομόνωσης γύρω από τον χρήστη.

Ως προς τα επιμέρους αποτελέσματα, στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται το γράφημα της μεταβολής τεσσάρων δεικτών Affectiv (συγκέντρωση/εμβύθιση-μπλε, ενθουσιασμός-πορτοκαλί, εκνευρισμός/δυσaréσκεια-γκρι, διαλογισμός-κίτρινο) για έναν πλήρη κύκλο σύνθεσης (περίπου 16 δευτερόλεπτα). Από το γράφημα αυτό προκύπτει ότι ο ενθουσιασμός του χρήστη στην έναρξη της συνεδρίας είναι υψηλός (0.8) και στη συνέχεια και καθ' όλη τη διάρκεια μέχρι τα 3/4 της συνεδρίας παραμένει χαμηλός ανάμεσα από το 0.2 και 0.4 μέχρι και το τέλος όπου και τελικά εκτονώνεται φτάνοντας κοντά στο μέγιστο. Αντίστοιχα η συγκέντρωση/εμβύθιση του χρήστη ξεκινάει στο 0.6 και φτάνει στο 0.9 στην μέση περίπου της συνεδρίας. Από εκεί και πέρα ο δείκτης αυτός έχει σταθερά φθίνουσα πορεία όπου και καταλήγει κάτω από το 0.6 κατά τη λήξη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ο δείκτης Excitement και Frustration φαίνεται να είναι αντίστροφος του δείκτη Engagement. Με λίγα λόγια η συγκέντρωση του χρήστη είναι αντίστροφη του ενθουσιασμού του.



Σχήμα 4.1 Μεταβολή των τιμών τεσσάρων δεικτών Affectiv

Χαρακτηριστική είναι η στιγμή της συνεδρίας κατά την οποία ενεργοποιείται το γυροσκόπιο (που ελέγχει την θέση του synth_alpha στη τετραφωνία). Το σημείο αυτό είναι λίγο πριν την μέση του γραφήματος όπου φαίνεται η κορύφωση του Frustration και του Excitement και η πτώση του Engagement στο 0.7. Ο χρήστης ένιωσε αλλαγή στον ήχο και η συγκέντρωση του αποσπάστηκε. Αυτό προκάλεσε αλλαγές στη μουσική, αφού ο ρυθμός αυξήθηκε και οι νότες ξεκουρδίστηκαν απότομα. Αμέσως μετά φαίνεται στο γράφημα ότι ο χρήστης ξεπέρασε τον ενθουσιασμό του και ξανασυγκεντρώθηκε στον αυτοσχεδιασμό ακόμα περισσότερο. Ο χρήστης επιβεβαίωσε (κάτι που αποτυπώνεται και στο ερωτηματολόγιο που απαντήθηκε) ότι

είχε πράγματι άγχος κατά την έναρξη και ικανοποίηση/χαρά κατά τη λήξη. Επίσης δήλωσε ενθουσιασμένος κατά τη διάρκεια της συνεδρίας, αν και είναι πιθανό ότι στην περίπτωση αυτή μετέφρασε το αίσθημα ικανοποίησης ως ενθουσιασμό.

Ο δείκτης διαλογισμού (Meditation) είναι σχεδόν σταθερός (από 0.3 έως 0.4) και πιθανώς δεν σχετίζεται με καμία λειτουργία της αυτοσχεδιαστικής διαδικασίας. Παρ' όλα αυτά πιθανώς να διαφέρει από χρήστη σε χρήστη (κάτι το οποίο δεν δοκιμάστηκε στην παρούσα εργασία). Αντίστοιχα, υπάρχουν αμφιβολίες για την αξιοπιστία του δείκτη Frustration μιας και τα επίπεδά του δεν ήταν χαμηλά και ο χρήστης δήλωσε ότι είχε άγχος παρά μόνο στην αρχή της συνεδρίας και ότι δεν είχε ξανά αρνητική διάθεση. Φαίνεται ότι ο δείκτης Frustration είναι πολύ ευαίσθητος σε μεταβολές ή ότι το εύρος των τιμών του κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα μόνιμα.

5. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Η ιδέα της συνδυαστικής ανάλυσης δεδομένων βιοανάδρασης και χρήση τους σε καλλιτεχνικές εφαρμογές, μέσα από την υλοποίηση και υλοποίηση του Mental Palindrome αποδείχθηκε ότι είναι ρεαλιστική και εφικτή, επιτυγχάνοντας μάλιστα αποδεκτούς όρους ποιότητας τόσο του τελικά αναπαραγόμενου μουσικού περιεχομένου, αλλά και της συνολικής εμπειρίας του μουσικού εκτελεστή/ χρήστη. Ανοίγονται ως εκ τούτου νέα διαθεματικά πεδία στον τομέα της ηχητικής και μουσικής τέχνης, τα οποία ενδεχομένως μπορούν να αξιοποιηθούν σε πληθώρα εναλλακτικών εφαρμογών, όπως η ψυχαγωγία, η εκπαίδευση αλλά και η θεραπεία με χρήση ήχου. Η καλλιτεχνική προοπτική του Mental Palindrome οριοθετήθηκε με σαφή τρόπο μέσα από την διαδικασία της επίδειξης και αξιολόγησης του συστήματος, αποδεικνύοντας ότι ο μουσικός αυτοσχεδιασμός μπορεί να πάρει πολλαπλές μορφές καλλιτεχνικής έκφρασης. Πρόσθετες συνεδρίες με μουσικούς θα μπορούσαν στο μέλλον να δώσουν περισσότερο χειροπιαστά και τεκμηριωμένα αποτελέσματα.

Προφανώς, η μέθοδος της αναγνώρισης της ψυχολογικής διάθεσης του χρήστη με βάση την συνδυαστική ανάλυση εκφράσεων του προσώπου και συγκεκριμένων εγκεφαλικών καταστάσεων (ενθουσιασμός, διαλογισμός, εκνευρισμός, συγκέντρωση κτλ) θέτει ερωτήματα ως προς τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου σε πιο συστηματικό επίπεδο και όχι μόνο σε επίπεδο πειραματισμού. Παράλληλα, ο συνδυασμός ακόμα περισσότερων δεδομένων βιοανάδρασης (π.χ. καρδιογράφημα) θα βοηθούσε ακόμα περισσότερο στην βελτιωμένη εφαρμογή της ιδέας.

Τέλος, όσον αφορά στην ηχητική αναπαράσταση των δεδομένων, σε μελλοντική έκδοση του Mental Palindrome, σχεδιάζεται να δημιουργηθούν πρόσθετα synths, τα οποία θα ενεργοποιούνται μαζί με τις αντίστοιχες συναισθηματικές καταστάσεις όταν αυτές αναγνωρίζονται από το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο το "συναίσθημα" δεν θα αναπαρίσταται μόνο μέσω των φθόγγων και τον φράσεων που επιλέγονται, αλλά και μέσω της χαρακτηριστικής χροιάς των ήχων.

6. Αναφορές

[1] E. R. Miranda, and A. Brouse, "Interfacing the Brain Directly with Musical Systems: On Developing Systems for Making Music with Brain Signals", Leonardo, vol. 38, issue 4, pp. 331-336 (2005)

- [2] T. Hinterberger, “Orchestral Sonification of Brain Signals and its Application to Brain-Computer Interfaces and Performing Arts”, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Interactive Sonification, York, UK, February 3* (2007)
- [3] S. Sanei and J A. Chambers, *EEG Signal Processing*, John Wiley and Sons Ltd, pp. 21 (2007)
- [4] S. L. Graux, and P. Verschure, “Neuromuse: Training your Brain through Musical Interaction”. *Proceedings of the 15th International Conference on Auditory Display, Copenhagen, Denmark May 18 – 22* (2009)
- [5] <https://www.emotiv.com/epoc/>
- [6] R. McGee. “Auditory Displays and Sonification: Introduction and Overview”. The University of California, Santa Barbara, MAT 200C, June (2009)
- [7] T. Hermann and A. Hunt, “An Introduction to Interactive Sonification”. IEEE Computer Society 21, April-June (2005)
- [8] A. Alpern, *Techniques for Algorithmic Composition of Music*. Hampshire College (1995)
- [9] A. H. Gregory, L. Worrall and A. Sarge, “The Development of Emotional Responses to Music in Young Children”, *Motivation and Emotion*, vol. 20, no. 4 (1996)
- [10] C. Darwin, *The Expression of the Emotions in Man and Animals*. D Appleton and Company (1897)
- [11] R. E. Jack, O. G. B. Garod, H. Yu, R. Caldara and P. G. Schyns, “Facial Expressions of Emotion are not Cultural Universal”, J. L. McClelland, Ed., Stanford University, March 19 (2012)

Θεωρητική μελέτη της χρήσης ράβδων σαν ιδιόφωνα μουσικά όργανα

Σπύρος Κουζούπης

Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής
ΤΕΙ Κρήτης
skouzo@staff.teicrete.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την προοπτική της εφαρμογής στα ιδιόφωνα μουσικά όργανα, όπως π.χ. μεταλλόφωνο, ξυλόφωνο, μαρίμπα, βιμπράφωνο, μελετώνται και αναλύονται διάφορες περιπτώσεις ράβδων κυρίως ως προς τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές που παρουσιάζουν. Οι ράβδοι μοντελοποιούνται με βάση το μοντέλο Euler-Bernoulli αλλά και το μοντέλο του Rayleigh, το οποίο λαμβάνει υπόψη την αδράνεια στρέψης. Για τη λύση του προβλήματος των ιδιοτιμών παρουσιάζεται μία προσεγγιστική αριθμητική μέθοδος που βασίζεται στα πολώνυμα Chebyshev, ενώ η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχεται συγκρίνοντας τις εξαγόμενες ιδιοτιμές με τις ιδιοτιμές που προκύπτουν από αναλυτικές σχέσεις, σε αρκετές περιπτώσεις που αυτό είναι εφικτό. Για τις τρεις πρώτες ιδιοσυχνότητες που μας ενδιαφέρουν από μουσικής πλευράς, η ακρίβεια της μεθόδου φτάνει μέχρι και τα 2 δεκαδικά ψηφία όταν οι όροι της δυναμοσειράς φτάνουν τους 10. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις σχέσεις των εγκάρσιων ιδιοσυχνοτήτων στην ελεύθερη-ελεύθερη ράβδο με σκοπό οι λόγοι της 2^{ης} και της 3^{ης} ιδιοσυχνότητας σε σχέση με την 1^η, να πλησιάζουν οποιουδήποτε λόγους μιας αρμονικής ακολουθίας. Στα πραγματικά ιδιόφωνα μουσικά όργανα, στα οποία το κούρδισμα γίνεται με πρακτικό τρόπο σμιλεύοντας τις ράβδους, οι λόγοι αυτοί έχουν σχέσεις 1:3:6, ή 1:3:8, ή 1:4:9.8. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου αλλάζει σύμφωνα με πολώνυμα 2ου και 3ου βαθμού αντίστοιχα, ή αλλάζουν και οι δύο ομοιόμορφα σύμφωνα με ένα τριώνυμο, διατηρώντας συμμετρική ή μη συμμετρική μορφή σε σχέση με το κέντρο της ράβδου. Χρησιμοποιώντας σαν παραμέτρους τους συντελεστές των πολυωνύμων εξετάζουμε πως αλλάζουν οι λόγοι των συχνοτήτων του 2ου και του 3ου εγκάρσιου τρόπου σε σχέση με τον 1ο. Βρίσκεται ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι λόγοι λαμβάνουν ακέραιες τιμές, γεγονός που έχει πρακτική σημασία στην μουσική απόδοση μίας ράβδου.

Theoretical approach on the use of beams as musical idiophones

ABSTRACT

With the prospect of applying the results to musical idiophones such as the keys of vibraphone, xylophone or marimba, several cases of functionally graded beams are

investigated mainly with regard to the eigenfrequencies they present. The bars can be modeled using either the Euler-Bernoulli or the Rayleigh model. In order to solve the eigenvalue problem an approximate method based on the Chebyshev polynomials is presented. To validate the method several cases found in the literature of uniform, nonuniform and functionally graded beam boundary value problems that have exact solutions, were used as benchmarks. We assume that the density of the beam varies either according to a trinomial and the Young modulus according to a 6th degree polynomial or to a trinomial. By varying the polynomial coefficients we are seeking integer ratios of the 3rd and 2nd bending mode eigenfrequency with respect to the primary vibrational mode. In most commercial instruments the tuning is done empirically by sculpting an arch on the underside of the bar. This way the frequencies are tuned in most cases to ratios 1:3:6, or 1:3:8, or 1:4:9.8. By varying the polynomial coefficients one at a time while keeping the rest of them constant we plot the frequency ratios. With this process we can detect cases where both frequency ratios reach integer values which pertain to a musically useful bar.

Εισαγωγή

Όσα αναφέρονται σε αυτή την εργασία σχετίζονται με τα μελωδικά κρουστά, τα ιδιόφωνα μουσικά όργανα τα οποία συνίστανται από σκληρά υλικά όπως διάφορα μέταλλα, ξύλο ή και συνθετικά υλικά. Αποκαλούνται ιδιόφωνα διότι σε αντίθεση με τα μεμβρανόφωνα δεν χρειάζεται να φέρουν κάποιον ειδικό μηχανισμό ώστε να βρεθούν υπό τάση για να παράξουν ήχο (όπως πχ. τα τύμπανα). Ειδικότερα όσα εδώ αναφέρονται σχετίζονται με το βιμπράφωνο, το ξυλόφωνο, την μαρίμπα ακόμα και το Glockenspiel ή την bell lyra. Όλα αυτά τα όργανα φέρουν μία συλλογή από ράβδους, οι οποίες όταν κρουστούν παράγουν ένα απαλό, ευχάριστο και με σαφές τονικό ύψος ήχο (σε αντίθεση πχ. με τις καμπάνες). Το μοντέρνο ξυλόφωνο, η μαρίμπα και το βιμπράφωνο έχουν τις νότες-ράβδους διατεταγμένες με τον ίδιο τρόπο όπως τα πλήκτρα του πιάνου. Αποτελούν και βασικά όργανα του μέρους των κρουστών οργάνων σε μία συμφωνική ορχήστρα. Το ξυλόφωνο χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες στην Αφρική και στην Ασία και θεωρείται ένα από τα αρχαιότερα μελωδικά όργανα. Επειδή θα μελετήσουμε τις ιδιότητες και τις ιδιαιτερότητες των δονήσεων και των ιδιοσυχνοτήτων μελετώντας μία τέτοια ράβδο μεμονωμένα, θα αναφερόμαστε στη ράβδο αυτή χρησιμοποιώντας τις λέξεις ράβδος ή μπάρα ή κλειδί ή πλήκτρο πχ. της μαρίμπας.

Διεγείροντας μία μπάρα της μαρίμπας με κρούση, αυτή δονείται σε πολύπλοκα σχήματα και παράγει έναν ήχο με μοναδικό χαρακτήρα. Οι τρόποι δόνησης όπως μπορεί εύκολα να δειχθεί και πειραματικά είναι αρκετοί (>15). Όπως είναι λογικό με την κρούση μπορούν να διεγερθούν και διαμήκεις τρόποι και στρωφικοί τρόποι, αλλά οι κύριοι τρόποι είναι οι εγκάρσιοι, οι οποίοι συνεισφέρουν και τα μέγιστα στην παραγόμενη ηχητική ενέργεια, οπότε με αυτούς θα ασχοληθούμε εδώ. Το κούρδισμα ενός κλειδιού μαρίμπας μπορεί να είναι στοιχειώδες (να αφορά μόνο έναν τρόπο δόνησης) ή πιο σύνθετο (να αφορά αρκετούς τρόπους δόνησης). Στις αρχές του 20ου αιώνα, οι εμπορικές μαρίμπες κούρδιζαν μόνο τη θεμέλιο και κατά το 1920 άρχισε να κουρδίζεται η θεμέλιος και η επόμενη συνιστώσα (που αντιστοιχεί στο δεύτερο εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης). Αφού η εξέλιξη αυτή απέφερε ένα περισσότερο ποθητό ήχο, αργότερα οι επαγγελματίες κατασκευαστές μαρίμπας άρχισαν να περιλαμβάνουν στο κούρδισμα τους και τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο ταλάντωσης, μια διαδικασία που

συχνά ονομαζόταν τριπλό κούρδισμα. Στις καλύτερες σύγχρονες μαρίμπες χρησιμοποιείται το τριπλό κούρδισμα (αν και όχι σε όλη την έκταση του οργάνου). Υπάρχουν επίσης διαφορές και ως προς τους λόγους συχνοτήτων που επιχειρούν να πετύχουν οι διάφοροι κατασκευαστές. Οι πλέον διαδεδομένες σχέσεις μεταξύ των συχνοτήτων για τον δεύτερο εγκάρσιο και τον τρίτο εγκάρσιο τρόπο σε σχέση με τον πρώτο είναι: 1:3:6 ή 1:4:8 ή 1:4:9, αν και από πειράματα που έχουν γίνει με συντεθειμένους ήχους μαρίμπας υπάρχει μία προτίμηση στους λόγους 1:4:9.8 [1,2].

Ο λόγος της 2^{ης} προς την 1^η συχνότητα για μία μπάρα που είναι ομοιόμορφη και έχει ορθογώνια διατομή, είναι 2.76 [2]. Εκτός βέβαια από τους εγκάρσιους τρόπους υπάρχουν και διεγείρονται και άλλοι, όπως είναι οι διαμήκεις τρόποι, οι στροφικοί τρόποι και οι εγκάρσιοι στο οριζόντιο επίπεδο της ράβδου. Επειδή την περισσότερη ηχητική ενέργεια την παράγουν οι εγκάρσιοι τρόποι με αυτούς θα ασχοληθούμε εδώ. Αυτό που έχει επικρατήσει και το οποίο γίνεται με εμπειρικό τρόπο είναι να αφαιρείται υλικό από το κάτω κεντρικό μέρος της ράβδου, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα να χαμηλώνεται η συχνότητα του 1^{ου} τρόπου οπότε ειδικά για τις χαμηλόφωνες νότες δεν απαιτούνται και πολύ μεγάλα σε μέγεθος πλήκτρα. Η παρέμβαση αυτή όταν γίνεται με τον κατάλληλο τρόπο, έχει επίσης ως αποτέλεσμα το κούρδισμα του 2^{ου} αλλά πολλές φορές και του 3^{ου} τρόπου ταλάντωσης στους προαναφερθέντες λόγους, [3]. Αυτό συνήθως επιτελείται αλλά είναι και εφικτό στις μπάσες νότες. Στην μεσαία περιοχή του οργάνου συνήθως βρίσκουμε ότι μόνο ο 2^{ος} τρόπος κουρδίζεται ενώ στην υψηλή περιοχή κουρδίζεται μόνον η θεμέλιος.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι σε πρώτη φάση να παρουσιάσει τα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δόνηση μίας ράβδου πχ. ξυλόφωνου, μαρίμπας ή βιμπράφονου και μεταλλόφωνου. Με βάση τις εξισώσεις αυτές παρουσιάζεται μία μέθοδος για την εύρεση των ιδιοτιμών και επικεντρωνόμαστε στους λόγους συχνοτήτων του 3^{ου} και του 2^{ου} εγκάρσιου τρόπου σε σχέση με τη συχνότητα του 1^{ου}. Εξετάζονται περιπτώσεις όπου η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου αλλάζει σύμφωνα με πολυώνυμα 2^{ου} και 6^{ου} βαθμού αντίστοιχα, ή αλλάζουν και οι δύο ομοιόμορφα σύμφωνα με ένα τριώνυμο, διατηρώντας συμμετρική μορφή ή μη συμμετρική μορφή σε σχέση με το κέντρο της ράβδου. Χρησιμοποιώντας σαν παραμέτρους τους συντελεστές των πολυωνύμων εξετάζουμε πως αλλάζουν οι λόγοι των συχνοτήτων και οι θεμέλιες συχνότητες όταν μεταβάλλουμε μερικούς από αυτούς.

1. Μοντελοποίηση των ράβδων της μαρίμπας.

Υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία σχετική με τη δυναμική κίνηση μίας ράβδου, μιας και το πρόβλημα αυτό βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιοχές της μηχανικής. Το βασικό μοντέλο είναι αυτό του Euler-Bernoulli το οποίο λαμβάνει υπόψη την ακαμψία που παρουσιάζει η ράβδος αλλά αγνοεί την επίδραση της αδράνειας στρέψης και την επίδραση των διατμητικών τάσεων. Εάν λάβουμε υπόψη τα δύο αυτά φαινόμενα καταλήγουμε στην εξίσωση του Rayleigh και του Timoshenko, αντίστοιχα. Εδώ σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με τα δύο πρώτα μοντέλα για να εκτιμήσουμε τις ιδιοσυχνότητες σε διάφορες περιπτώσεις μη ομογενών ράβδων. Αυτό δικαιολογείται με κάποιο τρόπο από το γεγονός ότι τα φαινόμενα τα οποία περιλαμβάνει το μοντέλο του Timoshenko έχουν επίδραση στα αποτελέσματα όταν έχουμε να κάνουμε με ράβδους όπου το πάχος (καθ' ύψος της ράβδου, στην περίπτωση μας), αρχίζει να γίνεται συγκρίσιμο με το μήκος της. Στην περίπτωση των

ράβδων των μουσικών οργάνων με τα οποία ασχολούμαστε εδώ, αυτό δεν ισχύει για τη χαμηλή και την μεσαία περιοχή του οργάνου, αλλά μόνο στις οξύτερες νότες. Σε αυτή όμως την περιοχή ούτως ή άλλως οι ανώτεροι τρόποι ταλάντωσης δεν κουρδίζονται στην πράξη αφού τυγχάνει να βγαίνουν εκτός του ακουστού φάσματος. Ως εκ τούτου σφάλματα στην εκτίμηση των λόγων συχνοτήτων σε αυτή την περιοχή αφορούν τους ανώτερους τρόπους και δεν έχουν επίπτωση στην πράξη. Αυτός είναι ένας λόγος για τον οποίο θα επικεντρωθούμε στα δύο πρώτα μοντέλα. Άλλος λόγος είναι ότι για τα μοντέλα αυτά υπάρχουν περισσότερες περιπτώσεις που αφορούν στη μορφή (το σχήμα) της ράβδου, αλλά και στις συναρτησιακές σχέσεις της πυκνότητας και του μέτρου ελαστικότητας του Young, για τις οποίες υπάρχουν ακριβείς λύσεις. Έτσι για κάποιες περιπτώσεις από αυτές, λύνοντας το πρόβλημα των ιδιοτιμών με την μέθοδο που προτείνουμε, μπορούμε να ελέγξουμε την ακρίβεια της μεθόδου προτού επιχειρήσουμε να λύσουμε πιο περίπλοκα προβλήματα που αφορούν στις ράβδους. Επειδή το μοντέλο του Euler-Bernoulli προκύπτει από το μοντέλο του Rayleigh χρησιμοποιούμε στην παρουσίαση το μοντέλο του Rayleigh. Γενικά αν έχουμε μία ράβδο η οποία εκτείνεται κατά μήκος του άξονα x , η εγκάρσια μετατόπιση της δίδεται από το $y(x)$ και δεν είναι απαραίτητα ομοιόμορφη ούτε ομοιογενής, δηλαδή η πυκνότητα της, το εμβαδόν διατομής, η ροπή αδρανείας της διατομής και το μέτρο ελαστικότητας του Young, δίδονται αντίστοιχα από τα: $\rho(x)$, $S(x)$, $I(x)$, $E(x)$, τότε αν στη ράβδο δεν ασκείται καμία εξωτερική δύναμη, η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση θα δίδεται από τη σχέση (1).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[E(x) I(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \rho(x) S(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho(x) I(x) \frac{\partial^3 y}{\partial x \partial t^2} \right] = 0 \quad (1)$$

Εάν αγνοήσουμε την επίδραση της ροπής στρέψης (δηλ. $\rho(x)I(x) = 0$) η εξίσωση (1) απλοποιείται σε αυτή των Euler-Bernoulli. Για την ελεύθερη κίνηση της ράβδου λαμβάνουμε την μετατόπιση ως $y(x, t) = Y(x) e^{j\omega t}$ και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1) καταλήγουμε στην εξίσωση (2).

$$A_2(x) \frac{d^2 Y}{dx^2} + A_3(x) \frac{d^3 Y}{dx^3} + A_4(x) \frac{d^4 Y}{dx^4} + \omega^2 B_0(x) Y + \omega^2 B_1(x) \frac{dY}{dx} + \omega^2 B_2(x) \frac{d^2 Y}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Όπου } A_2 = [E(x) I(x)]'' , \quad A_3 = 2[E(x) I(x)]' , \quad A_4 = E(x) I(x) \quad \text{και} \\ B_0 = -\rho(x) S(x) , \quad B_1 = [\rho(x) I(x)]' , \quad B_2 = \rho(x) I(x)$$

Για να προσδιορίσουμε τις φυσικές συχνότητες απαιτούνται και οι συνοριακές συνθήκες. Στην περίπτωση μας, θεωρούμε ότι η ράβδος είναι ελεύθερη και στα δύο άκρα, όπου οι διαμητικές δυνάμεις και η ροπή στρέψης θα πρέπει να είναι μηδέν. Δηλαδή θα έχουμε και στα δύο άκρα: $\frac{d^2 Y}{dx^2} = 0$ και $\frac{d}{dx} [E(x) I(x) \frac{d^2 Y}{dx^2}] = 0$

Το πρόβλημα όπως εκφράζεται από την εξίσωση (2) αποτελεί ένα γενικευμένο πρόβλημα ιδιοτιμών. Εάν η ράβδος εκτείνεται στο διάστημα $(0, L)$ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα πολυώνυμα Chebyshev με τα οποία θα αναπτύξουμε τη λύση $Y(x)$ και θα αναζητήσουμε τους συντελεστές α_i . Με την αλλαγή μεταβλητής $x = (\xi + 1) L/2$ τα πολυώνυμα Chebyshev από το πεδίο ορισμού $(-1, 1)$ στο $(0, L)$, παίρνουν την μορφή: $T_0(x) = 1$, $T_1(x) = 2x/L - 1$, $T_{i+1}(x) = 2(2x/L - 1) T_i(x) - T_{i-1}(x)$. Η ανάπτυξη της λύσης εκφράζεται ως:

$$Y(x) = \sum_{i=0}^N a_i T_i(x) \quad , \quad 0 \leq x \leq L \quad (3)$$

Οι άγνωστοι συντελεστές a_i μπορούν να προσδιοριστούν από τη βασική εξίσωση και τις συνοριακές συνθήκες, ενώ N είναι ο μέγιστος αριθμός που φτάνει ο βαθμός των πολυωνύμων. Εφαρμόζοντας τη σχέση (3) στις συνοριακές συνθήκες και στα δύο άκρα παίρνουμε 4 γραμμικές εξισώσεις ως προς τους άγνωστους συντελεστές a_0, a_1, \dots, a_N . Για τον πλήρη προσδιορισμό απαιτούνται ακόμη $N-3$ ανεξάρτητες γραμμικές εξισώσεις για να προσδιοριστούν οι συντελεστές a_i . Αντικαθιστώντας το ανάπτυγμα της λύσης (3) με τα μετατοπισμένα πολυώνυμα στην (2), οι παράγωγοι της (3) καταλήγουν σε παραγωγίσεις των $T_i(x)$, οπότε η (2) παίρνει τη μορφή:

$$\sum_{i=0}^N a_i \left[A_2(x) \frac{d^2 T_i(x)}{dx^2} + A_3(x) \frac{d^2 T_i(x)}{dx^2} + \dots + \omega^2 B_2(x) \frac{d^2 T_i(x)}{dx^2} \right] = 0 \quad (4)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε την (4) επί $T_j(x)$ διαδοχικά για $j = 0, 1, 2, \dots, N-4$ και χρησιμοποιήσουμε την ορθογωνιότητα των πολυωνύμων Chebyshev (ολοκληρώνοντας από 0 έως L) καταλήγουμε συνοπτικά σε σχέσεις της μορφής,

$$\sum_{i=0}^N [K_{ji} + \omega^2 \Lambda_{ji}] a_i = 0, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-4 \quad (5)$$

$$\text{όπου } K_{ji} = \int_0^L \left[\sum_{n=2}^4 A_n(x) T_i^{(n)}(x) T_j(x) \right] dx \quad (6)$$

$$\text{και } \Lambda_{ji} = \int_0^L \left[\sum_{n=0}^2 B_n(x) T_i^{(n)}(x) T_j(x) \right] dx \quad (7)$$

Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τώρα $N+1$ εξισώσεις οι οποίες σχηματίζουν ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων ως προς τους άγνωστους συντελεστές a_i , $i = 0, 1, 2, \dots, N$. Το σύστημα μπορεί να γραφτεί υπό μορφή πινάκων ως:

$$(\mathbf{K} + \omega^2 \mathbf{\Lambda}) [a_0, a_1, \dots, a_N]^T = 0 \quad (8)$$

Για να έχει μη τετριμμένη λύση το σύστημα, η ορίζουσα των συντελεστών πρέπει να είναι μηδέν, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει:

$$\det(\mathbf{K} + \omega^2 \mathbf{\Lambda}) = 0 \quad (9)$$

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση για τις ιδιοτιμές, της φυσικής συχνότητας ω για μία ράβδο (σύμφωνα με το μοντέλο Rayleigh), η οποία γενικά μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη ούτε και ομογενής. Είναι εύκολο με αυτή την μέθοδο να χειριστούμε και περιπτώσεις με διάφορες άλλες συνοριακές συνθήκες, αφού αρκεί να αλλάξουμε μόνο τις τέσσερις εξισώσεις που αφορούν τις συνοριακές συνθήκες.

2. Αποτελέσματα και σχόλια.

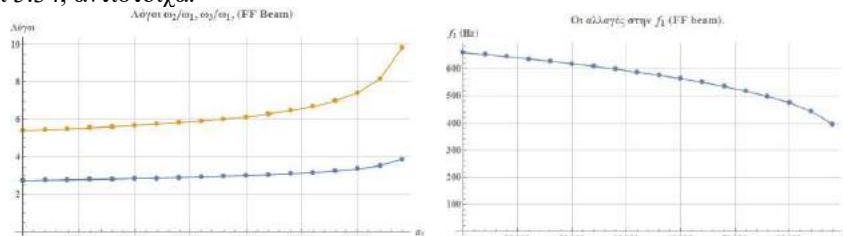
Αν και η σχετική με τις ράβδους βιβλιογραφία είναι εκτενής, είναι κάπως σπάνιο ανάμεσα στις διάφορες περιπτώσεις των συνοριακών συνθηκών που επιλέγονται για επίλυση, να υπάρχει και η περίπτωση της ελεύθερης-ελεύθερης ράβδου (πέραν των διδακτικών περιπτώσεων ομοιόμορφης ράβδου που υπάρχει σε αρκετά βιβλία ειδικά για το μοντέλο του Euler). Αυτό μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει ενδιαφέρον για περιπτώσεις στήριξης της ράβδου που έχουν έκδηλη πρακτικότητα. Για να εξετάσουμε την ακρίβεια της μεθόδου χρησιμοποιήσαμε και περιπτώσεις άλλων συνοριακών συνθηκών για τις οποίες έχουν εξαχθεί ακριβείς λύσεις. Για

συντομία αναφερόμαστε στην πακτωμένη στήριξη ως C (Clamped), στην ελεύθερη στήριξη ως F (Free) και στην απλή στήριξη ως P (Pinned). Επαληθεύσαμε πάρα πολλές περιπτώσεις ιδιοσυχνοτήτων για τους συνδυασμούς στήριξης CC, CP, PF, PP και CF που δίδονται σε πίνακες στις αναφορές [5,6,7,8].

Στην επίμαχη περίπτωση της ελεύθερης-ελεύθερης (FF) ράβδου χρησιμοποιήσαμε την μεθοδολογία του Elishakoff [4], ο οποίος για τις συνοριακές συνθήκες CF, CC, CP και για το μοντέλο του Euler, εξήγαγε αναλυτικές σχέσεις για τη χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα της ράβδου, με την προϋπόθεση ότι οι συναρτησιακές σχέσεις της πυκνότητας και του μέτρου ελαστικότητας της ράβδου είναι πολυώνυμα βαθμού m και m+4 αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική καταλήξαμε σε μία σχέση, η οποία δίνει την 1^η ιδιοσυχνότητα της ελεύθερης (FF) Euler-Bernoulli ράβδου, (δεν υπάρχει αρκετός χώρος εδώ για την παρουσίαση της διαδικασίας). Η σχέση είναι $\omega_1 = \sqrt{(2700 I_0 b_6)/(L^4 S_0 a_2)}$, όπου I_0 και S_0 είναι η ροπή αδρανείας και το εμβαδόν της κάθετης διατομής της ράβδου. Η ράβδος θεωρούμε ότι έχει ορθογώνια διατομή και μήκος L ενώ τα b_6 και a_2 είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές στα πολυώνυμα που περιγράφουν την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου:

$$\rho(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i \text{ και } E(x) = \sum_{i=0}^{m+4} b_i x^i. \text{ Εδώ έχουμε επιλέξει } m=2.$$

Εισάγοντας πραγματικά στοιχεία για τα φυσικά μεγέθη που υπεισέρχονται σε μία ορθογώνιας διατομής ράβδο αλουμινίου, έχουμε για την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας, $\rho_0 = a_0 = 2700 \text{ kg/m}^3$ και $E_0 = 7.1 \times 10^{10}$ αντίστοιχα, μήκος L=1 m, πλάτος w=5 cm και πάχος (ύψος) h=2 cm. Η ροπή αδρανείας για ορθογώνια διατομή δίνεται από τη σχέση: $I_0 = w h^3/12$. Τα δεδομένα αυτά, σύμφωνα με την παραπάνω θεωρητική σχέση για την ω_1 και με τις τιμές των $a_2 = 0.8$, $a_1 = -0.8$, $a_0 = 2700$ και $b_6 = 4.36 \times 10^6$, αντιστοιχούν σε μία ράβδο με φυσική συχνότητα $\omega_1 = 1401.24 \text{ rad/s}$. Με την προαναφερθείσα υπολογιστική μέθοδο βρίσκουμε ακριβώς την ίδια τιμή, ενώ οι λόγοι ω_2/ω_1 και ω_3/ω_1 έχουν τιμές 2.73 και 5.34, αντίστοιχα.

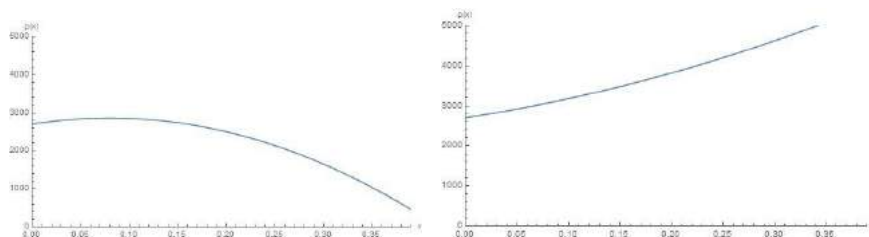


Σχήμα 1: Οι μεταβολές των λόγων και της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας όταν αλλάζει το a_2 .

Ακολουθώς θεωρούμε πάλι μία ορθογώνιας διατομής ράβδο από το ίδιο υλικό, η οποία έχει μήκος $L=0.4497 \text{ m}$, πλάτος $w=0.051 \text{ m}$ και πάχος $h=0.019 \text{ m}$. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά μίας ράβδου στην οποία όταν αφαιρεθεί μάζα κατάλληλα, μπορεί να καταλήξει στη νότα $A_3=220 \text{ Hz}$, [9]. Με τις τιμές αυτές θα εξετάσουμε πως μεταβάλλονται οι συχνότητες των πρώτων ιδιορυθμών και οι λόγοι των συχνοτήτων των δεύτερων και τρίτων ιδιορυθμών σε σχέση με τον πρώτο. Θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο. Ακολουθούν μία πολυωνυμική σχέση δευτέρου βαθμού, αλλά οι συντελεστές a_i είναι οι ίδιοι και στις δύο σχέσεις. Οι τιμές της πυκνότητας και του μέτρου ελαστικότητας, στο $x=0$ είναι οι τιμές των ρ_0 και E_0

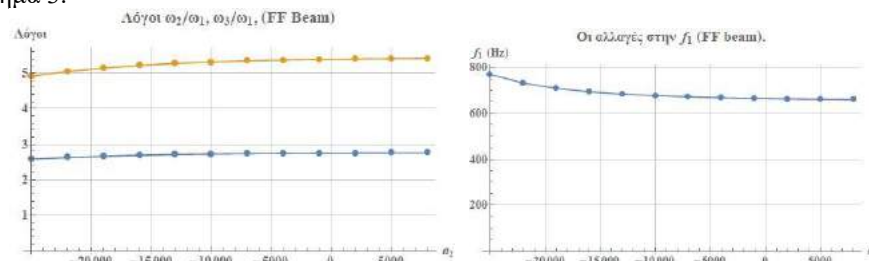
παραπάνω. Στην πρώτη περίπτωση κρατάμε σταθερό το a_0 μεταβάλλοντας το a_2 . Το a_1 αλλάζει αντίστοιχα με τέτοιο τρόπο ώστε η πυκνότητα (και το μέτρο ελαστικότητας) να παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον κάθετο άξονα στη ράβδο ($a_1 = -a_2L$). Οι μεταβολές των λόγων συχνοτήτων και της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας φαίνονται στο Σχήμα 1.

Παρατηρούμε ότι στο μέσον περίπου του διαγράμματος, όταν το a_2 είναι κοντά στη τιμή 35000, έχουμε τιμές για τους λόγους 3 και 6, αντίστοιχα, που είναι επιθυμητές ακέραιες σχέσεις για τους λόγους συχνοτήτων. Έχουν διερευνηθεί και διάφορες άλλες περιπτώσεις. Παρουσιάζουμε ακόμα μία περίπτωση, όπου η παράμετρος a_1 παραμένει σταθερή στη τιμή $a_1 = 4000$, ενώ η a_2 κυμαίνεται από -25000 έως 8000. Η πυκνότητα σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσιάζει συμμετρία ως προς τον κάθετο άξονα. Οι μορφές της πυκνότητας για τις δύο ακραίες τιμές του a_2 φαίνονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Οι μορφές της πυκνότητας για τις τιμές: $a_0 = 2700, a_1 = 4000, a_2 = -25000$ και $a_0 = 2700, a_1 = 4000, a_2 = 8000$.

Οι μεταβολές των λόγων συχνοτήτων και της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας φαίνονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Οι μεταβολές των λόγων και της 1^{ης} ιδιοσυχνότητας όταν αλλάζει το a_2 για ασύμμετρη πυκνότητα και μέτρο ελαστικότητας.

Παρατηρούμε ότι ο δεύτερος λόγος μπορεί να λάβει την ακέραια τιμή 5, αλλά ο πρώτος λόγος ενώ πλησιάζει την τιμή 3 δεν την συναντά. Από το προηγούμενο παράδειγμα αλλά και από αυτό, καταδεικνύεται ότι εάν εισάγουμε ένα αριθμό παραμέτρων στο σχεδιασμό του προβλήματος, είτε μέσω του πλάγιου συναρτησιακού προφίλ για το πάχος της ράβδου, είτε μέσω της συναρτησιακής περιγραφής της σύστασης της ράβδου, μπορούμε να διερευνήσουμε μεθοδικά στο χώρο αυτό των παραμέτρων πόσες άλλες εφικτές λύσεις υπάρχουν (για τις οποίες οι τρεις πρώτες ιδιοσυχνότητες βρίσκονται σε ακέραιες επιθυμητές αναλογίες). Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή δεν λειτουργεί πάντα χωρίς προβλήματα, οπότε μία αυτοματοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να είναι απαγορευτική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές φορές η μέθοδος παρουσιάζει μία ευαισθησία ως προς την επιλογή της τάξης ανάπτυξης της λύσης σε πολυώνυμα, αλλά και στο αριθμητικό μέγεθος των

συντελεστών της διαφορικής εξίσωσης που προκύπτουν κατά περίπτωση, οπότε πολλές φορές εξάγονται πολλαπλές εκφυλισμένες λύσεις για τις ιδιοτιμές. Γενικά η μέθοδος απαιτεί μία επίβλεψη σε διάφορα στάδια όπως για παράδειγμα στην εύρεση των ριζών των πολυωνύμων, των οποίων ο βαθμός μπορεί εύκολα να ξεπεράσει το 100. Γίνεται προσπάθεια να βρεθούν οι βέλτιστοι τρόποι αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων, ανάλογα με την εκάστοτε μορφή που έχει η βασική μας εξίσωση, διότι στις περιπτώσεις όπου η μέθοδος λειτουργεί απρόσκοπτα, τα αποτελέσματα προκύπτουν γρήγορα και είναι αξιόπιστα.

Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από το έργο «Εργαστήρια Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής», ΕΛΚΕ ΤΕΙ Κρήτης (Κωδ. έργου 80264, ίδιοι πόροι).

3. Αναφορές

[1] Thomas D. Rossing, “Acoustics of percussion instruments: Recent progress”, *Acoust. Sci. & Tech.* 22, (3) (2001).

[2] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York, (1991).

[3] I. Bork, “Practical tuning of xylophone bars and resonators”, *Appl. Acoust.* 46, 103–127 (1995).

[4] I. Elishakoff and S. Candan, “Apparently first closed-form solution for vibrating - inhomogeneous beams”, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 3411-3441, (2001).

[5] M.C. Ece, M. Aydoglu, V. Taskin, “Vibration of a variable cross-section beam”, *Mechanics Research Communications*, 34, 78-84, (2007).

[6] C.Y. Wang and C.M. Wang, “Exact Vibration Solutions for a Class of Nonuniform Beams”, *Journal of Engineering Mechanics*, July 2013, 928-931.

[7] G. Sudheer, P.S. Harikrishna, Y.V. Rao, “Free vibration analysis of tapered columns under self-weight using pseudospectral method”, *Journal of Vibroengineering*, Vol. 18 (7), 4583, (2016).

[8] Min-Fan He, Hai-Wu Rong, “An Efficient Approach for the Calculation of Eigenfrequencies and Mode Shapes of Tapered and Axially Functionally Graded Rayleigh Beams”, *Acta Acustica* 103 (2017), 276-287.

[9] R. D. Entwistle and S.R. McGrechan, “Geometric shape identification for multi-mode tuning of percussion instrument bars”, *ICSV14*, Australia 2007.

Ακουστικώς Επαυξημένα Ηχητικά Παιχνίδια: μια Πρώτη Προσέγγιση

Εμμανουήλ Ροβίθης Μετα-διδασκατορικός Ερευνητής Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα emrovithis@ionio.gr	Νίκος Μουστάκας Υποψήφιος Διδάκτωρ Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα al1mous@ionio.g r	Ανδρέας Φλώρος Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα floros@ionio.gr	Κώστας Βόγκλης Μετα- διδασκατορικός Ερευνητής Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα voglinio@gmail.c om
--	---	--	---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εισήγηση επιχειρείται μια πρώτη προσέγγιση της σύγκλισης των πεδίων των ηχητικών παιχνιδιών και της επαυξημένης πραγματικότητας με στόχο τη δημιουργία ηχητικά επαυξημένων παιγνιακών συστημάτων που θα αξιοποιούν τα εγγενή χαρακτηριστικά των δύο πεδίων βελτιστοποιώντας τις συνθήκες διάδρασης και εμπύθισης της παιγνιακής εμπειρίας. Αρχικά περιγράφονται οι συνηθέστερες τεχνικές ηχητικής αναπαράστασης, με έμφαση σε αυτές που αφορούν στη χωρική τοποθέτηση και κίνηση των ηχητικών συμβάντων, καθώς και τα βασικά δομικά στοιχεία της ηχητικής παιγνιακής μηχανικής. Έπειτα, αποτυπώνονται οι σύγχρονες κατευθύνσεις εφαρμογής ηχητικά επαυξημένων συστημάτων, και τέλος προτείνεται η ανάπτυξη ενός προηγμένου μείκτη ηχητικής επαυξημένης πραγματικότητας με βάση την αμφιωτική ακουστότητα.

Augmented Reality Audio Games: a First Approach

ABSTRACT

This paper is a first attempt to converge the fields of Audio Games and Augmented Reality in the scope of creating Augmented Reality Audio Games, which will exploit the benefits of the two fields' inherent characteristics and optimize the interactivity and immersion potential of the game experience. First, the most common sonification techniques, in particular those that realize sound spatialization, and the fundamental elements of audio game interaction are described. Then, the current directions, in which audio augmented systems have been applied, are presented. Finally, an advanced augmented reality audio mixer based on binaural loudness is suggested.

Εισαγωγή

Τα ηχητικά παιχνίδια (Audio Games – AG) αποτελούν ένα είδος ηλεκτρονικών παιχνιδιών, στο οποίο η πραγμάτωση του παιγνιακού χώρου και τρόπου συντελείται κυρίως ή εξ' ολοκλήρου μέσω του ακουστικού καναλιού. Έτσι, ο παίκτης χρειάζεται, βασιζόμενος στην αίσθηση της ακοής, να αντιδράσει σε ηχητικά ερεθίσματα, προς εξερεύνηση του εικονικού περιβάλλοντος και εκτέλεση των απαραίτητων ενεργειών για την επίτευξη του παιγνιακού στόχου. Σε ευρύτερο πλαίσιο, η ηχητική αυτή αλληλεπίδραση έχει εφαρμοστεί από την επιστήμη μέχρι την τέχνη: στη μεν πρώτη, έχει αποδειχθεί πως η παρακολούθηση ηχητικά αναπαριστάμενης πληροφορίας αποκαλύπτει πτυχές που θα παραβλέπονταν μέσω της οπτικής παρατήρησης [1], ενώ στη δεύτερη, έχει υποστηριχθεί πως τα ηχητικά περιβάλλοντα εξασφαλίζουν συνθήκες καλλιτεχνικής έκφρασης και δημιουργίας ακόμα και για χρήστες χωρίς προϋπάρχουσες μουσικές γνώσεις [2].

Σε στενό παιγνιακό πλαίσιο, δηλαδή ως συστήματα αναπαράστασης μιας τεχνητής σύγκρουσης που διέπεται από κανόνες και καταλήγει σε ένα ποσοτικό αποτέλεσμα [3], τα AG παραδοσιακά απευθύνονταν στην ευαίσθητη ομάδα των ατόμων με δυσχέρεια όρασης, προσφάτως, όμως, επιδεικνύουν μια συνεχώς ανερχόμενη δυναμική απήχησης στο ευρύτερο κοινό, είτε στη βιομηχανία της ψυχαγωγίας, είτε στην υπηρεσία της εκπαίδευσης. Στην ψυχαγωγία αξιοποιούν τις δυνατότητες της τεχνολογίας φορητών ηλεκτρονικών συσκευών, ώστε να ενισχύσουν χαρακτηριστικά τους, όπως την εμπύθιση και την κινητική ελευθερία. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι εφαρμογές *Papa Sangre I* και *II*, οι οποίες κάνουν χρήση της επιφάνειας αφής και του γυροσκοπίου του κινητού τηλεφώνου για τον έλεγχο του συστήματος, επιτρέποντας στον παίκτη να συμμετέχει στην παιγνιακή δράση χωρίς καμία οπτική επαφή με την ίδια τη συσκευή [4]. Στη δε εκπαίδευση τα ερευνητικά αποδεδειγμένα αποτελέσματα της ηχητικής παιγνιακής αλληλεπίδρασης όσον αφορά στην ανάπτυξη δεξιοτήτων, όπως η μνήμη, η συγκέντρωση, και η φαντασία [5]-[6], συμφωνούν με τους επίσημους στόχους κρατικών και διεθνών οργανισμών για τη μουσική παιδεία, καθιστώντας το είδος κατάλληλο προς ενσωμάτωση στην τυπική εκπαίδευση [7], ενώ παράλληλα η διάχυση της πληροφορίας αποκλειστικά μέσω του ακουστικού καναλιού προάγει την προσβασιμότητα ατόμων με δυσχέρεια όρασης στη μαθησιακή διαδικασία [8].

Μια ακόμη ανερχόμενη τεχνολογία που συμμετέχει με αυξανόμενο ρυθμό στη διαδικασία ανάπτυξης νέων μορφών εφαρμογών σε πληθώρα πεδίων, όπως η ενημέρωση, η υγεία, η εκπαίδευση, και η ψυχαγωγία, είναι η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality – AR), μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ο συνδυασμός του πραγματικού περιβάλλοντος με ψηφιακές πληροφορίες, ώστε ο χρήστης να γίνεται δέκτης της ταυτόχρονης απεικόνισης πραγματικού και εικονικού κόσμου, και να μπορεί να αλληλεπιδρά με το επαυξημένο αποτέλεσμα. Χαρακτηριστικό δείγμα της παγκόσμιας απήχησης τέτοιων εφαρμογών είναι το παιχνίδι *Pokemon GO!*, στο οποίο ο παίκτης σαρώνει με τη συσκευή του τον πραγματικό κόσμο προς αναζήτηση εικονικών πλασμάτων [9]. Το παιχνίδι κάνει χρήση τεχνολογίας GPS, ώστε να γνωρίζει την τοποθεσία του παίκτη και να ενεργοποιεί τα πλάσματα στην εμβέλειά του.

Εστιάζοντας αποκλειστικά στον ήχο και στην αίσθηση της ακοής, προκύπτει ο τομέας της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας (Augmented Reality Audio, ARA), τομέας ακόμα ανεπαρκώς διερευνημένος, καθώς οι περισσότερες AR

περιπτώσεις αφορούν σε οπτικές απεικονίσεις και περιορίζουν τη διάδραση με την εικονική πληροφορία στο οπτικό κανάλι. Η παρούσα εισήγηση στοχεύει στη διερεύνηση του χώρου σύγκλισης των AG και AR πεδίων, υποστηρίζοντας πως μπορεί να στεγάσει τον σχεδιασμό υβριδικών, ακουστικώς επαυξημένων ηχητικών παιχνιδιών βασισμένων σε ένα προηγμένο σύστημα αλληλεπίδρασης μεταξύ του πραγματικού και του εικονικού που θα προκύψει από τη συνέλιξη των εγγενών χαρακτηριστικών των δύο πεδίων και θα συμβάλει στην υλοποίηση περισσότερο σύνθετων παιγνιακών σεναρίων. Η διερεύνηση αυτή τοποθετείται στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος του Τμήματος Τεχνών Ήχου & Εικόνας του Ιονίου Πανεπιστημίου «Ακουστικώς Επαυξημένα Ηχητικά Παιχνίδια». Η ανάλυση των στοιχείων AG σχεδιασμού, καθώς και η επισκόπηση των μέχρι στιγμής ARA κατευθύνσεων, συνθέτουν το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση.

1. Στοιχεία Σχεδιασμού Ηχητικών Παιχνιδιών

1.1 Σχεδιασμός Ήχου

Κατά τον AG σχεδιασμό εφαρμόζονται τεχνικές ηχητικής αναπαράστασης δεδομένων που συνθέτουν ένα σύστημα αντιστοίχισης των φορέων του παιγνιακού κόσμου με μη-λεκτικά ηχητικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται:

- Ηχητικά Αντικείμενα (Auditory Icons), δηλαδή μη-λεκτικά ηχητικά μηνύματα που βασίζονται στην άμεση αναφορικότητα, για να αποδώσουν ρεαλιστικά την αναπαριστάμενη πληροφορία [10]. Ενδεικτικά, ηχητικό αντικείμενο αποτελεί ο ήχος του εγγράφου που τσαλακώνεται, όταν ένα αρχείο καταστρέφεται στον κάδο ανακύκλωσης του υπολογιστή.
- Ηχητικά Σύμβολα (Earcons), δηλαδή μη-λεκτικά ηχητικά μηνύματα που περιγράφουν αυθαίρετα έννοιες και λειτουργίες, απαιτώντας από τον χρήστη να αποκωδικοποιήσει τη συμβολική τους σημασία [11]. Ένα παράδειγμα ηχητικού συμβόλου είναι η σύντομη μελωδία που σηματοδοτεί τον τερματισμό του λειτουργικού λογισμικού, όταν κλείνει ο υπολογιστής.
- Παραμετροποιημένη Ηχητική Αναπαράσταση (Parameter Mapping Sonification), δηλαδή η αντιστοίχιση πτυχών της αναπαριστάμενης πληροφορίας σε διαφορετικές ηχητικές ποιότητες, όπως το τονικό ύψος, η ένταση, ο ρυθμός κ.α. [12]. Για παράδειγμα, ένα άστρο μπορεί να αναπαρασταθεί ηχητικά αξιοποιώντας την παράμετρο της έντασης για την απόδοση της απόστασής του από τη Γη, και του τονικού ύψους για την απόδοση του μεγέθους του.
- Χωροθετημένος Ήχος (Spatialized Sound), ο οποίος περιλαμβάνει τεχνικές που αποδίδουν στα ηχητικά δρώμενα ιδιότητες θέσης, προέλευσης και κατεύθυνσης μέσα στο ακουστικό πεδίο. Συνηθισμένες τακτικές είναι η στερεοφωνική τοποθέτηση και κίνηση μονοφωνικών ήχων (Stereo Panning), καθώς και η απόδοση της εγγύτητας ενός ήχου προς τον χρήστη μέσω της μεταβολής της έντασής του. Μεγάλη πιστότητα στην απόδοση του ακουστικού περιβάλλοντος επιτυγχάνεται με την αμφιωτική ηχογράφηση (Binaural Recording), δηλαδή την τοποθέτηση δύο μικροφώνων σε τέτοια διάταξη, ώστε να προσομοιώνουν τη διαδικασία της ακοής. Προεξέχοντες ήχοι τοποθετημένοι ως σημεία αναφοράς και άλλοι με συμπεριφορά σαν σόναρ εξυπηρετούν αποτελεσματικά τον προσανατολισμό του παίκτη στον παιγνιακό

χώρο [13]. Τέλος, οι ανατομικές συναρτήσεις μεταφοράς κεφαλής (HRTF) είναι υπεύθυνες για την εφαρμογή φίλτρων που τοποθετούν τον ήχο στον τρισδιάστατο χώρο γύρω από τον ακροατή προσδίδοντας την αίσθηση ύψους και βάθους [14].

Οι τεχνικές ηχητικής χωροθέτησης μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά σε επαυξημένο περιβάλλον, καθώς επεκτείνουν τη δράση σε πεδίο 360° γύρω από το χρήστη. Οι παραγόμενες ελευθερία κινήσεων και εμπύθιση στον παιγνιακό χώρο καθιστούν τα AG ιδανικά για φορητά συστήματα, και παράλληλα η σύγχρονη γενιά των έξυπνων τηλεφώνων διαθέτει τα τεχνολογικά μέσα να υποστηρίξει τέτοιες τεχνικές και να τις ενσωματώσει σε επαυξημένα περιβάλλοντα [15].

1.2 Παιγνιακή Αλληλεπίδραση

Η AG αλληλεπίδραση, δηλαδή η αμφίδρομη σχέση ανάμεσα σε παίκτη και μηχανή ενός ηχητικού παιχνιδιού, εξαρτάται από δύο παραμέτρους: τον τρόπο εισαγωγής των ενεργειών που ορίζεται από το εκάστοτε μέσο, και τη λειτουργία κάθε ενέργειας που ορίζεται από το παιγνιακό περιεχόμενο. Σε αυτό το πλαίσιο, η μελέτη των Parker και Heerema [16] διακρίνει ανάμεσα σε: α) ανάκληση τονικών ή ρυθμικών ακολουθιών, β) επεξεργασία χωρικά τοποθετημένων ήχων με σκοπό τον προσανατολισμό ή/και την αλληλεπίδραση (στόχευση / αποφυγή / σύγκρουση), γ) εισαγωγή λεκτικών εντολών, δ) συγχρονισμό ρυθμικών ή άλλων λειτουργιών, ε) εισαγωγή τονικών ποιοτήτων μέσω της φωνής ή άλλου ηχογόνου οργάνου, στ) εισαγωγή χτυπημάτων ή χειρονομιών με το ποντίκι ή άλλη συσκευή αφής, και ζ) χρήση σωματικών κινήσεων για έλεγχο του ήχου.

Με δεδομένο πως η δημιουργία νέων υβριδικών παιγνιακών τρόπων περιορίζεται μόνο από τη φαντασία των σχεδιαστών, ενώ παράλληλα η τεχνολογική πρόοδος ωθεί την εξέλιξη της βιομηχανίας παιχνιδιών, η παραπάνω διάκριση δεν εξαντλεί τους τρόπους ηχητικής αλληλεπίδρασης, αλλά αποτελεί έναν αποτελεσματικό οδηγό για την αναζήτηση εκείνων που μπορούν να εφαρμοστούν στο επαυξημένο περιβάλλον. Διαπιστώνεται πως, ανάλογα με το μέσο, κάποια κανάλια εισόδου δεδομένων παραμένουν ίδια, όπως για παράδειγμα η εισαγωγή φωνής μέσω μικροφώνου είτε σε υπολογιστή είτε σε κινητό τηλέφωνο, άλλα είναι παρόμοια, όπως το πάτημα ενός κουμπιού στην οθόνη είτε με το ποντίκι είτε με το δάχτυλο, και τέλος κάποια συναντώνται αποκλειστικά σε ένα τεχνολογικό πλαίσιο. Στην περίπτωση της επαυξημένης πραγματικότητας, η δυνατότητα καταγραφής της κίνησης του παίκτη στον χώρο μέσω δορυφόρων και αισθητήρων σε μακρο και μικρο επίπεδο αντίστοιχα αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης τεχνολογίας, και ως τέτοιο πρέπει να ληφθεί πρώτιστα υπ'όψιν κατά το σχεδιασμό ηχητικών παιχνιδιών επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality Audio Games) και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων τους.

2 Εφαρμογές Ηχητικά Επαυξημένης Πραγματικότητας

Η σημασία του ήχου για την πλοήγηση του χρήστη σε επαυξημένα περιβάλλοντα έχει μελετηθεί σε ποικίλα πεδία, από την ψυχαγωγία έως τις τηλε-συσκευές, αλλά και σε πειράματα σχετικά με την αντίληψη και τον εντοπισμό αντικειμένων και διεργασιών. [17] [18] Η παρούσα δημοσίευση εστιάζει στο λιγότερο διερευνημένο ARA πεδίο που έγκειται στον συγκερασμό του ακουστικού περιβάλλοντος με μια

εικονική ηχητική συνιστώσα. Αρχικά, το πραγματικό ηχοτοπίο συλλαμβάνεται μέσω μικροφώνων, και αφού αναμειχθεί με τις εικονικές προσθήκες, οδηγείται στα ακουστικά ως ψευδο-ακουστική αναπαράστασή του. Δοκιμές έχουν, μάλιστα, δείξει πως μερικές φορές οι ακροατές δεν μπορούσαν να ξεχωρίσουν τους πραγματικούς από τους εικονικούς ήχους. [19]

Οι κατευθύνσεις, στις οποίες έχουν εφαρμοστεί αμιγώς ARA συστήματα είναι:

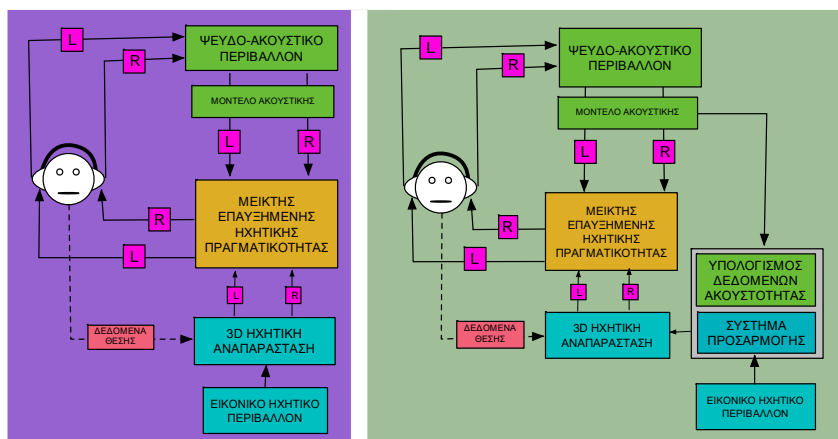
- Μουσειακή Περιήγηση: οι εικονικές πληροφορίες ενεργοποιούνται ανάλογα με την εγγύτητα του επισκέπτη στο εκάστοτε έκθεμα [20] [21]
- Εξερεύνηση Πάρκου: εικονικοί ήχοι οργανωμένοι σε ζώνες διερευνήθηκαν ως προς τη συμβολή τους στην εμπύθιση του επισκέπτη [22]
- Ιστορική Αναπαράσταση: ηχητικά στιγμιότυπα από την εξέγερση του 1831 στο Μπρίστολ ενεργοποιούνταν στις τοποθεσίες που συνέβησαν [23]
- GPS πλοήγηση: διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα μη-λεκτικών, χωροθετημένων ήχων ως φορέων κατευθυντήριας πληροφόρησης [24]
- Γυμναστική Άσκηση: στην ηχητικά επαυξημένη εφαρμογή για πλατφόρμες κινητών τηλεφώνων «Zombies, Run!» ο χρήστης κινητοποιείται να τρέχει, καθώς ήχοι από ζόμπι τον πλησιάζουν, αν μείνει αδρανής [25]
- Εργασιακό Περιβάλλον: μελετήθηκε η βελτίωση των εργασιακών συνθηκών, καθώς ηχητικά σύμβολα ενημέρωναν τους υπαλλήλους για καταστάσεις, όπως το πλήθος των νέων emails και τις επικείμενες συναντήσεις τους. [26]

Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές, ο χρήστης μετέχει ως παθητικός ακροατής, αφού οι ήχοι ενεργοποιούνται σύμφωνα με τη χωρική του θέση χωρίς κάποια περαιτέρω αλληλεπίδραση. Το γεγονός αυτό τονίζει την ανάγκη δημιουργίας και μελέτης νέων συνθηκών διάδρασης σε επαυξημένα περιβάλλοντα, όπως, για παράδειγμα το επαυξημένο μουσείο, για το οποίο έχει υποστηριχθεί πως παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες για διαδραστική πρόσβαση στο επαυξημένο μουσειακό υλικό [27]. Η διερεύνηση του σχεδιασμού ηχητικά επαυξημένων παιγνιακών σεναρίων θα συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση αυτών των αναγκών.

3 Τεχνολογία Επαυξημένης Ηχητικής Μείξης

Η χρήση της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας στηρίζεται μέχρι στιγμής σε συστήματα ζυγισμένου μέσου όρου χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν την ανθρώπινη ακοή και κατ' επέκταση την ανθρώπινη αντίληψη. Η ανάπτυξη όλο και πιο σύνθετων ηχητικών σεναρίων δημιουργεί την ανάγκη για εξεύρεση νέων έξυπνων τρόπων επαυξημένης ηχητικά μείξης, όπου θα ακολουθείται μια πιο συστηματικά δομημένη μείξη χωρίς την ύπαρξη αυθαίρετων προσεγγίσεων.

Η επαυξημένη ηχητική μείξη αποτελεί τον πυρήνα της επαυξημένης ηχητικής τεχνολογίας και εφαρμόζεται μέσω του μείκτη επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας. Στο κλασικό μοντέλο επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας [28], όπως περιγράφεται στο σχήμα 1, ο μείκτης επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, είναι υπεύθυνος για τη μείξη του εικονικού ηχητικού περιβάλλοντος με το αντίστοιχο ψευδο-ακουστικό περιβάλλον.



Σχήμα 2 Μοντέλο επαυξημένης ηχητικής μείξης (κλασικό – προτεινόμενο)

Μέχρι στιγμής έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην όσο πιο πιστή αναπαραγωγή του ψευδο-ακουστικού περιβάλλοντος. Υπάρχει ένα έλλειμμα στον καθορισμό της μεθοδολογίας της μείξης του εικονικού περιβάλλοντος με το ψευδο-ακουστικό περιβάλλον και ειδικά σε περιπτώσεις που υπάρχει σενάριο. Μια τέτοια περίπτωση είναι και τα AG όταν συνδυάζονται με τεχνικές AR. Ειδικότερα, γίνεται διερεύνηση πάνω σε ένα νέο μοντέλο επαυξημένης ηχητικής μείξης, το οποίο δίνει έμφαση στην ακουστική αντίληψη, μέσα από την χρήση μαθηματικών μοντέλων που περιγράφουν την ανθρώπινη ακουστότητα [29]. Ο υπολογισμός δεδομένων ακουστότητας του ψευδο-ακουστικού περιβάλλοντος μέσα από φασματικές αναλύσεις, έχει σκοπό την επίτευξη μιας δυναμικής επαυξημένης ηχητικής μείξης που θα διέπεται από διαφάνεια και θα προσδίδει υψηλά ποσοστά εμπύθισης στον θεατή.

4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε το πλαίσιο σύγκλισης των AG με το AR πεδίο προς τη δημιουργία ηχητικά επαυξημένων παιγνιακών περιβαλλόντων με μοναδικό φορέα πληροφορίας τον ήχο. Οι μέχρι στιγμής ARA προσεγγίσεις παρουσιάζουν περιορισμούς στις δυνατότητες σχεδιασμού σύνθετων τρόπων αλληλεπίδρασης, ενώ και η σύγχρονη στάθμη της τεχνικής στο σχεδιασμό AG απέχει αρκετά από το αντίστοιχο επίπεδο των σύγχρονων βίντεο-παιχνιδιών. Μια γενιά ηχητικά επαυξημένων παιγνιακών συστημάτων θα συναγωνιζόταν εμάς τις υπάρχουσες εφαρμογές οπτικού προσανατολισμού, αξιοποιώντας στο έπακρο τεχνολογίες διάδρασης και εμπύθισης και βελτιστοποιώντας την αποτελεσματικότητά της στα αντίστοιχα πεδία εφαρμογής. Η επισκόπηση των σύγχρονων κατευθύνσεων υλοποίησης ARA συστημάτων, η αναζήτηση ηχητικών παιγνιακών τρόπων ικανών να εφαρμοστούν σε AR περιβάλλον και η αναβάθμιση της τυπικής διαδικασίας μείξης του πραγματικού με το εικονικό με την ανάπτυξη ενός προηγμένου ARA μείκτη στηριζόμενου σε υπάρχοντα μοντέλα μείξης με βάση της αμφιωτική ακουστότητα, αποτελούν τα πρώτα βήματα προς αυτή την κατεύθυνση.

5. Αναφορές

- [1] R. L. Alexander, J. A. Gilbert, M. Simoni, T. H. Zurbuchen, A. Arbor, and D. A. Roberts, «Audification as a Diagnostic Tool for Exploratory Heliospheric Data Analysis» in *The 17th International Conference on Auditory Display*, pp. 24–27. (2011).
- [2] F. A. Seddon, «Music e-Learning Environments: Young People, Composing and the Internet» *Music Education with Digital Technology*, pp. 107–116 (2007).
- [3] K. Salen and E. Zimmerman, *Rules of play: Game design fundamentals*. MIT press, (2004).
- [4] A. Webster, “Gaming in darkness: «Papa Sangre II’ is a terrifying world made entirely of sound» the Verge. [Online]. Available: <http://www.theverge.com/2013/10/31/5048298/papa-sangre-ii-is-a-terrifying-world-made-of-sound>, (2013) [Accessed: 09-Sep-2018].
- [5] S. Targett and M. Fernström, «*Audio games: Fun for all? All for fun*» Georgia Institute of Technology (2003).
- [6] M. Liljedahl and N. Papworth, «Beowulf field test paper” in *Audio Mostly*, p. 43 (2008).
- [7] E. Rovithis, A. Floros, and L. Kotsira, «Educational Audio Gamification: Theory and Practice» to be published in *17th European Conference on e-Learning (ECEL)*, (2018).
- [8] J. Sánchez and F. Aguayo, «AudioGene: Mobile learning genetics through audio by blind learners» in *Learning to Live in the Knowledge Society*, pp. 79–86 (2008).
- [9] P. Ratner, «What Is Pokémon Go and Why You Should Care» Bigthink, [Online]. Available: <https://bigthink.com/paul-ratner/what-is-pokemon-go-and-why-you-should-care>. (2016). [Accessed: 09-Sep-2018].
- [10] W. W. Gaver, «Auditory icons: Using sound in computer interfaces» *Human-Computer Interaction*, vol. 2, no. 2, pp. 167–177, (1986).
- [11] M. M. Blattner, D. A. Sumikawa, and R. M. Greenberg, «Earcons and icons: Their structure and common design principles» *Human-Computer Interaction.*, vol. 4, no. 1, pp. 11–44, (1989).
- [12] F. Grond and J. Berger, «Parameter mapping sonification» *Sonification Handbook.*, pp. 363–397, (2011).
- [13] N. Röber and M. Masuch, «Interacting With Sound: An Interaction Paradigm for Virtual Auditory Worlds» Georgia Institute of Technology, (2004).
- [14] K. Collins and B. Kapralos, «Beyond the Screen: What we can Learn about Game Design from Audio-Based Games» in *Proc. Computer Games Multimedia and Allied Technology (CGAT 2012) Conference*, p. 17. (2012)
- [15] J. R. Blum, J. R., Bouchard, M., & Cooperstock, «What’s around me? Spatialized audio augmented reality for blind users with a smartphone» in *International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking, and Services*, pp. 49–62. (2011).
- [16] J. R. Parker and J. Heerema, «Audio interaction in computer mediated games» *International Journal of Computer Games Technology*, vol. 2008, p. 1, (2008).
- [17] M. Sodnik, J., Tomazic, S., Grasset, R., Duenser, A., & Billinghurst, «Spatial sound localization in an augmented reality environment» in *Proceedings of the 18th*

Australia conference on computer-human interaction: design: activities, artefacts and environments, pp. 111–118. (2006)

[18] P. Sundareswaran, V., Wang, K., Chen, S., Behringer, R., McGee, J., Tam, C., & Zahorik, «3D audio augmented reality: implementation and experiments» in *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM international symposium on mixed and augmented reality*, p. 296. (2003)

[19] G. Härmä, A., Jakka, J., Tikander, M., Karjalainen, M., Lokki, T., Hiipakka, J., & Lorho, «Augmented reality audio for mobile and wearable appliances» *Journal of the Audio Engineering Society*, pp. 52(6), 618–639., (2004).

[20] B. B. Bederson, «Audio augmented reality: a prototype automated tour guide» in *Conference companion on Human factors in computing systems*, pp. 210–211. (1995)

[21] M. Hatala, L. Kalantari, R. Wakkary, and K. Newby, «Ontology and rule based retrieval of sound objects in augmented audio reality system for museum visitors» in *ACM Symposium on Applied Computing (SAC '04)*, pp. 1045–1050. (2004)

[22] S. A. Vazquez-Alvarez, Y., Oakley, I., & Brewster, «Auditory display design for exploration in mobile audio-augmented reality» *Personal and Ubiquitous Computing*, pp. 16(8), 987–999., (2012).

[23] B. Reid, J., Geelhoed, E., Hull, R., Cater, K., & Clayton, «Parallel worlds: immersion in location-based experiences» in *CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp. 1733–1736. (2005)

[24] H. Holland, S., Morse, D. R., & Gedenryd, «AudioGPS: Spatial audio navigation with a minimal attention interface» *Personal and Ubiquitous Computing*, pp. 6(4), 253–259., (2002).

[25] A. Orin, “Behind the App: The Story of Zombies, Run!” *Lifehacker*, [Online]. Available: <https://lifehacker.com/behind-the-app-the-story-of-zombies-run-1632445358>. (2014) [Accessed: 09-Sep-2018].

[26] R. Mynatt, E. D., Back, M., Want, R., & Frederick, «Audio Aura: Light-weight audio augmented reality» in *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 211–212. (1997)

[27] G. Deliyiannis, I., & Papaioannou, «Augmented reality for archaeological environments on mobile devices: a novel open framework» *Mediterranean Archaeology & Archaeometry*, p. 14(4), (2014).

[28] Tikander, M.K., & Riikonen, V., «An Augmented Reality Audio Headset» in *11th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-08)*, Espoo, Finland, (2008).

[29] Moore, C. J. B. & Glasberg, B.R., «Modeling binaural loudness» *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 121 pp. 1604–1612., (2007).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 7: Περιβαλλοντική Ακουστική**Συσχέτιση οικονομίας και όχλησης από περιβαλλοντικό θόρυβο**

Βασίλης Βασιλειάδης
Ελένη Αντωνοπούλου
Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας / Τμήμα Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
vvasil@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σχετικά λίγες είναι οι κοινωνικές έρευνες για την όχληση του πληθυσμού από τον περιβαλλοντικό θόρυβο στην Ελλάδα σε σχέση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες όπου τέτοιου είδους έρευνες εφαρμόζονται ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την χάραξη στρατηγικών σχεδίων για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού θορύβου.

Το 2007 υλοποιήθηκε μια τέτοια έρευνα από το Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, η οποία είχε στόχο την εκτίμηση των επιπτώσεων του περιβαλλοντικού θορύβου στους πολίτες. Τα αποτελέσματα εκείνης της έρευνας είχαν δείξει ότι τα επίπεδα του θορύβου στις περιοχές έρευνας ήταν ιδιαίτερα υψηλά, αγιγίζοντας μάλιστα, σε ορισμένες ώρες τις ημέρας τα όρια του κινδύνου για την υγεία.

Είναι γνωστό, πως σε συνθήκες οικονομικής κρίσης, η προστασία του περιβάλλοντος και η αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των πολιτών σε αυτό το επίπεδο θεωρείται 'περιττή' πολυτέλεια, τόσο από την Πολιτεία όσο και από εμάς τους ίδιους. Έχοντας αυτό υπόψη, αποφασίστηκε να επαναληφθεί η έρευνα αυτή, υπό τις δεδομένες οικονομικές συνθήκες, ώστε να τεκμηριωθεί ο βαθμός στον οποίο οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν το πρόβλημα του θορύβου και τον τρόπο που αυτό γίνεται αντιληπτό από τους πολίτες, σε σχέση με το παρελθόν, και να διαπιστωθεί ο βαθμός στον οποίο οι πολίτες μπορούν να συμμετάσχουν στην καταπολέμησή τους.

Δέκα χρόνια μετά την πρώτη έρευνα και ενώ η χώρα εξακολουθεί να βρίσκεται σε οικονομική κρίση, πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη έρευνα στις ίδιες περιοχές με τους ίδιους συμμετέχοντες. Η σύγκριση των 2 ερευνών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Relationship of the disturbance caused by environmental noise and the economy**ABSTRACT**

The number of social surveys regarding citizens' disturbance from environmental noise in Greece is relatively low compared to other European countries, where such surveys constitute a useful tool for strategic plans that aim in competing environmental noise.

Such a survey was carried out in 2007 by the School of Architectural Engineering, Aristotle University of Thessaloniki. The aim of the survey was to assess the impacts of environmental noise on the residents of the study areas. The results of that survey showed that noise levels in those areas were significantly high, reaching, in some cases, levels hazardous for human health.

It is widely known that in economic crisis conditions, environmental protection is regarded a 'luxury' by the State as well as by the citizens. Taking this attitude in consideration and the ongoing Greek economic crisis, a second survey was conducted ten years after the first one in the same area and with the same participants, to assess the extent to which economic conditions affect the way citizens perceive environmental noise.

The comparison between the two surveys is rather interesting.

Εισαγωγή

Το 2007 περίπου 1000 ερωτηματολόγια απεστάλησαν στους κατοίκους δύο περιοχών του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης, για τις οποίες υπήρχαν μακροχρόνιες μετρήσεις θορύβου. Οι δύο περιοχές μελέτης επιλέχθηκαν εξαιτίας της διαφοροποίησής τους σε ότι αφορά τις στάθμες θορύβου, έτσι ώστε να υπάρχουν οι απόψεις από 2 ακουστικά διαφορετικές περιοχές. Οι δύο περιοχές ήταν:

- Ο βασικός οδικός άξονας από ανατολικά προς το κέντρο της Θεσσαλονίκης, ο οποίος εμφανίζει μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο (Β. Όλγας, περιοχή Μπότσαρη)
- Μια σχετικά ήσυχη αστική περιοχή κατοικιών (Καλαμαριά)

Από τα 1000 ερωτηματολόγια που απεστάλησαν στις παραπάνω περιοχές τα 204 επεστράφησαν συμπληρωμένα.

Στους κάτοικους που απάντησαν στην πρώτη έρευνα απεστάλησαν δέκα χρόνια μετά νέα ερωτηματολόγια. Αυτή τη φορά επεστράφησαν 112 απαντημένα ερωτηματολόγια. Το ερωτηματολόγιο περιλάμβανε τόσο γενικές ερωτήσεις για την όχληση από τον θόρυβο όσο και ειδικές για τις αντιδράσεις του κόσμου στον θόρυβο.

1. Μετρήσεις θορύβου

Οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν σύμφωνα με την οδηγία 2002/49/EC με σταθμούς παρακολούθησης Cirrus CR:245 Environmental Noise Analyser, σε ύψος 4m και λαμβάνοντας τιμές ανά ώρα ώστε να υπολογιστούν οι δείκτες L_{den} και L_{night} . Τα αποτελέσματα και η σύγκριση μεταξύ των δύο ερευνών παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

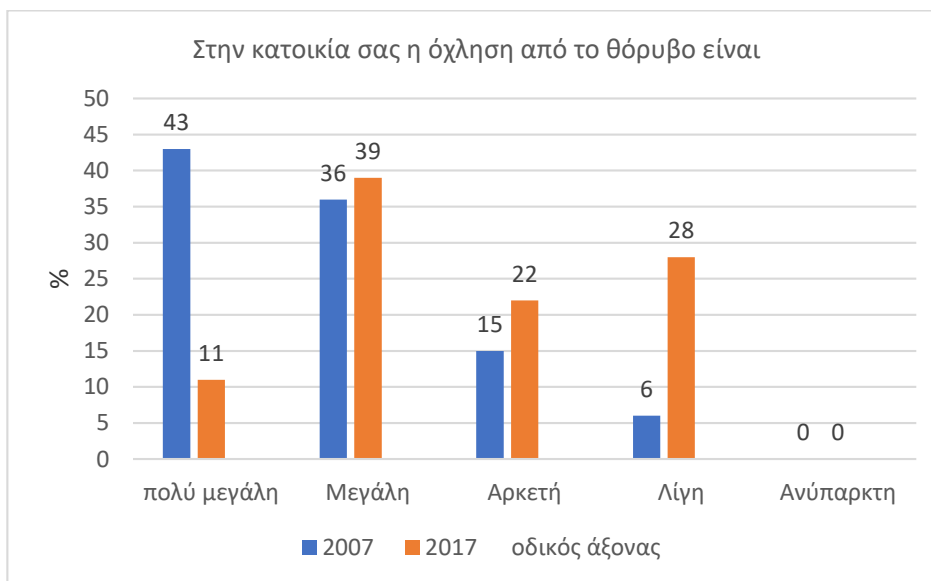
Πίνακας 1.1 Μετρήσεις θορύβου

Καλαμαριά	L_{night}	L_{den}
2007	57,8	65,2
2017	58,0	65,7
Β. Όλγας	L_{night}	L_{den}
2007	69,3	75,9
2017	68,8	75,7

2. Συγκριτικά αποτελέσματα ερευνών



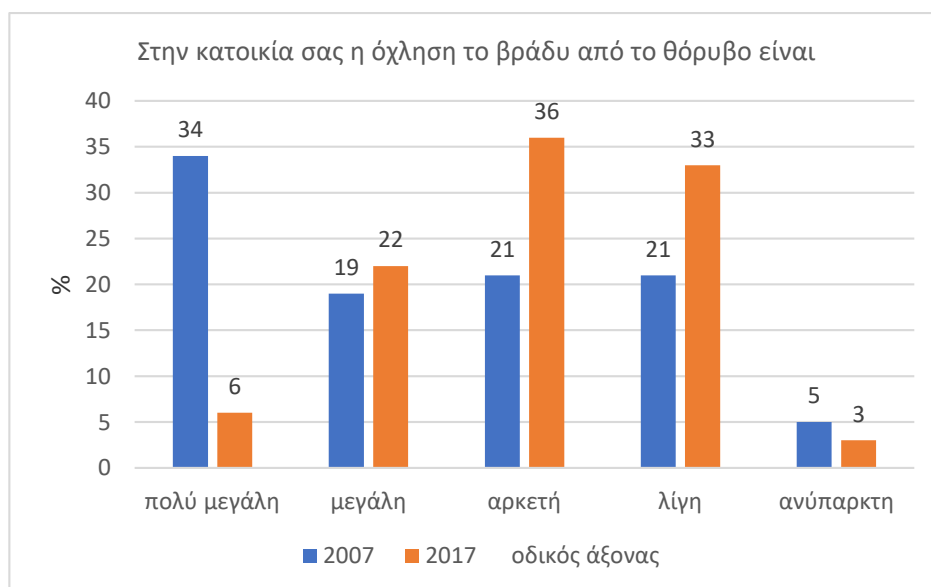
Σχήμα 2.1 Συγκριτικό διάγραμμα όχλησης για την περιοχή της Καλαμαριάς



Σχήμα 2.2 Συγκριτικό διάγραμμα όχλησης για την περιοχή της Βασ. Όλγας



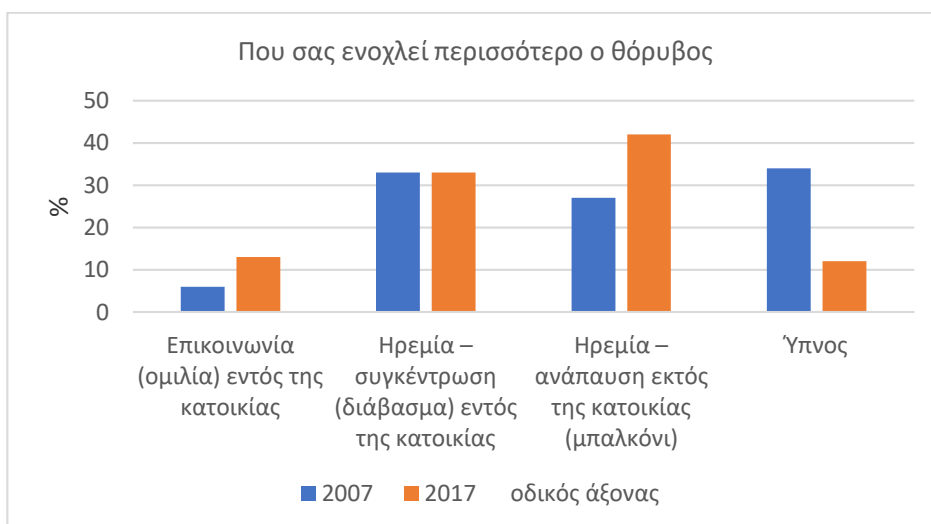
Σχήμα 2.3 Συγκριτικό διάγραμμα βραδινής όχλησης για την περιοχή της Καλαμαριάς



Σχήμα 2.4 Συγκριτικό διάγραμμα βραδινής όχλησης για την περιοχή της Βασ. Όλγας



Σχήμα 2.5 Συγκριτικό διάγραμμα δραστηριοτήτων στις οποίες ενοχλεί ο θόρυβος (Καλαμαριά)



Σχήμα 2.6 Συγκριτικό διάγραμμα δραστηριοτήτων στις οποίες ενοχλεί ο θόρυβος (Βασ. Ολγας)



Σχήμα 2.7 Συγκριτικό διάγραμμα δραστηριοτήτων αντιμετώπισης του θορύβου (Καλαμαριά)

3. Συμπεράσματα

Οι δυο κοινωνικές έρευνες υλοποιήθηκαν στις ίδιες περιοχές, με τους ίδιους συμμετέχοντες, οι οποίοι όπως δείχνουν οι μετρήσεις (πίνακας 1) ήταν εκτεθειμένοι στις ίδιες στάθμες θορύβου, με διαφορά 10 ετών (2007 – 2017). Επομένως, η όχληση των κατοίκων από το θόρυβο, θα έπρεπε κανονικά να εμφανίζεται και αυτή η ίδια. Ωστόσο, όπως φαίνεται στον πίνακα 2, η πραγματικότητα είναι εντελώς διαφορετική. Τα ποσοστά της όχλησης εμφανίζουν σημαντική πτώση. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά των ιδιαίτερα ενοχλημένων και στις δυο περιοχές έχουν πέσει 20% για την Καλαμαριά και 29% για την περιοχή γύρω από τη Βασ. Όλγας. Πού οφείλεται αυτή η διαφοροποίηση;

Πίνακας 3.2 Ποσοστά όχλησης

Καλαμαριά	Πολύ μεγάλη και μεγάλη όχληση
2007	54 %
2017	34 %
Β. Όλγας	Πολύ μεγάλη και μεγάλη όχληση
2007	79 %
2017	50 %

Υπάρχουν μελέτες όπως των Brink et al. (2005), που υποστηρίζουν πως μόνο ένα 15% της αντίληψης για το μέγεθος της όχλησης εξαρτάται από τη στάθμη θορύβου καθώς και του Guskı (2003) όπου το αντίστοιχο ποσοστό εκτιμάται στο 33%. Η αντίληψη για το μέγεθος της όχλησης σύμφωνα με τις παραπάνω μελέτες επηρεάζεται

και από πλήθος άλλων παραγόντων πέρα από τη στάθμη θορύβου στην οποία είναι εκτεθειμένος κάποιος άνθρωπος. Αυτοί οι παράγοντες είναι, μεταξύ άλλων:

- Η προσωπική ευαισθησία στο θόρυβο
- Η άποψη - γνώμη για την πηγή θορύβου
- Η αίσθηση της δυνατότητας αντιμετώπισης της πηγής θορύβου
- Η εμπιστοσύνη στην υπεύθυνη αρχή καταπολέμησης του θορύβου
- Η δυνατότητα πρόσβασης σε ήσυχη πρόσοψη κατοικίας
- Η απόσταση από πηγή θορύβου
- Η ορατότητα πηγής θορύβου
- Η εκτίμηση κοινής γνώμης για την πηγή θορύβου

Ο παράγοντας της οικονομικής κατάστασης και του συνεπακόλουθου άγχους που προκαλείται από το αίσθημα ανασφάλειας που αισθάνονται οι πολίτες, δεν έχει μέχρι στιγμής ληφθεί υπόψη από τις σχετικές έρευνες. Αυτός ο παράγοντας, ωστόσο, είναι ο κυρίαρχος τα τελευταία δέκα χρόνια στην ελληνική κοινωνία καθώς οι πολίτες εξακολουθούν να βιώνουν μια βαθιά οικονομική κρίση η οποία επηρεάζει σχεδόν όλα τα επίπεδα της καθημερινότητας. Είναι προφανές, και από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, πως η οικονομική κρίση επηρεάζει τόσο πολύ τους πολίτες, ώστε να μη δίνουν σημασία σε άλλα σημαντικά προβλήματα, όπως είναι η έκθεση στο θόρυβο, η οποία έχει, με βάση την διεθνή βιβλιογραφία, σημαντικότερες έως μοιραίες επιπτώσεις στην υγεία.

4. Αναφορές

[1] Fidell S. Schultz T. «Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance» Journal of the Acoustical Society of America 89 (1991).

[2] European Commission: Position paper on dose response relationship between transportation noise and annoyance Luxemburg (2002).

[3] European Commission: Position paper on dose effect relationship for night time noise (2004).

[4] Brink et al «Laermstudie 2000» ETH Zuerich, Zentrum fuer Organisations und Arbeitswissenschaften (2005).

[5] Guski R. «Tendenzen und Desiderate der Laermwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts» Zeitschrift fuer Laermbekaempfung 50 (2003).

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Πειραματικού Διαδικτυακού Κατανεμημένου Συστήματος Μέτρησης Περιβαλλοντικού Θορύβου

Βασίλειος-Γεώργιος
Βασιλόπουλος
Φοιτητής
vasilopv@auth.gr

Χρήστος
Σεβαστιάδης
Δρ. Ηλ/Μηχ
csevast@auth.gr

Γεώργιος
Παπανικολάου
Καθηγητής
pap@eng.auth.gr

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή, η οποία προέκυψε στα πλαίσια διπλωματικής διατριβής, έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός διανεμημένου συστήματος για την μέτρηση ήχου εκ του μακρόθεν με τη βοήθεια επαγγελματικού ηχομέτρου. Ως αρχική προσπάθεια υλοποιήθηκε μια απλή δομή του συστήματος με ένα σταθμό μέτρησης τον οποίο μπορεί να ελέγξει ο χρήστης μέσω ιστοσελίδας που στεγάζεται σε server του Εργαστηρίου Ηλεκτρακουστικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Για να δοθούν δυνατότητες μελλοντικής ανάπτυξης, δημιουργήθηκαν πολλά μικρά υποσυστήματα ώστε το σύστημα να είναι διανεμημένο και εύκολα διαχειρίσιμο. Τέλος αξιολογήθηκε το αποτέλεσμα και περιγράφηκαν μερικές πιθανές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμεύσει μια ανεπτυγμένη μορφή του συστήματος αυτού.

Experimental Distributed Online System for Environmental Noise Measurements: Planning and Development

ABSTRACT

The purpose of this study, which emerged in the context of a diplomatic dissertation, was to develop a distributed system used to measure environmental noise remotely using a professional sound level meter. As an initial effort, a simple structure was used to implement the system with a single measurement station which the user can control from a webpage that is hosted in the servers of the electro-acoustics laboratory in Aristotle University of Thessaloniki. The system is composed of various smaller subsystems so that it becomes distributed and easily manageable. This way it becomes easier to further develop the system for future applications. Finally, after the evaluation of the resulting system, several related applications are described.

Εισαγωγή

Η αρνητική επίδραση του περιβαλλοντικού θορύβου στην υγεία του ανθρώπου είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την επιστήμη εδώ και πολλά χρόνια. Πλέον στις μεγάλες πόλεις γίνονται προσπάθειες μέτρησης, επεξεργασίας και ανάλυσης του θορύβου με σκοπό την εύρεση τρόπων για τον έλεγχο και τη μείωση των επιπέδων του. Ο τρόπος που θα γίνει μια τέτοια μέτρηση εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής μέτρησης, το περιβάλλον (εσωτερικός-εξωτερικός χώρος), την κύρια πηγή θορύβου (οχήματα, ανθρώπινη ομιλία κτλ.) και άλλους παράγοντες. Για παράδειγμα, στις υπηρεσίες έξυπνης πόλης (smart city), ο αστικός θόρυβος μετρείται και γίνεται η χαρτογράφηση του για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ώστε να βρεθούν τρόποι μείωσης του όπου χρειάζεται. Για μια τέτοια εφαρμογή χρειάζεται ένα ελαφρύ, καταναλωμένο σύστημα με πολλούς σταθμούς μέτρησης χαμηλής κατανάλωσης, αλλά και κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας, αποθήκευσης και διανομής των δεδομένων καθώς ο όγκος τους είναι μεγάλος (big data).

1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της υπό εξέλιξη διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική ανάπτυξη ενός διαδικτυακού καταναλωμένου συστήματος μέτρησης περιβαλλοντικού θορύβου. Η ανάγκη για ανάπτυξη του συστήματος προέκυψε στα πλαίσια της συνεργασίας του Εργαστηρίου Ηλεκτροακουστικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης με το Γενικό Νοσοκομείο Θεσσαλονίκης Γ. Παπανικολάου κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θορύβου στην Α' μονάδα εντατικής θεραπείας του νοσοκομείου. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας έχει θέσει όρια για τον αποδεκτό θόρυβο σε τέτοιους χώρους [1]. Η μέτρηση έγινε βάσει των διεθνών προτύπων για μετρήσεις ήχου με επαγγελματικό ηχόμετρο [2,3] και το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το NTi Audio XL2 [4]. Η διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας ήταν 28 ημέρες ενώ ο προγραμματισμός των περιόδων μέτρησης καθώς και η παρακολούθηση της διαδικασίας απαιτούσε τη συχνή επιτόπου παρουσία του προσωπικού χειρισμού του ηχομέτρου. Η ύπαρξη ενός συστήματος ελέγχου της μέτρησης χωρίς την φυσική παρουσία ατόμου θα διευκόλυνε τους χειριστές του ηχομέτρου, το προσωπικό του νοσοκομείου και θα απλούστευε τη διαδικασία της μέτρησης.

Εκτός του παραπάνω ανάγκης, θεωρήθηκε σημαντικό, η σχεδίαση του συστήματος να επιτρέπει την μελλοντική επέκτασή του στο να εκτελεί επιπλέον λειτουργίες όπως η ηχογράφηση και επεξεργασία του θορύβου, με απώτερο σκοπό τη δημιουργία συνόλων δεδομένων για ερευνητικούς σκοπούς. Λόγω της ερευνητικής κατεύθυνσης όλου του συστήματος επιλέχθηκε η χρήση και η εφαρμογή υποσυστημάτων ανοιχτού κώδικα, έτσι ώστε να υπάρχει και η αντίστοιχη δυνατότητα εξέλιξής και επέκτασής του. Το γενικότερο έργο ανάπτυξης ονομάστηκε OpenNoise με σκοπό να σηματοδοτήσει τόσο την ανοικτή ανάπτυξη του εγχειρήματος όσο και την ελεύθερη πρόσβαση στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

2 Ανάλυση Συστήματος

2.1 Προδιαγραφές και Απαιτήσεις Συστήματος

Ως μια αρχική προσπάθεια για την ανάπτυξη του προαναφερθέντος συστήματος, επιλέχθηκε μια απλή δομή, με ένα σταθμό μέτρησης του οποίου η παρατήρηση και ο έλεγχος θα γίνεται μέσω ιστοσελίδας που στεγάζεται σε server του πανεπιστημίου. Οι κύριες εργασίες που απαιτείται να εκτελεί το σύστημα είναι η μέτρηση θορύβου μέσω ηχομέτρου, η αποστολή και αποθήκευση των αποτελεσμάτων στον server, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην ιστοσελίδα και ο έλεγχος του ηχομέτρου εκ του μακρόθεν μέσω της ιστοσελίδας. Για να είναι εφικτή η μελλοντική περαιτέρω ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος πρέπει οι σταθμοί μέτρησης να είναι χαμηλής κατανάλωσης, χαμηλού κόστους και να έχουν όσο το δυνατόν απλούστερη υλοποίηση. Επιπλέον, το λογισμικό και η ιστοσελίδα στο server πρέπει να αναπτυχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν την επέκταση του συστήματος χωρίς σημαντικές αλλαγές στην δομή τους.

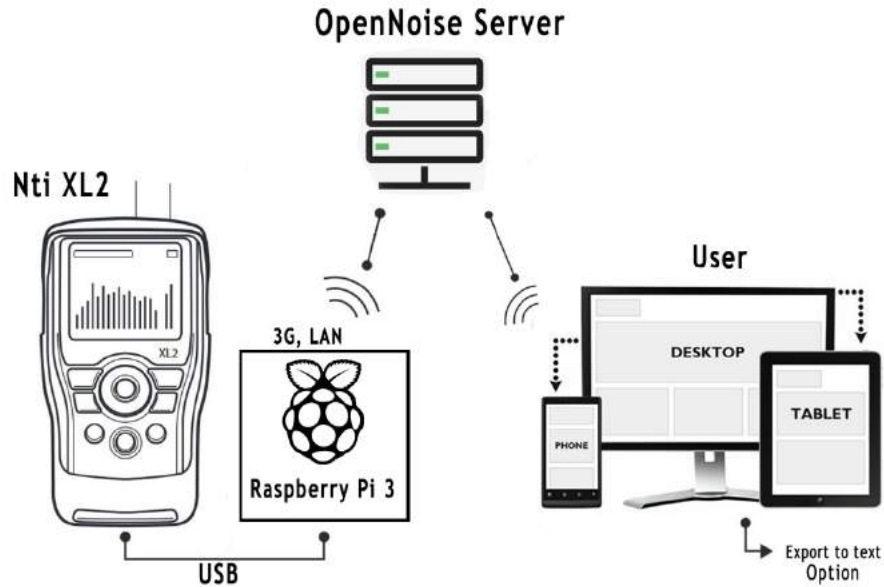
2.2 Δομή Συστήματος

Το ένα άκρο του συστήματος αποτελείται από έναν υπολογιστή εξυπηρετητή, με τις υπηρεσίες της βάσης δεδομένων και της ιστοσελίδας. Η διαχείριση του συστήματος και ο έλεγχος των ηχομέτρων πραγματοποιείται μέσω της ιστοσελίδας. Τα άλλα άκρα του συστήματος αποτελούνται από έναν μικρό υπολογιστή σταθμό, τύπου πλακέτας (Raspberry Pi 3) [5], που επικοινωνεί άμεσα με το ηχόμετρο μέσω σειριακού πρωτοκόλλου. Ο χρήστης μέσω της ιστοσελίδας δίνει εντολές στο ηχόμετρο, βλέπει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιεί σε διαγράμματα και έχει την δυνατότητα να κατεβάσει - αποθηκεύσει τις μετρήσεις από την βάση δεδομένων.

Για τις βασικές λειτουργίες του κάθε υπολογιστή σταθμού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python 3 [6]. Τα επιμέρους τμήματα του λογισμικού που αναπτύχθηκαν είναι γενικευμένα, εκτός του υποσυστήματος για την άμεση επικοινωνία με το ηχόμετρο. Έτσι για χρήση με άλλο ηχόμετρο, το μόνο που απαιτείται είναι η ανάπτυξη του συγκεκριμένου υποσυστήματος σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού, ως διεπαφή που επικοινωνεί με το εκάστοτε ηχόμετρο.

Στον υπολογιστή εξυπηρετητή χρησιμοποιείται το λογισμικό Apache ως υπηρεσία ιστοσελίδας, η MySQL ως υπηρεσία βάσης δεδομένων και η Php7 ως γλώσσα παραγωγής των ιστοσελίδων. Εκτός της λειτουργίας της Php, η ιστοσελίδα χρησιμοποιεί και την Python τόσο για την επικοινωνία με τον υπολογιστή σταθμό μέσω του πρωτοκόλλου SSH και όσο και για τη δημιουργία και αποθήκευση των διαγραμμάτων. Η επεξεργασία που υφίστανται τα δεδομένα πριν την παρουσίαση τους σε διαγράμματα υλοποιείται μέσω της Python και εφαρμόζει τα διεθνή πρότυπα.

Στο σχεδιάγραμμα του σχήματος 2.1 φαίνεται η δομή του συστήματος όπως υλοποιήθηκε.

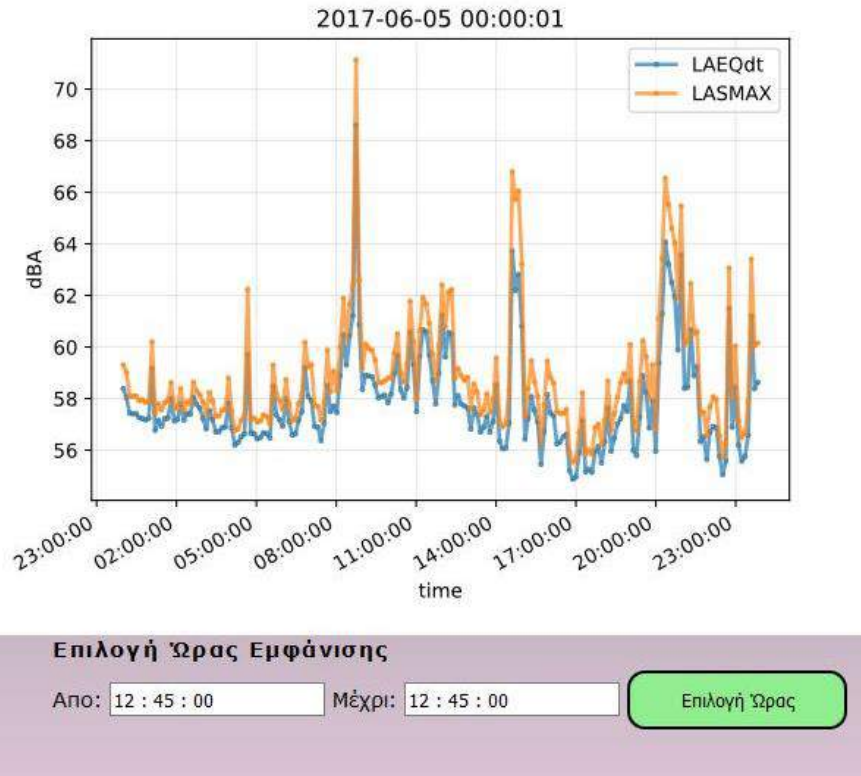


Σχήμα 2.3 Βασική Δομή Συστήματος

Η διαδικασία για την ολοκλήρωση μιας μέτρησης είναι η εξής:

1. Ο χρήστης εκκινεί μια μέτρηση από την ιστοσελίδα με τις ζητούμενες παραμέτρους.
2. Ο server λαμβάνει τις παραμέτρους, συνδέεται μέσω SSH στον υπολογιστή του σταθμού (Raspberry Pi 3) και εκκινεί ένα script σε Python 3 στο οποίο δίνει ως αρχικά ορίσματα τις παραμέτρους του χρήστη.
3. Το script αυτό ανάλογα με τις παραμέτρους που δέχεται καλεί το αντίστοιχο κατάλληλο υποσύστημα που εκτελεί την επικοινωνία με το ηχόμετρο. Στην αρχική αυτή υλοποίηση το υποσύστημα αυτό είναι μια βιβλιοθήκη σε Python (module) που μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με το επαγγελματικό ηχόμετρο NTi Audio XL2 το οποίο ήταν διαθέσιμο στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.
4. Το Python module δίνει την εντολή για μέτρηση στο ηχόμετρο και αναμένει τα αποτελέσματα. Στην συνέχεια αποθηκεύει τα αποτελέσματα απευθείας στην βάση δεδομένων του server μέσω της βιβλιοθήκης MySQLdb ανα ένα λεπτό.
5. Όταν ο χρήστης ζητήσει την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην ιστοσελίδα, καλείται ένα Python script στον server το οποίο δημιουργεί τα απαραίτητα διαγράμματα με όσα δεδομένα έχουν αποθηκευτεί τη δεδομένη χρονική στιγμή στην βάση δεδομένων και τα αποθηκεύει στον server. Τέλος παρουσιάζει τα διαγράμματα στον χρήστη.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ένα παράδειγμα εμφάνισης διαγράμματος για μέτρηση 24 ωρών και δύο μεταβλητές μέτρησης. Για να φανεί μεγαλύτερη χρονική αναλυτικότητα δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη για ζουμ στον χρόνο.



Σχήμα 2.2 Παράδειγμα Αποτελέσματος για Μέτρηση 24^{ωv} Ωρών μέσω του συστήματος.

Το μη γενικευμένο αυτό κομμάτι του συστήματος δεν ήταν δυνατό να αποφευχθεί καθώς το κάθε ηχόμετρο έχει το δικό του τρόπο επικοινωνίας με υπολογιστή. Για παράδειγμα το NTi Audio XL2 που χρησιμοποιήθηκε δέχεται συγκεκριμένες εντολές σε byte stream και επιστρέφει τιμές με τον ίδιο τρόπο. Έτσι για την χρήση του παρόντος συστήματος με άλλο ηχόμετρο, το υποσύστημα που χρειάζεται τροποποίηση είναι η βιβλιοθήκη σε Python που εκτελεί την σειριακή επικοινωνία με το ηχόμετρο. Είτε σε Python, είτε σε άλλη γλώσσα προγραμματισμού, το αντίστοιχο module θα πρέπει να δέχεται ως ορίσματα τις ίδιες παραμέτρους και να δίνει τις ίδιες εξόδους με το παρόν υποσύστημα για να υπάρχει συμβατότητα.

3 Αποτελέσματα

Το αποτέλεσμα είναι ένα ελαφρύ, γρήγορο και οικονομικό σύστημα χαμηλής κατανάλωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για απλό έλεγχο και παρακολούθηση μετρήσεων περιβαλλοντικού θορύβου, είτε για έλεγχο, λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων. Η χρήση της ιστοσελίδας και η εγκατάσταση του συστήματος είναι απλή για ένα χρήστη με βασικές γνώσεις του αντικειμένου. Η χαμηλή κατανάλωση του μικρού υπολογιστή σταθμό σε συνδυασμό με την σχετικά χαμηλή κατανάλωση των σύγχρονων ηχομέτρων προσφέρει την δυνατότητα εκτέλεσης μακροχρόνιων μετρήσεων περιβαλλοντικού θορύβου σε τοποθεσίες που δεν υπάρχει πρόσβαση σε παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τροποποίηση που χρειάζεται το σύστημα για χρήση σε τέτοιες τοποθεσίες είναι η προσθήκη ασύρματης κάρτας δικτύου στο Raspberry Pi και η προσθήκη πηγής ηλεκτροδότησης για το συνδυασμό Raspberry—Ηχομέτρου (π.χ. μικρό φωτοβολταϊκό).

4 Συμπεράσματα - Συζήτηση

Το σύστημα αυτό έχει δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης όπως η προσθήκη σταθμών για ταυτόχρονη μέτρηση σε πολλά σημεία ή η δημιουργία δημόσιων σταθμών παρακολούθησης θορύβου. Η ανάπτυξη του και ως σταθμός ηχογράφησης του περιβαλλοντικού θορύβου αποτελεί το επόμενο βήμα. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να φανεί χρήσιμο σε εφαρμογές όπως ο έλεγχος της ηχητικής ρύπανσης μιας πόλης, ο προσδιορισμός του θορύβου που προέρχεται από μεγάλους δρόμους, η ανάλυση θορύβου για προσδιορισμό των πηγών του και άλλα. Όσο μεγαλώνει όμως η εφαρμογή τόσο πιο περίπλοκο γίνεται και το σύστημα και θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σύνθετες τεχνικές παράλληλης επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων για να μειωθεί ο όγκος τους. Επίσης σε μεγάλες εφαρμογές θα φανεί και η σημασία της απλής υλοποίησης των σταθμών και της χαμηλής κατανάλωσης τους ώστε να λειτουργεί το σύστημα για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς μεγάλες ανάγκες για συντήρηση.

5 Αναφορές

[1] Berglund B, Lindvall T, Schwela DH. *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization, (1999).

[2] ISO 1996-1: Acoustics – *Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (2003-08-01)

[3] ISO 1996-2: Acoustics – *Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (2007-03-15)

[4] <http://www.nti-audio.com/en/products/xl2-sound-level-meter.aspx>

[5] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

[6] <https://www.python.org/downloads/release/python-363/>

Διερεύνηση βιοκλιματικών παραμέτρων σε υπαίθριους δημόσιους χώρους : ακουστική άνεση στους κήπους της Έδεσσας

Χαρά Τσαμήτρου
Αρχιτέκτων Μηχανικός ΔΠΘ
zaratsam@hotmail.com

Νίκος Μπάρκας
Καθηγητής ΔΠΘ
nbarkas@arch.duth.gr

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προτεινόμενη ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης προπτυχιακής έρευνας (2016-17), που πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ., σχετικά με τη διερεύνηση των βιοκλιματικών ανέσεων σε υπαίθριους χώρους της Έδεσσας και διαπραγματεύεται τη μελέτη των συνθηκών ακουστικής άνεσης σε υπαίθριους δημόσιους χώρους (κήπους / πάρκα) της πόλης.

Η έρευνα αρχικά εστιάζει στην πολεοδομική εξέλιξη της Έδεσσας και στην έννοια της ακουστικής άνεσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας, οι δώδεκα (12) επιλεγμένοι χώροι της πόλης, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους. Τέλος καταγράφονται τα αναλυτικά και συγκεντρωτικά δεδομένα και δίδονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

Acoustic comfort in open public spaces in the town of Edessa

ABSTRACT

The proposed announcement is part of a broader undergraduate research (2016-17), which was held at the Department of Architectural Engineering of the Democritus University of Thrace, concerning the bioclimatic facilities in Edessa's outdoor spaces and negotiates the study of the acoustic comfort conditions in public spaces (gardens / parks) of the city.

The research initially focuses on Edessa's urban development and the concept of acoustic comfort. It is presented the methodology of the survey, the twelve (12) selected areas of the city, as well as the criteria for their selection. Finally, the analytical and aggregate data are recorded and the conclusions of the survey are given.

Εισαγωγή

Η παρούσα ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας μακροχρόνιας έρευνας που διεξάγει του Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. με σκοπό τη συγκρότηση ενός καταλόγου των βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων που εξασφαλίζουν την αξιολόγηση των υπαίθριων αστικών χώρων. Η συγκεκριμένη δημοσίευση επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης ενός δείγματος δώδεκα (12) κήπων (πάρκων) που κατανέμονται στο πολεοδομικό συγκρότημα της Έδεσσας, με στόχο την διερεύνηση και αξιολόγηση των αστικών δεδομένων που διαμορφώνουν το ακουστικό περιβάλλον της.

1 Η πόλη της Έδεσσας

Η Έδεσσα, πρωτεύουσα του νομού Πέλλας, βρίσκεται στην Κεντρική Μακεδονία. Η σημερινή γεωμορφολογία της οφείλεται σε τεράστιες γεωλογικές ανακατατάξεις, που προκάλεσαν τα νερά του Έδεσσαίου ποταμού, που μετέφεραν προϊόντα διάβρωσης και τα εναπόθεταν στη θέση «Βράχος» του εδεσσαϊκού υψιπέδου. Παλιότερα, τα νερά εξαφανιζόταν μέσα σε *καταβόθρες* ακολουθώντας υπόγειες διαδρομές [2]. Με το πέρασμα των αιώνων το ίζημα του ποταμού έφραξε βαθμιαία τις υδάτινες διαδρομές, σχημάτισε μια υπόγεια λεκάνη, της οποίας τα ύδατα βρήκαν κάποτε υπέργεια διέξοδο και σχημάτισαν τους περίφημους καταρράκτες της Έδεσσας [2].

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής είναι ηπειρωτικό. Ωστόσο η λειτουργία των θερμοηλεκτρικών σταθμών και των λιγνιτωρυχείων επέφερε σταδιακές αλλαγές στο μικροκλίμα, που σε συνδυασμό με τις γεωτρήσεις και την ατμοσφαιρική ρύπανση οδήγησαν σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, περιορισμό της υγρασίας του περιβάλλοντος, μείωση των χιονοπτώσεων και του χρόνου χιονοκάλυψης [3].

Η πολεοδομική εξέλιξη της Έδεσσας συνδέεται με αλληπάλληλες καταστροφές και επιδρομές, σε διάφορες ιστορικές περιόδους. Ο παραδοσιακός αστικός της χαρακτήρας διαμορφώθηκε από τα χρόνια της Τουρκοκρατίας. Ωστόσο αλλοιώθηκε σημαντικά στη διάρκεια του 20ου αιώνα, εξαιτίας των πυρκαγιών και της μεταπολεμικής ανοικοδόμησης [2]. Ο αστικός χώρος στα χρόνια της Τουρκοκρατίας ήταν χωρισμένος σε διαχωρισμένες συνοικίες για Έλληνες και Τούρκους. Οι μουσουλμανικές συνοικίες καταλάμβαναν το νοτιοδυτικό τμήμα της πόλης. Η χριστιανική συνοικία, το Βαρόσι στη νοτιοανατολική πλευρά της πόλης, επεκτάθηκε σταδιακά διαμορφώνοντας το σύγχρονο κέντρο και την Τεχοβίτικη συνοικία [1]. Το διασωζόμενο τμήμα του Βαροσιού δίνει την εικόνα της αρχικής πολεοδομικής και αρχιτεκτονικής οργάνωσης του πρώτου οικιστικού πυρήνα και του ιστορικού κέντρου της Έδεσσας. Το αστικό κέντρο της αναδιοργανώθηκε όταν κτίστηκε ο σιδηροδρομικός σταθμός (1893) και διανοίχθηκε η κεντρική αρτηρία που τον ενώνει με την πόλη. Αυτή η αρτηρία διαίρεσε την ενδιάμεση περιοχή (το παλιό Μισιρί) που απέκτησε νεοκλασικά κτίρια, δυο πλατείες-πυρήνες και ευδιάκριτο οδικό δίκτυο [2].

Στα τέλη του 19ου αιώνα, η Έδεσσα απέκτησε μεγάλη ακμή εξελισσόμενη σε οργανωμένο βιομηχανικό κέντρο, χάρη στην κινητήρια δύναμη του νερού και στο σιδηρόδρομο. Στα τέλη της δεκαετίας του '50 η κινηματική δράση των εδεσσαίων πολιτών επέτυχε τη σωτηρία των καταρρακτών, ανατρέποντας την απόφαση του τότε υπουργού Δημοσίων Έργων Κ. Καραμανλή, που προέβλεπε την απομάκρυνση των γνωστών υδατοπτώσεων και τη δημιουργία μιας μεγάλης τεχνητής λίμνης στη θέση του πάρκου των καταρρακτών [2].

Με την ενσωμάτωση της Έδεσσας στο ελληνικό κράτος ξεκίνησε η εκπόνηση ρυμοτομικών σχεδίων και καθορισμού των όρων δόμησης (περιορισμένες διανοίξεις δρόμων και επέκταση του ορθογωνικού κάναβου στη βόρεια πλευρά της πόλης) [2]. Στο μεσοπόλεμο άρχισε ο επανασχεδιασμός στην περιοχή της αγοράς (που καταστράφηκε στην πυρκαγιά του 1935), οπότε και οικοδομήθηκαν κάποια κτήρια που εντάσσονται μορφολογικά στο κίνημα του μοντερνισμού. Το ιστορικό κέντρο της πόλης ξανα-κάηκε στη διάρκεια της γερμανικής κατοχής (1944) και άλλαξε ριζικά με το μεταπολεμικό ρυμοτομικό σχέδιο (1946), που υιοθέτησε την ορθογωνική χάραξη των οικοδομικών νησίδων. Μετά τον εμφύλιο (1950-1970) η οικοδομική δραστηριότητα ακολούθησε το σύστημα της αντιπαροχής : διανοίχτηκαν δρόμοι, ευθυγραμμίστηκαν οικοδομικές γραμμές και ψηλά κτίρια κατέλαβαν τη θέση των παλιών σπιτιών, αλλάζοντας την κλίμακα του ύψους / όγκου των κτισμάτων, με αποτέλεσμα να ανατραπεί η ισορροπία και να αλλοιωθεί ο χαρακτήρας του αστικού χώρου [2].

Τα δομικά υλικά κάλυψης στο κέντρο της πόλης (μπετόν και άσφαλτος) επιβαρύνουν την κατάσταση που δημιουργεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση, συσσωρεύοντας θερμότητα και επιτρέποντας την ηχορύπανση κατά τις ώρες αιχμής. Ωστόσο οι έντεκα (11) πλατείες και τα τέσσερα (4) πάρκα του αστικού χώρου, καθώς και οι εγγύς περιαστικές δασικές εκτάσεις λειτουργούν εκτονωτικά στο φαινόμενο της θερμικής νησίδας [2].

2. Παράμετροι κλιματικής ποιότητας στον αστικό χώρο

Η βιοκλιματική αναβάθμιση των αστικών, υπαίθριων χώρων έχει ως βασικό στόχο τη βελτίωση της κλιματικής ποιότητας τους, με την παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας στα γειτονικά κτίρια. Γενικά, η μελέτη βιοκλιματικής αναβάθμισης ενός αστικού χώρου διερευνά τα στοιχεία του εξωτερικού περιβάλλοντος, που επιδρούν στην κλιματική ποιότητα, η οποία καθορίζεται από διάφορες παραμέτρους όπως : η θερμική - οπτική - ακουστική άνεση και η ποιότητα της ατμόσφαιρας [6]

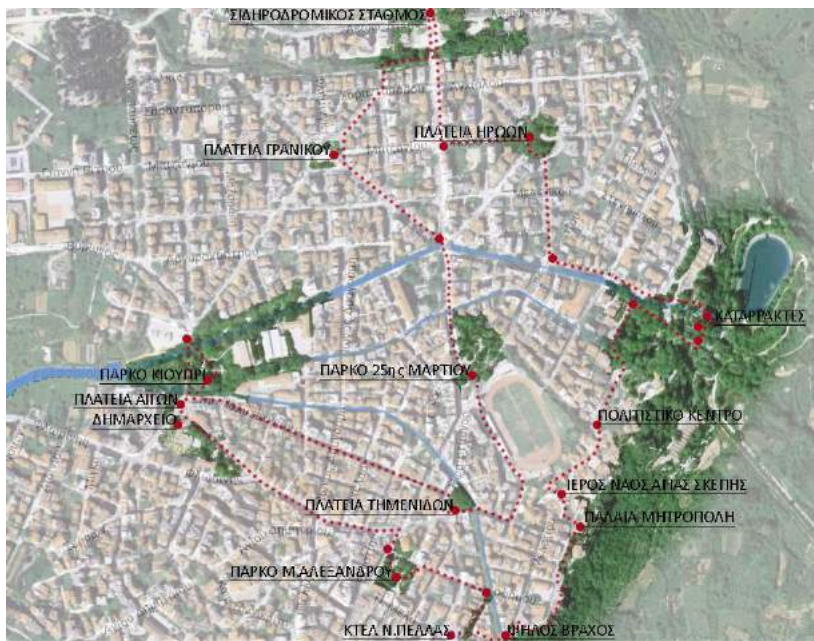
Ειδικά όσον αφορά την ακουστική άνεση, στο ηχητικό περιβάλλον ενός αστικού χώρου περιλαμβάνονται από ευχάριστα ακούσματα (σε αστικά πάρκα) μέχρι δυσάρεστοι θόρυβοι (από την οδική κυκλοφορία). Με κατάλληλες συνθήκες, κάποιοι ήχοι θα πρέπει να διατηρηθούν ή και να ενισχυθούν, επειδή ένα ήπιο αστικό ηχόχρωμα ενδυναμώνει και προάγει την εικόνα μιας περιοχής, τονώνει τον τουρισμό, συντελεί σε υγιεινές συνθήκες διαβίωσης και βελτιώνει την κοινωνική συνοχή [6]

Το πλαίσιο σχετικών ερευνών σ' έναν αστικό, δημόσιο χώρο περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε ηχητικής πηγής (ένταση, συχνότητα, ρυθμός, διάρκεια), σταθερή θέση ή τροχιά κίνησης, επίδραση του περιβάλλοντος χώρου (ανακλάσεις, αντίχηση, θόρυβος βάθους, χωρική κατανομή των εντάσεων), κοινωνικές / πολιτιστικές συνθήκες, αναμενόμενη ησυχία, αποδοχή ή αποδοκιμασία των θορύβων του περιβάλλοντος [4]. Επίσης, παράγοντες που επηρεάζουν την ηχοδιάδοση είναι η απόσταση του ακροατή από την πηγή και οι γωνίες εκπομπής / λήψης, η ηχοαπορρόφηση στην ατμόσφαιρα - στο έδαφος (φυτεύσεις) και οι πνέοντες άνεμοι [5].

3. Μεθοδολογία της έρευνας

Ως θέσεις μετρήσεων (εικόνα 3.1) επιλέχθηκαν : η περιοχή ΚΤΕΛ (1), το πάρκο Μ. Αλεξάνδρου (2), η πλατεία Δημαρχείου (3), το πάρκο Κιουπρί (4), η πλατεία Τημενιδών (5), η πλατεία Γρανικού (6), ο Σιδηροδρομικός Σταθμός (7), η πλατεία

Ηρώων (8), οι Καταρράκτες (9), το πάρκο Καταρρακτών (10), το Βαρόσι (11) και ο Ψηλός Βράχος (12). Σε παρένθεση η αρίθμηση των θέσεων όπως καταγράφονται στα δεδομένα του Πίνακα 4.2.



Εικόνα 3.1. Η διαδρομή συλλογής δεδομένων και οι θέσεις μέτρησης

Η επιλογή των σημείων μέτρησης έγινε με βάση το είδος και το μέγεθος της φυτοκάλυψης, τα δομικά υλικά επικαλύψεων / επιστρώσεων, την επισκεψιμότητα, καθώς και το ποσοστό σκίασης. Ως παράμετροι διερεύνησης επιλέχθηκαν η θερμοκρασία, οι φωτιστικές και ηχητικές στάθμες, η ταχύτητα του ανέμου, η υγρασία, η ακτίνα ηχητικής επιρροής των καταιονισμών και το ποσοστό σκίασης. Ειδικά όσον αφορά το θόρυβο επιλέχθηκαν ζεύγη θέσεων (με προφανή έκθεση / απομόνωση από τις πηγές όχλησης), στην περίμετρο και στο εσωτερικό κάθε κήπου, αντίστοιχα.


Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη φθινοπωρινή και την εαρινή περίοδο (Οκτώβριος 2016, Απρίλιος 2017), ημέρα Κυριακή ή εργάσιμη καθημερινή, σε εποχιακά αντίστοιχα χρονικά διαστήματα (για καταγραφή συγκρίσιμων δεδομένων).

Για τις ανάγκες καταγραφής των δεδομένων σχεδιάστηκε μια πρότυπη καρτέλα (Εικόνα 3.2) και συμπληρώθηκαν καρτέλες για κάθε θέση, κάθε περίοδο μέτρησης.



Στάθμος Π.Α. ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ:
(Νικοδημιου - Δημοκρατίας - Σοφοκλέους)

ΠΡΑΚΤΙΚΑ

Ημερομηνία	Τετάρτη 12-10-16
Ώρα	11:02 π.μ.
Καιρός- φαινόμενα	Συννεφιασμένος 

ΔΗΜΟΚΡΕΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διάλεξη – Έρευνα: “ Δημόσιοι χώροι στη πόλη της Έδεσσας : διερεύνηση
περιβαλλοντικών παραμέτρων “

φθινοπωρινή περίοδος



Θέση μέτρησης 1
Μέσα στο πάρκο, δίπλα σε στάσιμο
υγρό στοιχείο, κάτω από σκέπαστρο

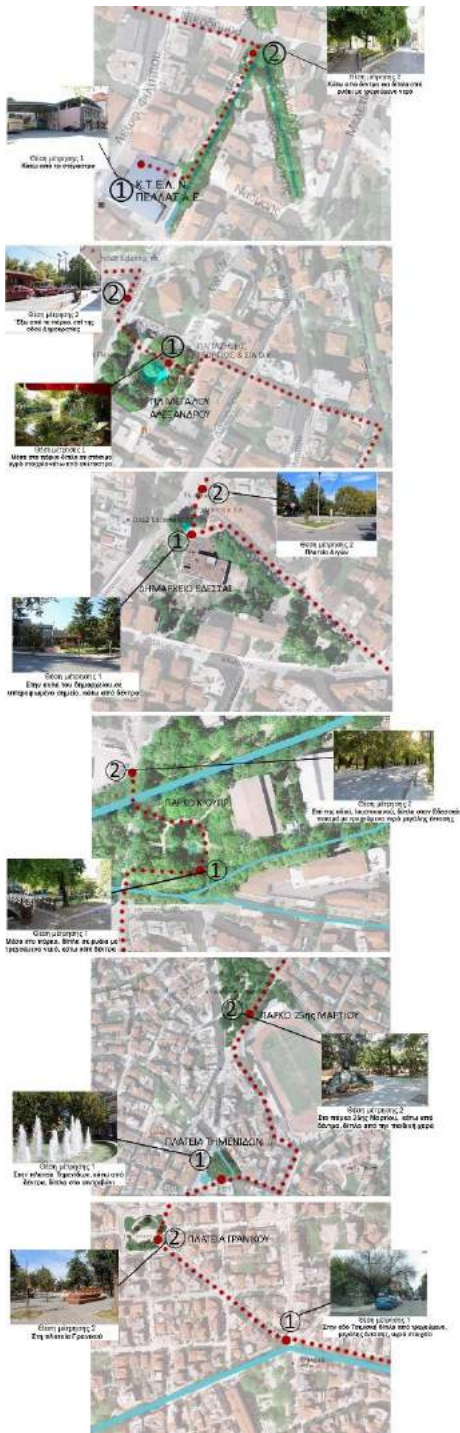


Θέση μέτρησης 2
Έξω από το πάρκο, επί της
οδού Δημοκρατίας

Θερμοκρασία	18,3	°C	18,8
Φωτεινότητα	790	Lux	5580
Θόρυβος	SPL=58,8 / Leq=55,1	db	SPL=64,1 / Leq=59,8
Άνεμος	0,1	Km/h	0,2
Υγρασία	88	%	90
Ακτίνα	-	m	-

Εικόνα 3.2. Η καρτέλα φθινοπωρινής καταγραφής στην πλατεία Μ. Αλεξάνδρου

4. Τα δεδομένα της έρευνας



1. Σταθμός ΚΤΕΑ

Η στάθμη του θορύβου στο σταθμό των ΚΤΕΑ ήταν κατά πολύ υψηλότερη εξαιτίας της λειτουργίας του σταθμού αλλά και της έντονης κυκλοφορίας οχημάτων στις οδούς Π. Μελλά και Φιλίππου.

Στη δεύτερη θέση, η βλάστηση απορροφά σχετικά το θόρυβο του περιβάλλοντος.

2. Σταθμός Πλ. Μεγάλου Αλεξάνδρου

Η βλάστηση επιδρά ανακουφιστικά, διατηρώντας χαμηλά τις στάθμες του θορύβου στο εσωτερικό της πλατείας σε σύγκριση με τον υψηλότερες στάθμες επί της οδού Δημοκρατίας λόγω της έντονης κίνησης οχημάτων και των χώρων εμπορίου και εστίασης της περιοχής.

3. Σταθμός Δημαρχείο Έδεσσας

Η βλάστηση και το φύλλωμα των δέντρων στην περίμετρο του Δημαρχείου συμβάλλουν στην ηχοπροστασία της θέσης σε σχέση με τις στάθμες στην πλατεία Αιγών

4. Σταθμός πάρκο Κιουπρί

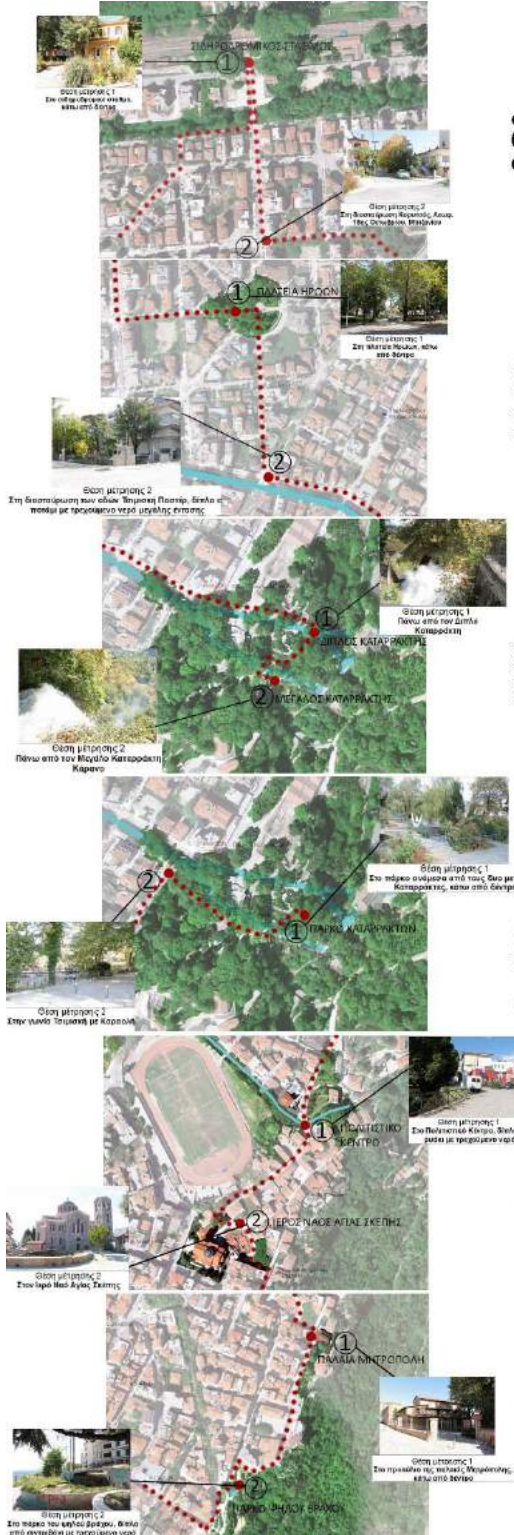
Η βλάστηση συμβάλλει στη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και βελτιώνει την αισθητική, το θόρυβο και το φωτισμό των χώρων. Σε συνδυασμό με το σιντριβάνι και το ποτάμι επενεργούν ανακουφιστικά, διατηρώντας χαμηλά τις στάθμες του θορύβου στο εσωτερικό της πλατείας, ενώ οι στάθμες του θορύβου επί της οδού Ιουστινιανού είναι υψηλές, λόγω της κίνησης των οχημάτων με μεγάλη ταχύτητα. Παρόλα αυτά συναντάμε και στα δύο τα σημεία σχετικά υψηλές τιμές θορύβου και αυτό λόγω της μεγάλης ακτίνας επιρροής των ήχων από καταιονισμούς.

5. Σταθμός Πλ. Τημενιδών - Πάρκο 25ης Μαρτίου

Η περιορισμένη βλάστηση αλλά και οι αστικές λειτουργίες γύρω και μέσα στην πλατεία, επιδρούν ενοχλητικά, διατηρώντας υψηλές στάθμες θορύβου στη πλατεία Τημενιδών συγκριτικά με την έντονη βλάστηση σε μεγαλύτερη επιφάνεια στο πάρκο 25ης Μαρτίου.

6. Σταθμός Πλ. Γρανίκου

Οι στάθμες του θορύβου είναι κατά πολύ υψηλότερες στο σημείο της διασταύρωσης (σημείο με μεγάλη κίνηση οχημάτων, έντονη ορμή των νερών του Έδεσσαίου Ποταμού και συνεπώς μεγάλη ακτίνα επιρροής των ήχων από καταιονισμούς) σε αντίθεση με την πλατεία της γειτονιάς (εκτός του κέντρου της πόλης).



7. Σιδηροδρομικός Σταθμός

Παρά τη βλάβιση, η λειτουργία του σιδηροδρομικού σταθμού εμφανίζει περιοδικά υψηλότερες στάθμες θορύβου σε σχέση με τη διασταύρωση (περιοχή αποκλειστικά κατοικίας).

8. Σταθμός Πλ.Ηρώων

Οι στάθμες του θορύβου ήταν κατά πολύ υψηλότερες στο σημείο της διασταύρωσης (μεγάλη κίνηση οχημάτων και μεγάλη ακτίνα επιρροής της ροής του Εδεσσαίου ποταμού) σε αντίθεση με την πλατεία (περιοχή εκτός του κέντρου της πόλης).

9. Σταθμός Καταρράκτες

Η ορμή των νερών πάνω από το Διπλό Καταρράκτη δημιουργεί μεγαλύτερο θόρυβο από ότι πάνω από το Μεγάλο Καταρράκτη (μεγαλύτερη κλίση, πτώση πάνω σε δέντρο που δημιουργεί τον Διχαλωτό Καταρράκτη).

10. Σταθμός Πάρκο Καταρρακτών

Η στάθμη του θορύβου στο πάρκο είναι υψηλότερη (μεγάλη ακτίνα επιρροής ήχων από καταιονισμό), καθώς ο δρόμος μονής κυκλοφορίας στην γωνία Τσιμισκλή με Καραολή έχει αραή κυκλοφορία οχημάτων.

11. Σταθμός Βαρόσι

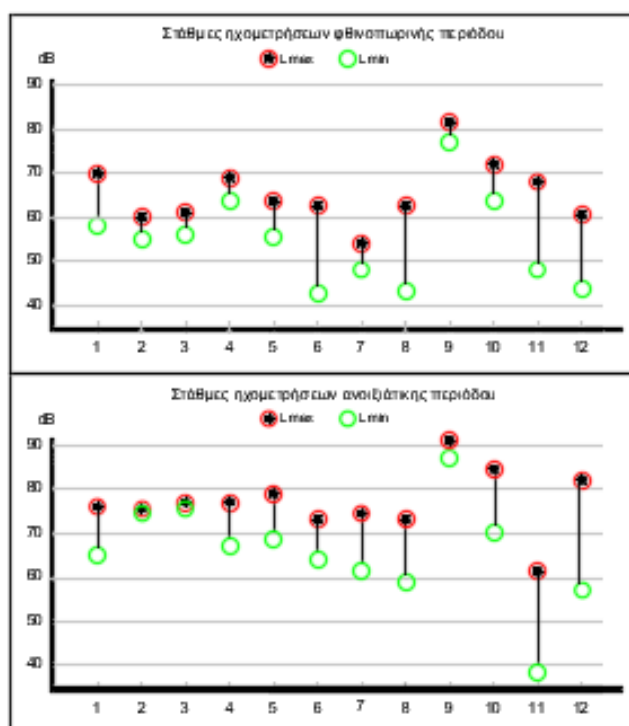
Οι στάθμες θορύβου είναι αρκετά υψηλότερες στο Πολιτιστικό Κέντρο (κίνηση πεζών και οχημάτων), σε σχέση με την εξαιρετικά ήσυχη πλατεία της Αγίας Σκέπης.

12. Σταθμός Ψηλός Βράχος

Ο περιβόλος της εκκλησίας ήταν εξαιρετικά ήσυχος, ενώ ο ήχος του νερού στο πάρκο έδωσε υψηλότερες ηχητικές στάθμες

5. Ανάλυση και συμπεράσματα

Οι στάθμες θορύβου στις 24 θέσεις μέτρησης (12 περιοχές παρατήρησης) την φθινοπωρινή περίοδο κυμαίνονται από 41,7dB (κάτω από δέντρα στην πλατεία Ηρώων) ως 81,9dB (πάνω από το Διπλό Καταρράκτη), ενώ την ανοιξιάτικη περίοδο από 38,7dB (στην πλατεία Αγίας Σκέπης στο Βαρόσι) ως 90,7dB (πάνω από τον μεγάλο καταρράκτη Καραννό) (Εικόνα 4.1).

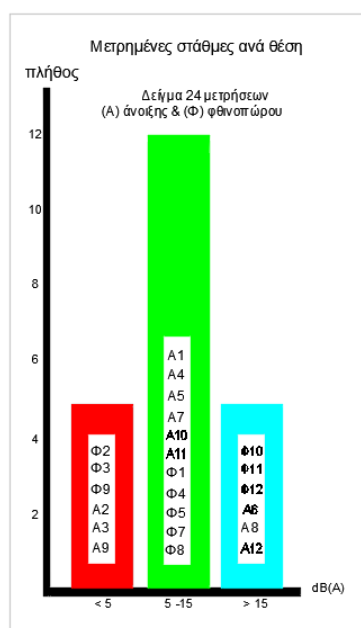


Εικόνα 4.1. Τα αναλυτικά δεδομένα των ηχομετρήσεων κατά τις εργάσιμες ημέρες

Γενικά, υψηλότερες στάθμες θορύβου καταγράφηκαν τις εργάσιμες καθημερινές και την ανοιξιάτικη περίοδο. Μεγαλύτερη ηχητική απόκλιση μεταξύ των δύο σχετικών θέσεων μέτρησης εντοπίστηκε στη πλατεία Ηρώων (το φθινόπωρο) και στο Ψηλό Βράχο (την άνοιξη), ενώ μικρότερες διαφορές (και στις δύο περιόδους) στην πλατεία Μ. Αλεξάνδρου και στο Δημαρχείο. Όπως φαίνεται στα συγκεντρωτικά δεδομένα (Εικόνα 4.2) οι καταγεγραμμένες αποκλίσεις μεταξύ των θέσεων της ίδιας περιοχής κυμαίνονται σε ποσοστό περίπου 25% σε στάθμες ≤ 5 dB ή σε στάθμες ≥ 15 dB, ενώ οι αποκλίσεις μεταξύ 5 - 15dB ανέρχονται σε ποσοστό 50%. Τέλος, χαρακτηριστικό είναι πως μικρές αποκλίσεις, οφειλόμενες σε υψηλές τιμές μέτρησης στις θεωρούμενες ήσυχες θέσεις καταγράφηκαν σε ποσοστό 50% του δείγματος, χάρη στις ανακουφιστικές εκπομπές των καταιονισμών και των ροών των υπέργειων υδάτων (θέσεις με αριθμό 4, 6, 8, 9, 10 και 12).

Ο ήχος αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του αστικού περιβάλλοντος, με σπουδαιότητα ισάξια των υπολοίπων παραμέτρων του αστικού σχεδιασμού. Το ακουστικό περιβάλλον δύναται να θεωρηθεί πόρος, αντί πηγή υποβάθμισης. Παρά τις αναπόφευκτες οχλήσεις, η εξασφάλιση αστικών ζωνών ακουστικής ηρεμίας βελτιώνει το περιβάλλον και συμβάλει στη συνολική ποιότητα ζωής στους αστικούς χώρους.

Η εύκολη πρόσβαση σε ήσυχες αστικές περιοχές είναι ένας σημαντικός ψυχολογικός παράγοντας που αναβαθμίζει τη ζωή μιας πόλης. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματικές οι ακουστικές μελέτες αστικής ανάπλασης θα πρέπει να ενσωματώνονται στον αστικό σχεδιασμό, αντί να πραγματοποιούνται εκ των υστέρων, διορθωτικά.



Εικόνα 4.2. Τα συγκεντρωτικά δεδομένα των ηχομετρήσεων

Κατά την έρευνα μας στην Έδεσσα διαπιστώσαμε ότι κομβικό ζήτημα στη διαμόρφωση των περιβαλλοντικών συνθηκών στους δημόσιους, υπαίθριους χώρους είναι η επιρροή του ανθρωπογενούς (κυρίως κυκλοφοριακού) θορύβου. Στο εσωτερικό των πάρκων και των πλατειών οι στάθμες θορύβου είναι σταθερά χαμηλότερες των αντιστοίχων θέσεων στην περίμετρο.

Αξιοπρόσεκτο είναι πως υψηλές στάθμες, ενός χαρακτηριστικού ηχητικού φάσματος που προσομοιάζει με το λευκό θόρυβο, καταγράφηκαν και στις πολυάριθμες περιοχές της Έδεσσας με τρεχούμενα νερά [7]. Αποδεικνύεται δηλαδή πως η απομείωση των οχληρών αστικών θορύβων και η επικάλυψη τους από τα ευεργετικά ακούσματα των καταιονισμών αναβαθμίζει τους υπαίθριους χώρους και διασφαλίζει συνθήκες ηρεμίας και ευεξίας.

6. Αναφορές

- [1] Σταλίδης, Κ. «Η Έδεσσα κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας : τέλη 14ου αι, έως 1912», Μυγδονία, Θεσσαλονίκη (2012)
- [2] Παλάντα, Ρ. «Έδεσσα: η πόλη των νερών», Καστανιώτης, Αθήνα (1992)
- [3] Κουταλιανός, Α. «Σχέδιο δράσης αειφόρου ενέργειας Δήμου Έδεσσας» (2015)
- [4] Καρβούνης Α. Μητράκα Ζ., Μπενάς Ν., Χρυσουλάκης Ν. «Πρόγραμμα Βιοκλιματικών Αναβαθμίσεων Δημόσιων Ανοικτών Χώρων» (2011)
- [5] Μπάρκας Ν. «Αστικές Αναπλάσεις & Πράσινος Σχεδιασμός», Ξάνθη (2014)
- [6] «Σχεδιασμός Υπαίθριων Αστικών Χώρων με βιοκλιματικά κριτήρια», Έργο RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces), ISBN: 960-86907-2-2, ΚΑΠΕ (2004),
- [7] Μπάρκας, Ν. «Η Ηχοπροστασία ως Παράμετρος Σχεδιασμού στην Αρχιτεκτονική Τοπίου», Πρακτικά Συνεδρίου Αρχιτεκτονική Τοπίου, Θεσσαλονίκη, (2005).

All day bar στο κέντρο της Θεσσαλονίκης : ηχομονωτικές ανεπάρκειες 10 χρόνια μετά

Νίκος Μπάρκας Ρίκα Δεληγιαννίδου
καθηγητής διδάσκουσα ΠΔ/407
nbarkas@arch.duth.gr rika_del5@yahoo.gr
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε παλαιότερη ανακοίνωση εξετάσαμε την ηχορύπανση του κέντρου της Θεσσαλονίκης, εξαιτίας των καταστημάτων ολόημερης διασκέδασης, την περίοδο 2005-06. Η προτεινόμενη ανακοίνωση συνεχίζει εκείνη την έρευνα (περίοδος 2016-17) και προχωρά μια συγκριτική αξιολόγηση του προβλήματος. Τα νέα ερευνητικά δεδομένα, με την ίδια μεθοδολογία, αφορούν ένα δείγμα 26 all day café bars, στις ίδιες περίπου ζώνες του κέντρου της πόλης και περιλαμβάνει οδούς όπου τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη πύκνωση των εγκαταστάσεων. Σκοπός της ανακοίνωσης είναι να αναδειχθούν οι ελλείψεις στο πλαίσιο αδειοδότησης / εποπτείας των κέντρων διασκέδασης και να συσχετισθεί το μέγεθος της εξ αυτών αστικής ηχορύπανσης, με πολεοδομικές ρυθμίσεις και παραμέτρους οργάνωσης του αστικού χώρου.

All day bar in the city center of Thessaloniki: sound protection deficiencies 10 years later

ABSTRACT

In an older paper (2007) we examined the noise pollution in the center of Thessaloniki, due to all-day café bars (period 2005-06). The proposed paper continues the survey (period 2016-17) and proposes a comparative evaluation of the problem. New research data, using the same methodology, refer to a sample of 26 all day café bars, in the same area of the city center where in recent years there has been a great increase in the number of entertainment installations. The purpose of the recent paper is to identify the deficiencies in the licensing/ supervision of the all-day café bars and to correlated the dimensions of urban noise pollution to certain urban spatial planning parameters.

Εισαγωγή

Η παρούσα ανακοίνωση αποτελεί τη συγκριτική μελέτη δύο διαδοχικών ερευνών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων ΔΠΘ και αποσκοπούσαν στην παρακολούθηση και καταγραφή της ηχορύπανσης στο ιστορικό κέντρο της Θεσσαλονίκης εξαιτίας της λειτουργίας των all day café-bar, στη διάρκεια της

τελευταίας 10ετίας (2005-2017). Στο πεδίο της έρευνας συνυπάρχουν κατοικίες με πολυάριθμα μικρά κέντρα ολόημερης διασκέδασης τα οποία για λόγους φοροδοτικούς, επεκτείνονται με την άδεια ή ανοχή της Τοπικής Αυτοδιοίκησης σε περιμετρικούς, κοινόχρηστους χώρους, ενώ λόγω της έλλειψης προληπτικού ελέγχου της μελέτης των οικοδομικών εφαρμογών τους διαθέτουν συνήθως διαφανείς και πτυσσόμενες προσόψεις, χαμηλής ηχομονωτικής ικανότητας, κι επίσης συχνά λειτουργούν με ανοικτή την κεντρική είσοδο και χωρίς προθάλαμο. [1], [2]

Ως αποτέλεσμα αυτού του διαχρονικού καθεστώτος είναι να διαδίδονται ελεύθερα, μέρα και νύχτα, οι θόρυβοι από τις μουσικές εκπομπές, τις υπόλοιπες Η/Μ εγκαταστάσεις τους και τις υπαίθριες συναθροίσεις των θαμώνων, μετατρέποντας την περιοχή του κατοικημένου κέντρου της Θεσσαλονίκης σε μια απέραντη βιομηχανική ζώνη διασκέδασης. Η γεμάτη θορύβους αστική καθημερινότητα (στην εργασία, στις μετακινήσεις, στην ψυχαγωγία) επεκτείνεται και στις ώρες ανάπαυσης, υποχρεώνοντας τους κατοίκους να διαβιούν σ' ένα ηχητικό περιβάλλον που προκαλεί άγχος και σχετικά προβλήματα υγείας. Το δικαίωμα των πολιτών στην ησυχία, και κατ' επέκταση η υποχρέωση της πολιτείας να το προστατέψει κατέληξαν κενό γράμμα. [3], [4], [5]

Η διπλή ταυτότητα των all day cafe-bar οδηγεί σε μια ολοκληρωτική επικυριαρχία : διαστέλλει τα όρια του ιδιωτικού σε βάρος του δημόσιου χώρου κι αναδεικνύει τις εκπομπές των επιχειρήσεων διασκέδασης σε αγαθό υπέρτερο της ησυχίας των περιοίκων. Με φόντο τη δυνατή ως εκκωφαντική μουσική και την αδυναμία ακουστικής επικοινωνίας των θαμώνων η συμμετοχή σε μια τέτοια εικονική ψυχαγωγία επιβάλλεται ως καταναλωτικό πρότυπο.

Όπως έχει διαπιστωθεί σε πολλές, προηγούμενες έρευνες, τα βασικά προβλήματα εξαιτίας της λειτουργίας των κέντρων διασκέδασης είναι οι υψηλές στάθμες εκπομπής, η πρόκληση υπαίθριων συναθροίσεων και κυκλοφοριακής συμφόρησης λόγω αδυναμίας διάθεσης χώρων στάθμευσης, η ελλιπής ή ανύπαρκτη οικοδομική ηχομόνωση, η κακή ακουστική χώρου και η κατάχρηση του ηλεκτρακουστικού εξοπλισμού. [6] Παρά τις Κυβερνητικές ή Δημοτικές εξαγγελίες κι απόπειρες για την εφαρμογή συγκεκριμένων μέτρων ή ρυθμιστικών πλαισίων, η αύξηση της ηχορύπανσης στην Ελλάδα την τελευταία 30ετία, εξαιτίας της λειτουργίας των κέντρων διασκέδασης, βαίνει επιδεινούμενη. Αυτό το ανεξέλεγκτο καθεστώς δείχνει τις ισχυρές διασυνδέσεις των επιχειρηματιών της διασκέδασης με την πολιτική εξουσία (ανεξαρτήτως κομματικής απόχρωσης), αλλά και την στενή διαπλοκή των επιχειρήσεων ψυχαγωγίας με τους μηχανισμούς διαχείρισης της διοίκησης. [7], [8]

Η λειτουργία των στεγασμένων Κέντρων Διασκέδασης προσδιορίζεται από την Υ.Α Α5/3010/1985 (ΦΕΚ 593/Β/2-10-85) όπου αναφέρονται τα μέτρα προστασίας από θορύβους μουσικής και ορίζεται η Δημοτική Αστυνομία ως υπεύθυνη για τον έλεγχο της τήρησης των διατάξεων της κοινής ησυχίας και της λειτουργίας τους. Η ηχομόνωση τους θεωρείται ικανοποιητική όταν στα όρια της ιδιοκτησίας του καταστήματος δεν ξεπερνά στάθμες 30-45 dB(A), ανάλογα με τον χαρακτήρα της περιοχής και η ηχο-απομόνωση τους από γειτονικό δωμάτιο κατοικίας είναι ≥ 65 dB (A), κατά τη διάρκεια μέτρησης με στάθμη λειτουργίας 100 dB(A) μέσα στο κατάστημα. Επίσης, σύμφωνα με ΠΔ 180/1979 (άρθρο 3, 1), τα κέντρα διασκέδασης σε υπαίθριους χώρους οφείλουν να έχουν απόσταση ≥ 300 m από τον πλησιέστερο οικισμό, ενώ, σύμφωνα με το ΦΕΚ Β' 15/1996 (αρ. 1023/2/37, άρθρο 3), τις μεσημβρινές και νυκτερινές ώρες κοινής ησυχίας απαγορεύεται στα κέντρα διασκέδασης κάθε

1. Η μεθοδολογία της Έρευνας

Η ανακοίνωσή μας περιλαμβάνει δεδομένα από επιτόπιες, συστηματικές ηχομετρήσεις, που πραγματοποιήθηκαν βραδινές και μεταμεσονύχτιες ώρες (από 23μμ ως 3πμ) σε δείγμα σαράντα (40, το 2005) και είκοσι έξι (26, το 2017) καταστημάτων τύπου all day café-bar, σε ένα τμήμα του ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης όπου τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη πύκνωση των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος, το οποίο εκτείνεται από τη Παλιά Παραλία μέχρι την οδό Α. Σβώλου και από την πλατεία Αριστοτέλους μέχρι το Λευκό. Τα καταστήματα του δείγματος επιλέγηκαν με κριτήρια τη λειτουργία τους κατά τις μεταμεσονύχτιες ώρες, τη θέση τους σε ισόγεια ή ημιυπόγεια πολυκατοικιών, με συνήθως μικρές κατόψεις (80-150 m²) κι ελάχιστους χώρους υποστήριξης (αποθήκες, WC, χώρους εγκαταστάσεων).

Η διαδικασία των ηχομετρήσεων περιλάμβανε καταγραφές της στάθμης λειτουργίας σε αποστάσεις 3 και 10 m από την κεντρική είσοδο, καθώς επίσης και του θορύβου βάθους στον περιβάλλοντα χώρο. Παράλληλα σε κάθε κατάσταση καταγράφηκαν αναλυτικά τα υλικά κατασκευής των προσόψεων, η αναλογία των διαφανών / συμπαγών στοιχείων της πρόσοψης, το είδος των υαλοπετασμάτων (μονό ή διπλό), η εφαρμογή προθαλάμου στην είσοδο, η διατήρηση ανοιχτής ή κλειστής της κεντρικής εισόδου και τέλος η παρουσία θαμώνων σε τραπέζο-καθίσματα έξω από το κατάστημα, κατά τις συγκεκριμένες ώρες / ημέρες των μετρήσεων.

2. Τα δεδομένα της έρευνας - ανάλυση

Όπως προέκυψε από τις ηχομετρήσεις της πρόσφατης έρευνας (2017) :

-οι μεγαφωνικές εγκαταστάσεις σε όλα τα café-bars του δείγματος, ανεξαρτήτως εποχής, ήταν τοποθετημένες στο εσωτερικό των καταστημάτων,

-οι ηχητικές στάθμες λειτουργίας έξω από την είσοδο των καταστημάτων του δείγματος κυμαίνονται μεταξύ 95 - 110 dB(A).

Όλες οι σχετικές στάθμες, ανεξαρτήτως εποχής είναι > 80dB(A). Σε ποσοστό > 50% των καταστημάτων του δείγματος καταγράφονται στάθμες >100 dB(A) το χειμώνα, ποσοστό που γίνεται 100% κατά την εαρινή περίοδο, με τις στάθμες >110 dB(A) προσεγγίζουν ποσοστό 38% του δείγματος,

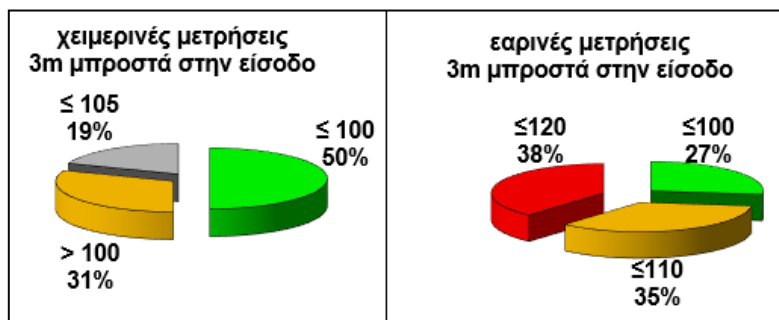
-οι ηχητικές στάθμες στην περίμετρο της πρόσοψης των καταστημάτων του δείγματος κυμαίνονται μεταξύ 77 - 98 dB(A).

Στάθμες λειτουργίας > 80 dB(A) καταγράφηκαν σε ποσοστό > 96% του δείγματος κατά τη χειμερινή περίοδο, ενώ κατά την εαρινή περίοδο στάθμες > 100dB (A) προσεγγίζουν ποσοστό 27% των καταστημάτων του δείγματος.

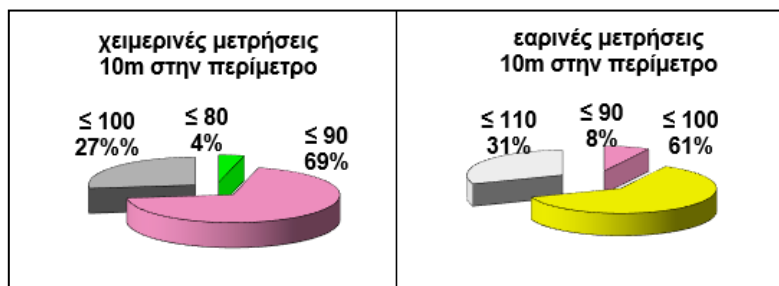
-ο θόρυβος βάθους στην ευρύτερη περίμετρο των καταστημάτων προέκυψε ιδιαίτερα υψηλός, ως αποτέλεσμα όλων των έμμεσων θορύβων που συνοδεύουν τη λειτουργία των café-bar (κυκλοφοριακή συμφόρηση, διαδικασίες προσέγγισης/ αναμονής/ αναχώρησης αυτοκινήτων και μοτοσικλετών, νυχτερινή συνάθροιση και θόρυβος των υπολοίπων Η/Μ εγκαταστάσεων των καταστήματος),

-οι προσόψεις των καταστημάτων του δείγματος διαθέτουν εκτεταμένες γυάλινες επιφάνειες (ποσοστό 96% βρίσκεται σε αναλογία διαφανών > 40%), στην πλειο-

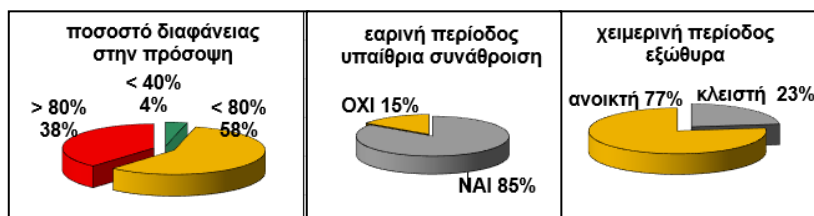
νότητά τους από μονούς υαλοπίνακες (88,5%), σε πυκνό κάναβο και με περιορισμένη περιμετρική αεροστεγανότητα στις κάσες,



Σχήμα 2.1. Δεδομένα των ηχο-μετρήσεων (2017) μπροστά στην είσοδο



Σχήμα 2.2. Δεδομένα των ηχο-μετρήσεων (2017) στην περίμετρο της πρόσοψης



Σχήμα 2.3. Οικοδομικά και λειτουργικά δεδομένα του δείγματος

-κατά τις χειμερινές μετρήσεις ποσοστό 77% των café-bars του δείγματος διατηρούσαν τις πόρτες κλειστές, εξαιτίας των χειμερινών συνθηκών, γεγονός που αποθάρρυνε τη λειτουργία υπαίθριων τραπεζο-καθισμάτων σε ποσοστό περίπου 35%. Αντίθετα, κατά τις εαρινές μετρήσεις η συντριπτική πλειοψηφία των καταστημάτων του δείγματος (ποσοστό 92,3%) είχε ανοικτή την πόρτα της εισόδου, συνήθως είχαν αφαιρεθεί οι υαλοπίνακες των προσόψεων και οι υπαίθριες συναθροίσεις εκτοξεύονται σε ποσοστό 85%, με αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη επέκταση της λειτουργίας τους στους παρακείμενους κοινόχρηστους χώρους.

-σε κανένα κατάστημα του δείγματος δεν εφαρμόστηκε προθάλαμος, προφανώς για οικονομία χώρου.

Όπως φαίνεται, στη διάρκεια αυτής της 10ετίας, παρά την αύξηση το λειτουργικού θορύβου των καταστημάτων, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και οι οικοδομικές διατάξεις στην κατασκευή των καταστημάτων παραμένουν σταθερές ή ευτελίζονται ποιοτικά, αν αναλογιστούμε ότι η παλαιότερη έρευνα διαπίστωσε ποσοστό διαφάνειας στις προσόψεις > 80% στο 40% του δείγματος και προθαλάμους σε ποσοστό 15% του δείγματος, διαμόρφωση που μπορεί να διαπιστωθεί (και να καταγραφεί) με απλή παρατήρηση, ακόμη κι ανειδίκευτων ελεγκτών.

Είναι προφανές ότι, τα κέντρα υγειονομικού ενδιαφέροντος / διασκέδασης παραμένουν ισχυρές εστίες ηχορύπανσης στο κέντρο της Θεσσαλονίκης και μάλιστα το πρόβλημα έχει οξυνθεί, σε σύγκριση με τα δυσμενή δεδομένα της προηγούμενης 10ετίας, παρά τις εξαγγελίες της Δημοτικής Αρχής :

-στα καταστήματα του παλιού δείγματος ποσοστό 14,5% υπερέβαινε τη στάθμη 80dB(A) έξω από την κεντρική είσοδο, έναντι όλων των καταστημάτων (100%) του σύγχρονου δείγματος,

-στα καταστήματα του παλιού δείγματος το ποσοστό που υπερέβαινε τη στάθμη 100dB(A) έξω από την κεντρική είσοδο ήταν μηδενικό, έναντι ποσοστού 58% στο σύγχρονο δείγμα.

3. Συμπεράσματα

Το ακουστικό περιβάλλον εξαιτίας της λειτουργίας των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος απεικονίζεται σε χάρτες θορύβου και πυκνότητας των εγκαταστάσεων ανά 100 μέτρα στις επιλεγμένες οδούς του δείγματος. Ανεξαρτήτως Της εποχής των σύγχρονων μετρήσεων, στην περίμετρο των καταστημάτων της Παλιάς Παραλίας και των οδών Κ. Ντηλ και Πρ. Κορομηλά καταγράφονται στάθμες 105-110 dB(A). Ακολουθούν σε επίπεδο όχλησης οι οδοί Καλαποθάκη, Ικτίνου, Π. Π. Γερμανού, Π. Μελά κι ένα τμήμα της Α. Σβώλου με 100-105 dB(A). Τέλος, οι οδοί γύρω από την πλατεία Ναυαρίνου παρουσιάζουν μικρότερες, αλλά καθόλου αμελητέες, στάθμες θορύβου 95-100 dB(A).

Η εξήγηση του προβλήματος είναι μάλλον απλή, όπως φαίνεται από την πυκνότητα των καταστημάτων στο σχήμα 3.2. Η Παλιά Παραλία (με οικοδομές μόνο από τη μία πλευρά του δρόμου), φιλοξενεί κατά μέσο όρο 3 ως 6 café -bars / 100 μέτρα και σε τμήμα 1Km συνολικά 35 εγκαταστάσεις, γεγονός που την καθιστά (αν και από τις ακριβότερες αστικές περιοχές της πόλης) στην πλέον επιβαρυνμένη οικιστική ζώνη του κέντρου. Τα ίδια μεγέθη καταγράφηκαν προ 10ετίας στις ίδιες ή σε ελάχιστα διαφορετικές σημειακές θέσεις εγκαταστάσεων (6 /100m, 30 καταστήματα σε μήκος 900m, σχήμα 3.1), παρά την υποτιθέμενη διευθέτηση του προβλήματος από το Δήμο Θεσσαλονίκης. Στο χάρτη πυκνότητας των καταστημάτων διαπιστώνουμε επίσης ότι σε τμήμα της Πρ. Κορομηλά ο αριθμός των καταστημάτων εκτοξεύεται τα 7-10 /100m, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα της, όπως και στην οδό Κ. Ντηλ, καταγράφονται 1-3 /100μ.

Αξιοσημείωτο είναι πως, κατά τη χειμερινή περίοδο, στις οδούς Καλαποθάκη και Ικτίνου, οι στάθμες που καταγράφονται δεν είναι οι υψηλότερες, αν και συναντάμε 11-15 εγκαταστάσεις, ή 7-10 αντίστοιχα, ανά 100 m, φαινόμενο που μάλλον οφείλεται στην απαγόρευση της κυκλοφορίας οχημάτων. Αντίθετα, κατά την εαρινή περίοδο οι στάθμες στις ίδιες οδούς κυμαίνονται σε 110-120 dB(A), λόγω του φαι-

νομένου της αστικής σήραγγας που αναπτύσσεται ανάμεσα στις εκατέρωθεν ψηλές πολυκατοικίες, εξαιτίας του εκτεταμένου πλήθους των υπαίθριων συναθροίσεων (όπως και στην οδό Ισαύρων, κοντά στην πλατεία Ναυαρίνου).



Σχήμα 3.1 Η πυκνότητα των εγκαταστάσεων, έρευνα 2005 – 06 [1]



Σχήμα 3.2 Η πυκνότητα των εγκαταστάσεων, έρευνα 2016-17

Η διαχρονικά σταθερή κατάσταση της πυκνότητα των εγκαταστάσεων all-day café bars, τις οποίες αδειοδοτεί εν πλήρη συνείδηση ο Δήμος Θεσσαλονίκης, αλλά και οι ασύδοτα υψηλές στάθμες λειτουργίας που επιτρέπουν οι έχοντες τον κατασταλτικό έλεγχο, έχουν οδηγήσει σε εκτραχηλισμό του προβλήματος της αστικής ηχορύπανσης. Η αύξηση των ηχητικών εντάσεων στη διάρκεια αυτής της 10ετίας είναι τέτοια που τα απόλυτα μεγέθη των ηχομετρήσεων που καταγράψαμε μας φαινόταν απίστευτα. Η ανοχή στο εκτεταμένο φάσμα της οχληρής παραβατικότητας φαίνεται πως εγγράφεται στο πλαίσιο μιας «ελληνικής ιδιαιτερότητας», όπου η νομο-

θεσία που θεσπίστηκε για να προστατεύει τους πολίτες από την ηχορύπανση, δεν λαμβάνεται υπόψη ούτε προληπτικά, ούτε κατασταλτικά. Η όχληση από τα all-day café bars θεωρείται κάτι φυσιολογικό, σαν παρεπόμενο μιας φυσικής καταστροφής ή σαν δεδομένο της πολεοδομικής οργάνωσης του αστικού κέντρου : τα επιχειρηματικά συμφέροντα είναι ισχυρότερα από τα συνταγματικά δικαιώματα των περιοίκων.

Κλείνοντας, θα επαναλάβουμε ακόμη μια φορά, τις γνωστές, βασικές κατευθύνσεις για τη διασφάλιση της ακουστικής άνεσης στο κέντρο των πόλεων [8] :

-θέσπιση μιας μέγιστης πυκνότητας των εγκαταστάσεων υγειονομικού ενδιαφέροντος ανά μήκος ή οικοδομικό τετράγωνο, με παράλληλη θεσμοθέτηση των χρήσεων στις επιμέρους αστικές ζώνες,

-υποχρεωτική κατάθεση μελέτης ηχομόνωσης κατά την έγκριση μιας άδειας λειτουργίας και συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του Κτιρ. Κανονισμού (άρθρο 12)

-Δημοτικοί Κανονισμοί προδιαγραφών για βελτιωμένη ηχομονωτική επάρκεια των καταστημάτων και εφαρμογή αντι-θορυβικών διατάξεων σε καταστήματα όπου επιτρέπεται η υπαίθρια συνάθροιση,

-συχνοί έλεγχοι (εκτός του ωραρίου των Δημοσίων Υπηρεσιών) από εκπαιδευμένου τεχνικούς, με βαθμονομημένα / πιστοποιημένα ηχόμετρα.

4. Αναφορές

[1] Δεληγιαννίδου, Ελ. - Μαυρίδου Θ. «Κέντρα διασκέδασης στο κέντρο της πόλης», Διάλεξη, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, (2005),

[2] Ιατρίδου, Ζ. - Σκάλκου Ελ. «Διερεύνηση αστικής ηχορύπανσης από κέντρα διασκέδασης», Διάλεξη, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, (2017)

[3] Δαλαμάγκας Β., *Θόρυβος στο αστικό περιβάλλον*, Αθήνα, (2016)

[4] ΕΛΥΑΝΕ *Ο θόρυβος, αυτός ο άγνωστος*, Αθήνα (2007)

[5] WHO «*Burden of Disease from Environmental Noise*», Copenhagen (2011)

[6] Μπάρκας, Ν. (2014), "*Ηχος Και Θόρυβος: μια θεωρητική εισαγωγή*", www.noiseawareness.gr [πρόσβαση 7/9/2018]

[7] Αλφιέρη Στ. «Ένας χρόνος εμπειρία από την έκδοση αδειών σε κέντρα διασκέδασης», στο : *Προβλήματα Ηχομόνωσης και Ακουστικής Χώρου στα Κέντρα Διασκέδασης*, Αθήνα (1992)

[8] Μπάρκας, Ν. - Δεληγιαννίδου, Ρ. - Μαυρίδου, Δ. «All day bar στο κέντρο της Θεσσαλονίκης», στο «*ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2006*», σελ. 331-338, Ηράκλειο (2007)

Μελέτη χρήσης πρότυπου ακουστικού αισθητήρα χαμηλού κόστους σε εφαρμογές έξυπνων περιβαλλόντων

Παναγιώτης Ζέρβας¹, Σπύρος Κουζούπης², Νικόλαος Στεφανάκης³

Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής Τ.Ε.
ΤΕΙ Κρήτης
pzervas@staff.teicrete.gr¹, skouzo@staff.teicrete.gr², nstefana@staff.teicrete.gr³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές χαμηλού κόστους (*credit card sized PCs*), τόσο σε επίπεδο επιδόσεων όσο και σε επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης, έχουν ανοίξει νέους δρόμους σε μια ευρεία και πιο προσιτή έρευνα μετατρέποντας τους σε συσκευές παρακολούθησης μέσω της ανάπτυξης δικτύων ασύρματων αισθητήρων. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται και αξιολογείται πρότυπος ακουστικός αισθητήρας χαμηλού κόστους βασισμένος στην πλατφόρμα *Raspberry Pi 3*, ο οποίος υποστηρίζει προηγμένες λειτουργίες ανάλυσης ηχητικού πεδίου. Πέραν της παρουσίασης των συνιστωσών του συστήματος, γίνεται αξιολόγηση των δυνατοτήτων ακουστικής καταγραφής των κόμβων για την σωστή εκτίμηση της στάθμης ηχητικής πίεσης, και άλλων ακουστικών παραμέτρων. Τέλος γίνεται μελέτη και αξιολόγηση της δυνατότητας συνεργατικής καταγραφής για τον εντοπισμό θέσης ηχητικής πηγής μέσα από το προσδιορισμό της χρονικής διαφοράς άφιξης του ήχου.

Evaluating a low-cost acoustic sensor for smart environments applications

ABSTRACT

Recent technological advances in both credit card sized PCs, in both performance and energy consumption, have opened new ways for a broader and more affordable research, by turning these computers into tracking devices through the development of wireless sensor networks. This paper describes and tests a low-cost acoustic sensor based on the Raspberry Pi 3 platform, which supports advanced sound field analysis functions. Besides presenting the system's components, an evaluation of the audio recording capabilities of the nodes for the correct assessment of sound pressure level as well as of other acoustic parameters is carried out. Finally, the possibility of collaborative recording for sound source localization tasks, from a pair of nodes through the determination of the time difference of arrival of the sound, is studied and tested.

Εισαγωγή

Πρωτοβουλίες για έξυπνες πόλεις, επωφελούνται από τις πρόσφατες εξελίξεις στην διάχυτη και έξυπνη ανίχνευση συμβάντων μέσω της δυνατότητας εκτεταμένης συνδεσιμότητας δικτύων αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, διανομή και ανάλυση δεδομένων. Ειδικότερα, μία διακριτή κατεύθυνση σε αυτή την εξέλιξη αφορά την έρευνα και ανάπτυξη σε θέματα που άπτονται της αυτόματης ανάλυσης αστικών ηχητικών σκηνών. Τα ερευνητικά αποτελέσματα τέτοιων προσπαθειών βρίσκουν χρήσιμες εφαρμογές, στην ηχητική παρακολούθηση (*audio surveillance*) και την παρακολούθηση της ηχορύπανσης (*noise monitoring*). Τα δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (ΔΑΑ) προσφέρουν μια λύση για την αντιμετώπιση της πρόκλησης παρακολούθησης του θορύβου με αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα. Δεν επιτρέπουν μόνο τη καταγραφή δεδομένων θορύβου για μεγάλες χρονικές περιόδους, αλλά παρέχουν και την ευελιξία για την εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών, και άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων, χωρίς να απαιτείται η ανθρώπινη παρουσία.

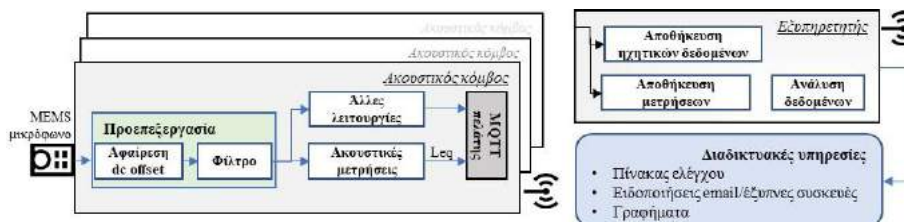
Σχετικά με την ακουστική παρακολούθηση αστικών περιοχών γίνεται προσπάθεια για την ανάπτυξη ΔΑΑ αποτελούμενων από σταθερούς και φορητούς ακουστικούς κόμβους, με προδιαγραφές ευρείας γεωγραφικής κάλυψης και ταυτοποίησης των αστικών ηχητικών πηγών. Στην κατεύθυνση αυτή, οι επικρατούσες τάσεις αφορούν στην ανάπτυξη ακουστικών κόμβων που στηρίζονται είτε σε υπολογιστές μοναδικής-κάρτας (*single board computers*) [1], είτε σε έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Η χρήση των υπολογιστών μοναδικής-κάρτας, σε συνδυασμό με μικρόφωνα MEMS (*MicroElectro-Mechanical Systems*) [2], επιτρέπει την ανάπτυξη σταθερών ακουστικών κόμβων που συνδυάζουν μεγάλη υπολογιστική ισχύ, συνδεσιμότητα, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό κόστος. Ερευνητικά και αναπτυξιακά προγράμματα όπως το Ear-IT [3] και το SONYC [4] στήριξαν την υλοποίηση τους στην ανάπτυξη τέτοιων αισθητήρων. Για την επιτυχή χρήση των παραπάνω λύσεων ως συσκευές μέτρησης, θέματα όπως η ακρίβεια μέτρησης αλλά και βαθμονόμησης είναι καίριας σημασίας.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι αφενός η παρουσίαση των τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών της προτεινόμενης υλοποίησης ΔΑΑ και αφετέρου η παράθεση πειραμάτων αξιολόγησης των ακουστικών αισθητήρων. Στο πλαίσιο αυτό, η ενότητα 1 περιγράφει τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες του προτεινόμενου συστήματος. Η ενότητα 2 περιγράφει την πειραματική διαδικασία αξιολόγησης του ακουστικού αισθητήρα αναφορικά με τη βαθμονόμηση του ως προς πρότυπο μικρόφωνο και τη δυνατότητα συνεργατικής καταγραφής ακουστικών γεγονότων. Στην ενότητα 3 παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα. Τέλος στην ενότητα 4 δίνονται κάποια συμπεράσματα και αναφέρονται μελλοντικά ερευνητικά θέματα.

1. Αρχιτεκτονική πλατφόρμας συνεχούς ακουστικής καταγραφής

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από έξυπνους κόμβους ακουστικής καταγραφής, οι οποίοι συνδέονται μέσω ασύρματης ζεύξης με έναν εξυπηρετητή στο νέφος (*cloud server*). Στην Εικόνα 1 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα των δομικών στοιχείων του. Ο ακουστικός κόμβος αποτελείται από ένα μικρόφωνο μέτρησης και ένα ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα με ασύρματη μονάδα

μετάδοσης δεδομένων. Για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχετικών με το ιδιωτικό απόρρητο αλλά και τη συνεχή λήψη και αποθήκευση ήχου, το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης και της επεξεργασίας γίνεται στον αισθητήρα και μόνο δεδομένα που έχουν αναλυθεί μεταφέρονται και αποθηκεύονται στον εξυπηρετητή.



Εικόνα 1: Λειτουργικό διάγραμμα πλατφόρμας ακουστικής καταγραφής

Στον αισθητήρα, υπολογίζονται συνεχώς οι τιμές στάθμης ηχητικής πίεσης σταθμισμένης κατά A, σε χρονικό παράθυρο που μπορεί να ορισθεί κατά περίπτωση. Οι τελικοί χρήστες έχουν πρόσβαση στα δεδομένα μέτρησης και στην ανάλυση των μετρήσεων μέσω μιας δικτυακής πύλης. Για την επικοινωνία με τον εξυπηρετητή και την ανταλλαγή δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο MQTT και η υλοποίηση των υποστηριζόμενων λειτουργιών έχει γίνει σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

1.1 Κόμβος ακουστικής καταγραφής

Η υλοποίηση του κόμβου ακουστικής καταγραφής στηρίζεται στο ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 3 με λειτουργικό σύστημα Raspbian. Η ακουστική καταγραφή πραγματοποιείται από ένα MEMS μικρόφωνο τύπου SPH0645LM4H, το οποίο υποστηρίζει το πρότυπο I2S. Λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτή ήταν, αφενός τα χαρακτηριστικά των MEMS (παντοκατευθυντική συμπεριφορά, ευπροσάρμοστος σχεδιασμός, μεγάλη ασυμβατότητα με τη διασύνδεση ραδιοσυχνοτήτων και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, χαμηλό κόστος, περιβαλλοντική ανθεκτικότητα) και αφετέρου το γεγονός ότι η υλοποίηση αυτή (σε αντίθεση με προηγούμενες αναλογικές MEMS λύσεις) δεν απαιτεί την ύπαρξη σταδίου προενίσχυσης και βαθμίδας A/D. Κατά συνέπεια, προβλήματα θορύβου στο λαμβανόμενο σήμα από το ολοκληρωμένο κύκλωμα μικροφώνου, κάνουν λιγότερο αισθητή τη παρουσία τους σε σχέση με προηγούμενες λύσεις.

1.2 Εξυπηρετητής νέφους

Ο εξυπηρετητής είναι ένας εικονικός υπολογιστής που τρέχει στην υπηρεσία νέφους ~okeanos, [5] του GRNET. Μπορεί να περιγραφεί ως εξυπηρετητής πολλαπλών χρήσεων μιας και ενσωματώνει λειτουργίες, ανταλλαγής μηνυμάτων MQTT, βάσης δεδομένων, διαχείρισης ροών ήχου (audio streaming server), διακομιστή ιστού και ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Για την υλοποίηση των διαφόρων σεναρίων διαδικτύου των πραγμάτων (διασύνδεση κόμβων, APIs και διαδικτυακών εφαρμογών), έχει χρησιμοποιηθεί το εργαλείο οπτικού προγραμματισμού Node-

RED, [6]. Για την αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων που λαμβάνονται από τον κόμβους του δικτύου έχει χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων MongoDB, [7].

Η πληροφορία που καταγράφεται στους κόμβους παρέχεται στους χρήστες μέσα από διαδικτυακές λειτουργίες όπως, (α) η σε πραγματικό χρόνο απεικόνιση της στάθμης θορύβου, (β) η δυνατότητα εξαγωγής στατιστικών της ηχορύπανσης για κάθε κόμβο από τη βάση δεδομένων και (γ) η δυνατότητα της σε πραγματικό χρόνο παρακολούθησης του ηχητικού περιεχομένου της περιοχής ενδιαφέροντος (audio streaming). Τέλος υποστηρίζονται τεχνικές ασφάλειας δεδομένων και πρόσβασης, που πραγματοποιούνται από την ενεργοποίηση μηχανισμών ελέγχου ταυτότητας χρήστη (τείχος προστασίας, λογαριασμοί).

2. Αξιολόγηση ακουστικού κόμβου συστήματος

2.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

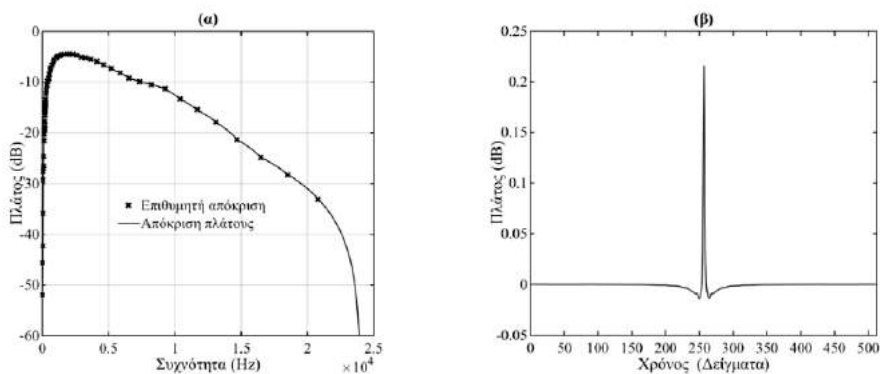
Η αξιολόγηση των ακουστικών αισθητήρων έγινε με χρήση ενός ηχόμετρου κλάσης 1 (SVANTEK 959) το οποίο διαθέτει αναλογική έξοδο για παράλληλη καταγραφή τους σήματος εξόδου από το μικρόφωνο. Το μικρόφωνο αναφοράς (από το ηχόμετρο) και τα υπό αξιολόγηση MEMS τοποθετήθηκαν όσο το δυνατόν πιο κοντά έτσι ώστε να υπόκεινται σε συγκρίσιμες ακουστικές συνθήκες. Ως ακουστική πηγή χρησιμοποιήθηκε ένα ηχείο αναφοράς (Genelec 8030C) τοποθετημένο σε απόσταση περίπου 80 εκατοστά από τον προς μέτρηση αισθητήρα MEMS και το μικρόφωνο αναφοράς. Για τη διεξαγωγή της βαθμονόμησης το ηχείο τροφοδοτήθηκε με λευκό θόρυβο διάρκειας 18 s. Το σήμα εξόδου από το ηχόμετρο πέρασε από ΠIR φίλτρο σχεδιασμένο ώστε να προσεγγίζει την απόκριση σταθμισμένου φίλτρου A. Το επεξεργασμένο αυτό σήμα αποτελεί το λεγόμενο *σήμα αναφοράς*. Η διαδικασία βαθμονόμησης μπορεί να υλοποιηθεί τώρα με το σχεδιασμό ενός FIR φίλτρου τέτοιου ώστε το σήμα που προκύπτει από το σύστημα «*αισθητήρας MEMS– FIR φίλτρο*» να έχει την ίδια στάθμη με το σήμα αναφοράς.

Για τη βαθμονόμηση κάθε αισθητήρα MEMS, εφαρμόστηκε ανάλυση σήματος στο πεδίο Χρόνου-Συχνότητας με χρήση του βραχέως μετασχηματισμού Fourier σε χρονικό παράθυρο μήκους 4096 δειγμάτων. Κατόπιν, έγινε διαμέριση του φάσματος σε $K=60$ φασματικές ζώνες, εύρους ενός τρίτου οκτάβας η κάθε μία, από 0 έως τη συχνότητα Nyquist ($f_{Nyq}=24000$ Hz). Για κάθε συχνοτική ζώνη, υπολογίστηκαν βάρη διόρθωσης w_k τέτοια ώστε, η ισχύς του σήματος από τον αισθητήρα MEMS στην συγκεκριμένη ζώνη επί το βάρος w_k , να ισούται με την ισχύ του σήματος αναφοράς. Θα θέλαμε τώρα να σχεδιάσουμε ένα FIR φίλτρο του οποίου η απόκριση πλάτους συχνότητας σε κάθε μία συχνοτική ζώνη, να ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αντίστοιχου βάρους διόρθωσης. Ο σχεδιασμός του FIR φίλτρου έγινε στο Matlab με χρήση της συνάρτησης *fdesign*. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στο πλάτος της απόκρισης και όχι στη φάση, η συνάρτηση *fdesign* χρησιμοποιήθηκε χωρίς περιορισμούς αναφορικά με την απόκριση φάσης. Το αποτέλεσμα αυτής της διεργασίας ήταν ένα FIR φίλτρο $c[n]$ με 512 συντελεστές. Τα χαρακτηριστικά του FIR φίλτρου που προέκυψε για μια από τις συσκευές απεικονίζονται στην Εικόνα 2. Η διαδικασία του φιλτραρίσματος μπορεί πλέον να υλοποιηθεί στο πεδίο του χρόνου ως $s[n] = x[n] * c[n]$, όπου $s[n]$ είναι η φιλτραρισμένη εκδοχή του σήματος του αισθητήρα (με «*» συμβολίζεται η πράξη της συνέλιξης). Με βάση το $s[n]$ και για

σταθερά ολοκλήρωσης M δειγμάτων, η μέτρηση της στάθμης του θορύβου δίνεται από τη παρακάτω σχέση,

$$L_A = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M s^2[n] \right) + \Delta L, \quad (2.1)$$

όπου L_A η στάθμη θορύβου σε dBA, και ΔL ένας διορθωτικός συντελεστής. Ο διορθωτικός συντελεστής υπολογίστηκε με βάση την απόκριση του μικρόφωνου αναφοράς σε διέγερση τόνου 1000 Hz από ειδική συσκευή βαθμονόμησης που προσαρτάται στο μικρόφωνο.



Εικόνα 2: (α) Επιθυμητό πλάτος απόκρισης του φίλτρου διόρθωσης ενός εκ των MEMS αισθητήρων σε κάθε ένα από τα 60 φασματικά κέντρα (x) έναντι του πραγματικού πλάτους απόκρισης του FIR φίλτρου (συνεχής γραμμή), (β) απόκριση του FIR φίλτρου στο πεδίο του χρόνου.

2.2 Συγχρονισμένη ηχογράφηση μεταξύ κόμβων

Προκειμένου οι κόμβοι του συστήματος να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν εφαρμογές όπου απαιτείται συνεργατική καταγραφή, μελετήθηκαν τρόποι συγχρονισμού των ρολογιών τους. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η πολυκάναλη ηχογράφηση της ηχητικής σκηνης καθώς και η εκτίμηση της θέσης ή της κατεύθυνσης μιας ηχητικής πηγής, κάτι που γίνεται εφικτό μέσω της εκτίμησης της Χρονικής Διαφοράς Άφιξης (ΧΔΑ) του ήχου μεταξύ των αισθητήρων, [5]. Ένας απλός υπολογισμός δείχνει ότι για απόσταση ενός μέτρου μεταξύ των κόμβων, απαιτείται ακρίβεια συγχρονισμού 1 ms για εφαρμογές που βασίζονται στη ΧΔΑ. Με βάση αυτόν το περιορισμό μελετήθηκαν τα πρωτόκολλα NTP (Network Time Protocol), [9] και PTP (Precision Time Protocol), [10]. Από τα δύο αυτά πρωτόκολλα τελικά επιλέχθηκε το PTP λόγω του καλύτερου συγχρονισμού που επιτεύχθηκε. Σε αντίθεση με το NTP, έχει σχεδιαστεί για τοπικά δίκτυα και έχει ως στόχο πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Συγκεκριμένα επιτρέπει ακρίβεια μέχρι μερικά ns όταν χρησιμοποιείται με υποστήριξη υλικού στις συσκευές δικτύου (ακόμη και χωρίς υποστήριξη υλικού, διατηρεί συνήθως συγχρονισμό μέσα σε λίγα ms). Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ο συγχρονισμός έγινε μεταξύ δύο κόμβων όπου ο ένας έπαιζε το ρόλο του εξυπηρετητή και ο άλλος του πελάτη (και οι δύο ήταν εφοδιασμένοι με πρόσθετη μονάδα ρολογιού (RTC)).

Για τον έλεγχο της δυνατότητας αυτής σχεδιάστηκε πείραμα που περιελάμβανε δύο ακουστικούς κόμβους των οποίων τα MEMS είχαν τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά το ένα στο άλλο. Σε μικρή απόσταση τοποθετήθηκε ηχείο που αναπαρήγαγε κρουστικό ήχο κατ' επανάληψη. Η διαδικασία της συγχρονισμένης ηχογράφησης ενεργοποιήθηκε 173 φορές με αυτόματο τρόπο, με διάρκεια τέτοια ώστε να περιλαμβάνει τουλάχιστον μία εκδοχή του κρουστικού ήχου.

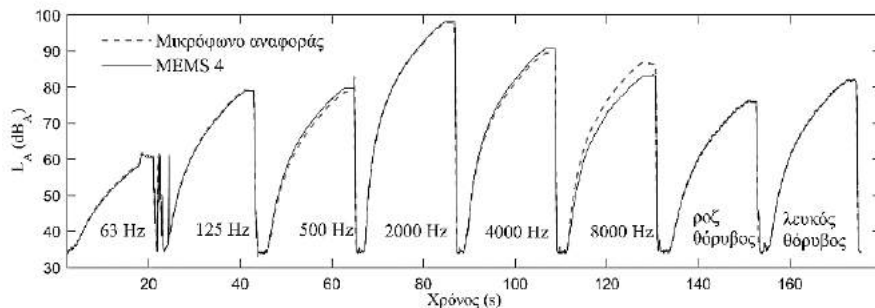
2.3 Αποτελέσματα

Βαθμονόμηση MEMS: Για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης, το ηχείο αναφοράς τροφοδοτήθηκε με καθαρούς τόνους σταθερής έντασης, από 63 μέχρι 8000 Hz με βήμα μίας οκτάβας, καθώς και με ροζ θόρυβο. Η διαφορά (ΔL) σε dB, μεταξύ της εκτιμώμενης στάθμης από το κάθε ένα MEMS και το ηχόμετρο, απεικονίζεται στο Πίνακα 2.1. Παρατηρούνται κάποιες περιπτώσεις όπου οι αποκλίσεις ξεπερνούν τα ± 2 dB, κάτι όμως αναμενόμενο για σήματα με τόσο στενό εύρος ζώνης. Στη περίπτωση του ροζ θορύβου, οι αντίστοιχες αποκλίσεις είναι κατά πολύ μικρότερες. Δεδομένου ότι σε πραγματικά περιβάλλοντα οι ηχητικές πηγές είναι ευρυζωνικές, αναμένεται ότι η μέτρηση της ηχητικής στάθμης θα παρουσιάζει αποκλίσεις αρκετά μικρότερες από αυτές του πίνακα.

Πίνακας 2.1 Διαφορά στάθμης (ΔL) σε dB μεταξύ MEMS και μικρόφωνου αναφοράς.

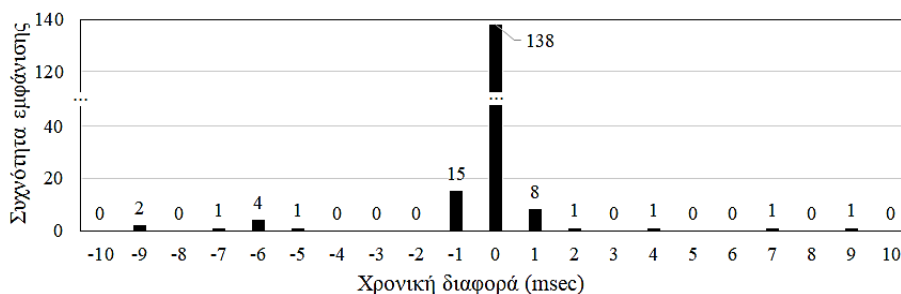
Διέγερση	MEMS1	MEMS2	MEM3	MEM4	Μέση απόκλιση
63 Hz	0.70	0.40	0.55	0.43	± 0.53
125 Hz	0.43	0.52	0.36	0.31	± 0.41
250 Hz	0.09	0.14	-0.66	0.12	± 0.35
500 Hz	-3.46	-2.33	1.86	-0.88	± 2.32
1000 Hz	-1.96	-0.31	-0.34	-1.31	± 1.20
2000 Hz	-1.73	-0.80	-1.24	-0.43	± 1.16
4000 Hz	-0.15	-0.72	-1.84	-2.02	± 1.42
8000 Hz	-3.01	-1.41	0.39	0.46	± 1.69
Ροζ θόρυβος	0.05	0.02	0.14	0.09	± 0.09

Στην Εικόνα 3 αναπαρίσταται η απόκριση μιας εκ των 4 συσκευών, για διαφορετικά σήματα διέγερσης, συναρτήσει του χρόνου. Το σήμα διέγερσης σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει συνεχώς αυξανόμενο πλάτος. Επιπρόσθετα, μεταξύ των διαφορετικών σημάτων διέγερσης παρεμβάλλονται διαστήματα με θόρυβο βάθους. Η μεταβολές της συσκευής αναφοράς αναπαρίστανται με τη διακεκομμένη καμπύλη. Αν και διακρίνονται κάποιες αποκλίσεις, από το διάγραμμα φαίνεται ότι η συσκευή ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε ένα αρκετά μεγάλο δυναμικό εύρος (35-100 dBA). Στα 8 kHz, διακρίνεται μια μη γραμμική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα η διαφορά σε dB να είναι περισσότερο στις υψηλές στάθμες από ότι στις χαμηλές στάθμες. Σε συμφωνία με την προηγούμενη παρατήρηση, οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές όταν τα χαρακτηριστικά του σήματος είναι ευρυζωνικού χαρακτήρα (ροζ θόρυβος, λευκός θόρυβος και θόρυβος βάθους).



Εικόνα 3: Απόκριση MEMS-Ηχώμετρου σε συνεχώς αυξανόμενο πλάτος διέγερσης.

Συnergατική καταγραφή: Για κάθε ένα από τα 173 ζεύγη ηχογραφήσεων, η ΧΔΑ υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου GCC-PHAT [8], κάνοντας χρήση της αντίστοιχης συνάρτησης Matlab (gccphat). Λόγω της όλης διάταξης, η ΧΔΑ από κάθε ηχογράφιση θα πρέπει να είναι 0 s. Στην Εικόνα 4 φαίνεται το ιστόγραμμα με τις 173 τιμές της ΧΔΑ όπως αυτή υπολογίστηκε μέσω του ηχητικού σήματος. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (161/173) το σφάλμα χρονισμού μεταξύ των δύο αισθητήρων είναι εντός ± 1 ms, ενώ σε καμία περίπτωση αυτό δεν υπερβαίνει τα ± 10 ms. Η τυπική απόκλιση που προκύπτει από τις 173 αυτές τιμές είναι ίση με 1.8 ms.



Εικόνα 4: Κατανομή των τιμών της ΧΔΑ από 173 ζεύγη ηχογραφήσεων

Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η προτεινόμενη υλοποίηση ΔΑΑ είναι κατάλληλη για εφαρμογές που σχετίζονται με τη συγχρονισμένη καταγραφή της ηχητικής πληροφορίας από πολλούς αισθητήρες ταυτόχρονα. Από την άλλη, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η ακρίβεια συγχρονισμού δεν είναι ακόμα επαρκής για εφαρμογές που σχετίζονται με τον εντοπισμό θέσης ηχητικής πηγής ή με την εκτίμηση της κατεύθυνσης άφιξης, εκτός αν οι δύο αισθητήρες είναι πολύ απομακρυσμένοι ο ένας από τον άλλο, έτσι ώστε μια χρονική μετατόπιση της τάξης των ± 10 ms να είναι αμελητέα συγκριτικά με την πραγματική ΧΔΑ.

3. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν τα δομικά στοιχεία ενός πρότυπου ΔΑΑ καθώς και αποτελέσματα σχετικά με την αξιολόγηση των κόμβων του. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι οι δυνατότητες των υπό εξέταση MEMS

είναι ικανοποιητικές για τη χρήση τους ως μετρητές της στάθμης θορύβου. Η χρήση πολλαπλών τέτοιων κόμβων για την ταυτόχρονη καταγραφή της ηχητικής σκηνής μπορεί επίσης να γίνει ικανοποιητικά, ωστόσο χρειάζεται περισσότερη ακρίβεια στο συγχρονισμό μεταξύ των αισθητήρων ώστε να εξυπηρετούνται εφαρμογές που σχετίζονται με την εκτίμηση της ΧΔΑ, όπως ο εντοπισμός της θέσης ή της κατεύθυνσης της ηχητικής πηγής. Μελλοντική έρευνα θα εστιάσει στο σχεδιασμό και την επίδραση πρόσθετων εξαρτημάτων (κάλυμμα καιρικής προστασίας, αντιανεμικά φίλτρα κ.α.), ώστε η συσκευή να είναι κατάλληλη για χρήση σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης θα μελετηθούν θέματα χρονισμού όπως η καθυστέρηση που εισάγει το λογισμικό αλλά και οι διακυμάνσεις της στο χρόνο.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους, στο μέλος ΕΤΕΠ Στέλιο Πιοτογιαννάκη και το φοιτητή Νίκο Ζησόπουλο του τμήματος μας, για τη συνεισφορά τους. Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από το έργο «Εργαστήρια Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής», ΕΛΚΕ ΤΕΙ Κρήτης (Κωδ. έργου 80264, ίδιοι πόροι).

4. Αναφορές

- [1] Curran, M.A., Diehl, R.J.; Peck, G.A., Rahaman, K.L., Single Board Computer Quotation and Design System and Method. U.S. Patent 6,898,580, (2005).
- [2] Mydlarz C., Nacach S., Rosenthal E., Temple M., Park T., Roginska A., The implementation of mems microphones for urban sound sensing. 137th AES, Los Angeles, USA, (2014).
- [3] Pham, C., Cousin, P., "Benchmarking low-resource device test-beds for real-time acoustic data", 9th Int. Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks & Communities (TridentCom2014), China, (2014).
- [4] Mydlarz C., Salamon J., Bello J. P., The Implementation of Low-cost Urban Acoustic Monitoring Devices, Applied Acoustics, (2016).
- [5] Huang Y. and Benesty J., Audio signal processing for next-generation multimedia communication systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, (2004).
- [6] ~okeanos GLOBAL announcement, Ανακτήθηκε στις 20/09/2018, από, <http://www.geant.net/MediaCentreEvents/news/Pages/New-Cloud-Computing-service.aspx>.
- [7] Node-Red. Από Wikipedia. Ανακτήθηκε στις 20/09/2018, από <https://en.wikipedia.org/wiki/Node-RED>
- [8] MongoDB. Από Wikipedia. Ανακτήθηκε στις 20/09/2018, από <https://en.wikipedia.org/wiki/MongoDB>
- [9] Brutti A., Omologo M. and Svaizer P., "Comparison between different sound source localization techniques based on real data collection," in Proceedings of Hands-Free Speech Communication and Microphone Arrays, Italy (2008).
- [10] Mills D., Martin J., Burbank J., Kasch W., "Network Time Protocol Ver. 4: Protocol and Algorithms Specification", IETF RFC-5905, (2010).
- [11] Eidson J., "IEEE-1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, a Tutorial", National Institute of Standards and Technology (NIST), (2015).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 8: Αρχαιολογική Ακουστική**Ο Στεντοροφωνικός σωλήνας**

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης
Καθηγητής/Πάρου 33, 15343 Αγία Παρασκευή Αττικής

hspyridis@music.uoa.gr
<http://users.uoa.gr/~hspyridis>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αρχαίοι Έλληνες με το εφευρετικό τους μυαλό είχαν κατορθώσει να σχεδιάσουν έναν τηλεβόα, τον λεγόμενο «στεντοροφωνικό σωλήνα», με τον οποίον μπορούσαν να μεταδίδουν ηχητικά μηνύματα με ευκρίνεια σε μεγάλες αποστάσεις εξαρτώμενες από τη στάθμη θορύβου του περιβάλλοντος του δέκτη (dB) για δεδομένη στάθμη εντάσεως (dB) στην είσοδο (λαιμό) του στεντοροφωνικού σωλήνα.

Το όνομα «στεντοροφωνικός σωλήνας» δόθηκε, επειδή ηχούσε πολύ ισχυρά, όπως ακριβώς φώναζε ο ομηρικός ήρωας Στέντορας.

Ο εν λόγω τηλεβόας χρησιμοποιήθηκε από τον Μέγα Αλέξανδρο προκειμένου να επικοινωνεί ο ίδιος ή οι στρατηγοί του με το μαχόμενο στράτευμα.

The stentorhonic tube**ABSTRACT**

Ancient Greeks with their inventive mind had managed to design a bullhorn, a stentorhonic tube, with which they could transmit clear sound messages in big distances depended on the noise level of the environment of the receiver (dB) for a specific intensity level (dB) at the input of the stentorhonic tube.

The name stentorhonic tube was given because it sounded very loudly, just like the screams of Homer's hero Stentor.

This bullhorn was used by Alexander the Great in order to lead the troops.

1. Οι τηλεπικοινωνίες στην αρχαιότητα

Από τα προϊστορικά χρόνια μέχρι και τον Μεσαίωνα είχαν επικρατήσει δύο βασικά είδη τηλεπικοινωνιών: η οπτική τηλεπικοινωνία και η ακουστική, βασισμένες αφενός στην πολυτελεστάτη αίσθηση της οράσεως και αφετέρου στην κραταιά αίσθηση της ακοής, όπως τονίζει ο Πλάτων.

Η οπτική τηλεπικοινωνία ξεκίνησε από τη στιγμή που ανακαλύφθηκε η φωτιά. Οι άνθρωποι επενόησαν διάφορους κώδικες και με τη βοήθεια σημάτων καπνού, πυρσών ή ακόμα και πολυχρώμων σημαιών (μεταγενέστερα) μπορούσαν να επικοινωνούν από μακρινές αποστάσεις.

Η αρχαιότερη, όμως, μορφή τηλεπικοινωνίας είναι η ηχητική. Πρώτος την χρησιμοποίησε ο προϊστορικός άνθρωπος και περιοριζόταν σε ηχητικά σήματα που προέρχονταν από διάφορα είδη τυμπάνων. Στη συνέχεια αυτά αντικαταστάθηκαν με

διάφορα άλλα όργανα (τηλεβόες, κέρατα) και χρησιμοποιούνταν ευρέως για στρατιωτικούς σκοπούς μέχρι την εμφάνιση πιο αποτελεσματικών μέσων.

Στα πλαίσια των παραπάνω τάσεων αρκετές εφευρέσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον με προεξάρχουσες εκείνες των αρχαίων Ελλήνων. Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν καταφέρει να αναπτύξουν ένα πρωτότυπο σύστημα τηλεπικοινωνιών που βασιζόταν τόσο στο οπτικό, όσο και στο ηχητικό τηλεπικοινωνιακό πρότυπο. Εφευρέσεις όπως το ακουστικό κέρασ, ο στεντοροφωνικός σωλήνας, ο οπτικός τηλεγράφος (ή πυρσεία), ο υδραυλικός τηλεγράφος και το σύστημα των φρυκτωριών έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών.

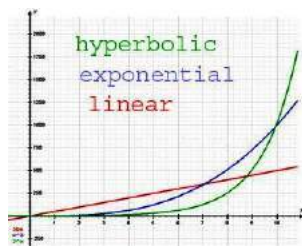
2. Μετάδοση φωνητικού μηνύματος με τηλεβόα

Ο τηλεβόας είναι μία συσκευή τηλεπικοινωνίας που έχει ως σκοπό να διαβιβάσει ένα προφορικό μήνυμα σε ένα απομακρυσμένο σημείο ενεργώντας σαν ένας ζεύκτης (μετασχηματιστής σύνθετης αντίστασης).

Εμπειρικά γνωρίζουμε ότι στην περίπτωση που θέλουμε να στείλουμε ένα φωνητικό μήνυμα σε κάποιον αποδέκτη, ο οποίος βρίσκεται λ.χ. 200 μέτρα μακριά μας σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, συνηθίζουμε να βάζουμε τις παλάμες μας εν είδει χωνιού γύρω από το στόμα μας και να φωνάζουμε. Κατ' αυτόν τον τρόπο κατευθύνουμε τη φωνή μας προς τον αποδέκτη του μηνύματός μας.

Καθώς φωνάζουμε ο ήχος μας αναδύεται από τη στοματική μας κοιλότητα και οδεύει προς το περιβάλλον διαδιδόμενος σε στερεά γωνία 4π sterad, δηλαδή προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι, όταν ένας ήχος κινείται από ένα στενό χώρο, όπως είναι η στοματική μας κοιλότητα, σε ένα πιο ευρύ χώρο, όπως είναι ο ελεύθερος αέρας του περιβάλλοντος, μέρος της ενεργείας του ανακλάται προς τα πίσω μειώνοντας την εκπεμπόμενη προς τον αποδέκτη συνολική ηχητική ενέργεια και, συνεπώς, τη συνολική έντασή του.

Εάν αυτή η διαβίβαση του ήχου γίνει μέσα από ένα χώρο σταδιακάς διευρυνομένης διατομής, τότε οι απώλειες λόγω ανακλάσεων του οδεύοντος ηχητικού κύματος μειώνονται και το ηχητικό κύμα εξέρχεται ισχυρότερο. Η σταδιακή αύξηση της διατομής του χώρου διαβίβασης του ηχητικού μηνύματος υπακούει σε κάποια μαθηματικά προφίλ λ.χ. υπερβολικό, εκθετικό, κωνικό (γραμμικό), παραβολικό. Με το κάθε προφίλ επιτυγχάνεται διαφορετική απόδοση, κατευθυντικότητα, γραμμική παραμόρφωση.

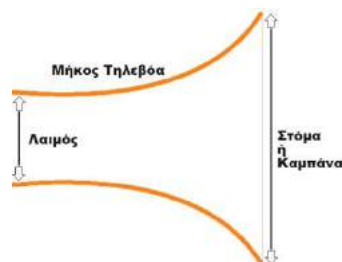


Σχήμα 2.1: Τρία μαθηματικά προφίλ για τηλεβόα: υπερβολικό, εκθετικό, κωνικό (γραμμικό). (Η σειρά των προφίλ σε περίπτωση ασπρόμαυρου σχεδίου καθορίζεται από τη σειρά των δεξιών άκρων των καμπυλών στο σχήμα από επάνω προς τα κάτω).

3. Τα μέρη ενός τηλεβόα

Τα κύρια μέρη ενός τηλεβόα (Σχήμα 3.1) είναι τα εξής τρία:

- Ο **λαιμός (throat)** : είναι το τμήμα εισόδου του προφορικού μηνύματός μας (συνδέεται με το στόμα μας).
- Το **στόμα** ή **καμπάνα (mouth or bell)** : είναι το τμήμα εξόδου του προφορικού μηνύματός μας, δηλαδή το τμήμα από το οποίο ακτινοβολείται η ηχητική ενέργεια στο περιβάλλον.
- Το **μήκος (length)** του τηλεβόα: είναι η απόσταση λαιμού-στόματος του τηλεβόα.



Σχήμα 3.1: Τα μέρη ενός τηλεβόα.

4. Πώς ο τηλεβόας «ενισχύει» τον ήχο;

Η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του τηλεβόα είναι η προσαρμογή των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων λαιμού και στόματος.

Ένα τμήμα σωλήνα σταθερής διατομής είναι ένα μηχανικό σύστημα, το οποίο εμφανίζει υψηλή σύνθετη ακουστική αντίσταση έναντι του αέρα που έχει χαμηλή σύνθετη ακουστική αντίσταση. Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε ένα τμήμα σωλήνα σταθερής διατομής και συναντήσει μια απότομη αλλαγή στην σύνθετη ακουστική αντίσταση, μέρος της ενεργείας του ανακλάται προς τα πίσω. Οι τηλεβόες, όμως, εμφανίζουν μια κάποια σταδιακή αύξηση της διατομής τους βάσει ενός εκ των προαναφερθέντων προφίλ. Λόγω αυτής της σταδιακής αύξησης της διατομής τους οι τηλεβόες λειτουργούν ως μετασχηματιστές της σύνθετης ακουστικής αντίστασης εξασφαλίζοντας την εξίσωση της σύνθετης ακουστικής αντίστασης του λαιμού με τη σύνθετη ακουστική αντίσταση του αέρα στο στόμα (Θεώρημα προσαρμογής αντιστάσεων ή της μεγίστης μεταφερομένης ισχύος). Τοιουτοτρόπως επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφερόμενη ηχητική ενέργεια.

Στην περίπτωση που φωνάζουμε στον αέρα, όταν ο ήχος μετακινείται από τον λαιμό μας στον ανοιχτό αέρα του περιβάλλοντος, έχουμε μια μεγάλη αναντιστοιχία στις σύνθετες ακουστικές αντιστάσεις, επειδή αυτές οι δύο περιοχές (κοιλότητες) λόγω μεγέθους, σχήματος και άλλων ιδιοτήτων είναι δραματικά διαφορετικές. Όταν μιλάμε, λοιπόν, στον αέρα, ο ήχος ανακλάται προς τα πίσω λόγω της μη προσαρμογής των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων των δύο αυτών περιοχών.

Στην περίπτωση που φωνάζουμε χρησιμοποιώντας τηλεβόα η σταδιακή αύξηση της διατομής του σώματος του τηλεβόα συμβάλλει, ώστε να προσεγγίζουμε την εφαρμογή του θεωρήματος της προσαρμογής των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων, οπότε πραγματοποιούνται ολιγότερες προς τα πίσω ανακλάσεις του εκπεμπομένου ηχητικού σήματος και η διαβίβαση της ακουστικής ενεργείας καθίσταται περισσότερο

αποτελεσματική. Η απόδοση ενός τηλεβόα χωρίς την προσαρμογή των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων είναι μικρότερη του 1%, ενώ η κατάλληλη προσαρμογή αυτών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση έως και στο 80%.

Επί πλέον πρέπει να σημειωθεί ότι τα εκθετικά προφίλ των τηλεβόων παρέχουν καλό εύρος ζώνης, σχετικά χαμηλή γραμμική παραμόρφωση και κατάλληλα χαρακτηριστικά σύνθετης ακουστικής αντίστασης στην είσοδο ή λαιμό, ενώ τα υπερβολικά προφίλ παρέχουν μια χαμηλότερη τιμή συχνότητας σε σύγκριση με τα εκθετικά κ.λπ.

Να σημειωθεί ότι η κατευθυντική δράση του τηλεβόα μας εξασφαλίζει τουλάχιστον ακουστικό κέρδος 10 dB και, εάν δεν έχουμε κατά τη διαβίβαση του ηχητικού σήματος μέσω του τηλεβόα απώλεια των υψηλών συχνοτήτων, μας εξασφαλίζεται και ακουστική ευκρίνεια και ένα πρόσθετο ακουστικό κέρδος 5 dB. Σημειωτέον ότι τα νούμερα αυτά προέκυψαν από ακουστικές μετρήσεις και όχι από κάποιον μαθηματικό τύπο.

Με όφελος αυτή τη συνολική στάθμη έντασης ένας κωνικός τηλεβόας θα διεβίβαζε την ηχητική πληροφορία σε απόσταση 5,6 φορές μεγαλύτερη απ' ό,τι χωρίς την χρήση του, διότι:

$$R_{\text{τελ}} = R_{\text{αρχ}} \cdot 10^{\frac{10 \text{ ακουστικό κέρδος}}{20}} = R_{\text{αρχ}} \cdot 10^{\frac{10+5}{20}} = 5,6 \cdot R_{\text{αρχ}} \text{ (m)}$$

5. Ο στεντοροφωνικός σωλήνας

5.1. Γραμματολογικά στοιχεία

Προς τα τέλη του 4^{ου} π.Χ. αιώνα οι αρχαίοι Έλληνες με το εφευρετικό τους μυαλό είχαν κατορθώσει να σχεδιάσουν έναν τηλεβόα, τον λεγόμενο στεντοροφωνικό σωλήνα, με τον οποίον μπορούσαν να διαβιβάζουν ηχητικά μηνύματα με ευκρίνεια μέσω του αέρα σε αποστάσεις εξαρτώμενες από τη στάθμη θορύβου του περιβάλλοντος του δέκτη για δεδομένη στάθμη έντασης (dB) στην είσοδο (λαιμό) του στεντοροφωνικού σωλήνα. Ευκόλως αντιλαμβάνεται κανείς την πολύτιμη χρησιμότητα του στεντοροφωνικού σωλήνα με τον οποίον μπορούσαν να διαβιβάζονται ηχητικά μηνύματα με ευκρίνεια μέσω του αέρα σε αποστάσεις μέχρι τα 4 Km.

Ο στεντοροφωνικός σωλήνας πρωτοχρησιμοποιήθηκε στις εκστρατείες του Μεγάλου Αλεξάνδρου, του βασιλιά της Μακεδονίας. Λειτουργούσε σαν ένας ισχυρός τηλεβόας δια του οποίου διεβιβάζοντο από μακρινή απόσταση εντολές στα Μακεδονικά στρατεύματα κατά τις μάχες.

Το όνομα «στεντοροφωνικός σωλήνας» δόθηκε επειδή ηχούσε πολύ ισχυρά, όπως ακριβώς φώναζε ο ομηρικός ήρωας Στέντορας. Στην αρχαιοελληνική ιστορία ο Στέντορας ήταν ήρωας του Τρωικού πολέμου, ο οποίος αναφέρεται τόσο στην *Ιλιάδα* (Ε 785), όσο και στη «*Διομήδους Αριστεία*». Ο Στέντορας είχε ευεργετηθεί από τη θεά Ήρα με το χάρισμα να έχει πολύ δυνατή φωνή, η οποία ισοδυναμούσε με φωνή 50 ανδρών· γι' αυτό και χαρακτηρίζεται από τον Όμηρο με το επίθετο «*χαλκεόφωνος*».

ἔνθα στᾶσ' ἤϋσε θεὰ λευκώλενος Ἥρη

Στέντορι εἰσαμένη μεγαλήτορι χαλκεοφώνω,

ὄς τόσον αὐδήσασχ' ὄσον ἄλλοι πεντήκοντα· (Ομήρου *Ιλιάς*, Ε786)

[εκεί στάθηκε και φώναζε η θεά Ήρα με τα λευκά μπράτσα παίρνοντας τη μορφή του γενναίου Στέντορα, που είχε φωνή ατσαλένια και που φώναζε όσο άλλοι πενήντα άνδρες μαζί.]

Στέντωρ, μεγαλοφωνοτάτος τις ἄνθρωπος παρ' Ὀμήρω, καὶ ἱστορία τις περὶ αὐτοῦ. (Ευσταθίου, Αρχιεπισκόπου Θεσσαλονίκης, *Παρεκβολαί εἰς τὴν Ὀμήρου Ἰλιάδα καὶ Ὀδύσειαν*, ὑπὸ Ματθαίου Δεβάρη, Λειψία 1828, σ. 433)

Ακόμα και σήμερα η έκφραση «στεντόρεια φωνή» σημαίνει φωνή με μέγιστη ένταση. Κατ' ανώνυμο «Σχολιαστή» του Ομήρου (E, 785β, 1) ο Στέντορας θεωρείται ότι καταγόταν από τη Θράκη.

Στέντορι: τινές αὐτὸν Θρᾶκά φασιν, Ἑρμῆ δὲ περὶ μεγαλοφωνίας ἐρίσαντα ἀναιρεθῆναι· αὐτὸν δὲ εὐρεῖν καὶ τὴν διὰ κόχλου μηχανὴν εἰς τὰς μάχας.

[Στέντορας: μερικοὶ λένε ὅτι αὐτὸς ἦτο Θράκας καὶ ὅτι τὸν ἐφόνευσε ὁ Ἑρμῆς, ἐπειδὴ καυχῆθηκε ὅτι φωνάζει δυνατότερα αὐτοῦ· ὁ ἴδιος δὲ ἐπενόησε καὶ τὴν σάλπιγγα με ὄστρακο (μπουρού) στις μάχες.]

Συνεχίζοντας ο ίδιος ανώνυμος «Σχολιαστής» του Ομήρου (E, 785β, 1) αναφέρει ότι ενδέχεται ο Στέντορας να κατάγεται από την Αρκαδία:

τινές δὲ Ἀρκάδα φασὶν εἶναι τὸν Στέντορα. (Σχόλια στον Ὀμηρο, *Βιβλίο Ἰλιάδος 5*, στίχος 785b, γρ. σχολίου 1-6)

Εκ των ανωτέρω προκύπτει ότι ο Στέντορας διαγωνίστηκε με τον θεό Ερμή, τον κήρυκα των θεών, στην ένταση της φωνής και ο Ερμής τον σκότωσε (ή, σύμφωνα με άλλη παράδοση, πέθανε από την προσπάθειά του να φωνάξει ακόμα πιο δυνατά). Δεν είναι ούτε ο πρώτος, ούτε ο τελευταίος που υποπίπτει στο μέγιστο κατά την αρχαιότητα αμάρτημα, την Ύβριν, προκαλώντας κάποιον θεό και χάνει τη ζωή του.

Ο Στέντορας, θα μπορούσε να θεωρηθεί και σαν ο πρώτος δημόσιος κήρυκας, δηλαδή ο πρώτος ντελάλης (λέξη μάλλον τουρκικής προελεύσεως ([tellâl](#)) ή αραβικής (dallāl)).

Του αποδίδεται η φράση «Αἰδὼς Ἀργεῖοι» [*Ντροπή σας, δεν ντρέπεστε καθόλου κάτοικοι του Άργους;*] και τη φώναξε ο Στέντορας στην προσπάθειά του να ψέξει τους Αργεῖους που δειλίασαν μετά την αποχώρηση του Αχιλλέα από τη μάχη και να τους προτρέψει να δείξουν θάρρος στον αγώνα εναντίον των Τρώων.

5.2. Περιγραφή του στεντοροφωνικού σωλήνα

Ο στεντοροφωνικός σωλήνας (Σχήμα 5.2.1) ήταν τηλεβόας κωνικής διατομής μεγάλων διαστάσεων που χρησιμοποιείτο για τη διαβίβαση προφορικών εντολών μέσω του αέρα σε μακρινές αποστάσεις. Είχε τη μορφή χάλκινου πνευστού μουσικού οργάνου εν είδει σάλπιγγας με κυκλικό «ηχείο» μιας περιστροφής. Ο στεντοροφωνικός σωλήνας ήταν κρεμασμένος με σχοινί από την κορυφή τρίποδα ύψους 4 μέτρων για να μπορεί ο χειριστής να τον περιστρέφει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση επιθυμούσε, ώστε να διαβιρασθεί η ηχητική πληροφορία.



Σχήμα 5.2.1: Ο στεντοροφωνικός σωλήνας.

Στον στεντοροφωνικό σωλήνα το επιστόμιο (=λαιμός) και η καμπάνα (στόμα τηλεβόα) ευρίσκοντο επί της αυτής διαμέτρου. Τούτο σημαίνει ότι το εισερχόμενο ηχητικό κύμα από το επιστόμιο (=λαιμό) διχάζεται στις δύο διαδρομές κατά τις ημιπεριφέρειες του κυκλικού ηχείου και έκαστο κύμα εκ του διχασμού διανύει ίση απόσταση, το μήκος της ημιπεριφέρειάς του κυκλικού «ηχείου». Συνεπώς, όταν συμβάλλουν τα ηχητικά κύματα των δύο ημιπεριφερειακών κεράτων, επειδή εμφανίζουν διαφορά φάσης $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2}\right)}{\lambda} = 0^\circ$, το συνιστάμενο κύμα εμφανίζει διπλάσιο πλάτος.

Για να μην εμφανίζονται φαινόμενα «ψαλιδισμού (clipping)» του πλάτους του κύματος εξόδου, ο στεντοροφωνικός σωλήνας στην περιοχή της καμπάνας (=στόμα τηλεβόα) είναι ευρύτερος.

Εκάστη ημιπεριφέρεια του κυκλικού ηχείου εμφανίζει βαθμηδόν αυξανόμενη διατομή για την προσαρμογή των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων, ώστε να ισχύει το θεώρημα της μεγίστης μεταφερομένης ισχύος.

Ο διπλασιασμός του πλάτους του ηχητικού σήματος εισόδου σημαίνει τετραπλασιασμό της εντάσεώς του στην έξοδο ή αύξηση της στάθμης εντάσεώς του κατά 6 dB, δηλαδή το ηχητικό σήμα θα καθίσταται ακουστό σε διπλάσια απόσταση.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αρχαίοι Έλληνες τουλάχιστον από την Ομηρική εποχή γνώριζαν τη θεωρία προσαρμογής των συνθέτων ακουστικών αντιστάσεων εισόδου-εξόδου σε έναν τηλεβόα ή σε ένα κέρασ γι' αυτό στον στεντοροφωνικό σωλήνα τα δύο ημιπεριφερειακά κέρατα του κυκλικού στεντοροφωνικού σωλήνα από την είσοδο προς την έξοδο έχουν, όπως ήδη έχει αναφερθεί, κωνική διατομή. Με τον διπλασιασμό του πλάτους του εκπεμπομένου ηχητικού σήματος εξασφαλίζεται τετραπλασιασμός της εντάσεώς του, ήτοι κέρδος στάθμης έντασης 6 dB. Εάν συνυπολογισθούν το κέρδος των 10 dB λόγω της κατευθυντικότητας του τηλεβόα και τα επί πλέον 5 dB λόγω διατηρήσεως των υψηλών συχνοτήτων η ηχητική εμβέλεια του εκπεμπομένου ηχητικού σήματος τουλάχιστον πενταπλασιάζεται.

6. Υπολογισμοί για τον σχεδιασμό και τη χρήση ενός τηλεβόα

Ο σχεδιασμός ενός τηλεβόα είναι σύνθετος και απαιτεί πολύπλοκη μαθηματική ανάλυση· θέμα που παρέλκει στην παρούσα εργασία αφού σκοπός της είναι να δείξει απλά τη λειτουργία ενός αρχαιοελληνικού τηλεβόα.

6.1. Υπολογισμός της ακτίνας του λαιμού του τηλεβόα

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ακτίνα του λαιμού του τηλεβόα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι το μικρότερο μήκος κύματος που αναπαράγεται σ' αυτόν είναι διπλάσιο από τη διάμετρο του λαιμού. Από την πληροφορία αυτή βρίσκουμε την μεγαλύτερη συχνότητα που αναπαράγεται στον τηλεβόα $(f_{max} = \frac{v_{\eta\chi}}{4r_{\lambdaαιμ}})$.

6.1.1 Συσχέτιση f_{max} και $r_{\lambdaαιμ}$

f_{max} (Hz)	$r_{\lambdaαιμ}$ (cm)
1000	8.50
1500	5.67
2000	4.25

Στην περίπτωση κατά την οποία ο χειριστής του στεντοροφωνικού σωλήνα είναι στρατιώτης που φορεί μακεδονική περικεφαλαία, η οποία φέρει γείσο και παραγαθίδες (βλέπε σχήμα 5.2.1), τότε το ελεύθερο μέρος του προσώπου του θα έχει διάμετρο περίπου 10-20 cm. Τούτο σημαίνει ότι τόση θα είναι και η διάμετρος του λαιμού του τηλεβόα. Από την παραδοχή αυτή προκύπτει ότι η μεγαλύτερη συχνότητα που αναπαράγεται στον τηλεβόα θα είναι μεταξύ των 1000 – 2000 Hz. Το γεγονός αυτό δεν το θεωρώ τυχαίο, δεδομένου ότι σ' αυτή τη συχνοτική ζώνη το ανθρώπινο αφτί εμφανίζει τη μεγαλύτερη ακουστική ευαισθησία.

6.2. Υπολογισμός της ακτίνας του στόματος ή της καμπάνας του τηλεβόα

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ακτίνα του στόματος ή της καμπάνας του τηλεβόα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι η διάμετρος του στόματος ή καμπάνας του τηλεβόα θα υπαγορεύει την απόκριση χαμηλής συχνότητας $(f_{min} = \frac{v_{\eta\chi}}{4r_{στομ}})$. Για ν' ακτινοβολεί ο τηλεβόας μια ορισμένη χαμηλή συχνότητα, το στόμα πρέπει να είναι το μισό μέγεθος του μήκους κύματος της συγκεκριμένης συχνότητας.

Πίνακας 6.2.1 Συσχέτιση f_{min} και $r_{στομ}$

f_{min} (Hz)	$r_{στομ}$ (cm)
1000	8.50
500	17.00

250	34.00
100	85.00

6.3. Υπολογισμός του μήκους (L) του τηλεβόα

Το μήκος (L) του τηλεβόα ευρίσκεται από την απόσταση μεταξύ του λαιμού και του στόματός του και εξαρτάται από το μαθηματικό προφίλ στο οποίο υπακούει ο τηλεβόας.

Στην περίπτωση που ο τηλεβόας είναι κωνικής διατομής το μήκος του (L) πρέπει να είναι ίσο προς το μήκος κύματος της ελαχιστοτέρας συχνότητας που επιθυμούμε να υποστηρίξουμε. Συνεπώς, για να υποστηριχθεί μία συχνότητα λ.χ. των 100 Hz, το μήκος του τηλεβόα που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να ισούται προς

$$L = \lambda_{max} = \frac{v_{ηχ}}{f_{min}} = \frac{340 \left(\frac{m}{sec}\right)}{100 \left(\frac{1}{sec}\right)} = 3,40 \text{ m.}$$

Στην περίπτωση που ο τηλεβόας υπακούει στο εκθετικό προφίλ λ.χ. το μήκος του δίδεται από τη σχέση

$$L = \frac{(\log(A) - \log(a)) \cdot 4000}{f \cdot 0.4343}$$

όπου

A = το εμβαδόν της διατομής του στόματος ή καμπάνας (cm²).

a = το εμβαδόν της διατομής του λαιμού (cm²).

f = η χαμηλότερη συχνότητα που ακτινοβολείται από τον τηλεβόα (Hz).

L = μήκος του τηλεβόα (cm).

6.4. Υπολογισμός της ηχητικής εμβέλειας ενός στεντοροφωνικού σωλήνα

1^η περίπτωση: Όπως έχει λεχθεί, ο «χαλκεόφωνος» Στέντορας είχε ευεργετηθεί από τη θεά Ήρα με το χάρισμα η φωνή του να ισοδυναμεί με τη φωνή 50 βροντόφωνων ανδρών. Έστω ότι ο καθένας από τους 50 βροντόφωνους άνδρες φωνασκεί στον λαιμό ενός στεντοροφωνικού σωλήνα με στάθμη έντασης IL=125 dB.

Η ολική στάθμη έντασης από τους 50 άνδρες θα είναι:

$$IL_{ολ} = 10 \cdot \log(n) + IL = 10 \cdot \log(50) + 125 = 142 \text{ dB}$$

Για $IL_{input} = IL_{ολ} = 142 \text{ dB}$ στον λαιμό του στεντοροφωνικού σωλήνα έχουμε $IL_{output} = 142 + 6 + 10 + 5 = 163 \text{ dB}$ στο στόμα αυτού (6 dB λόγω διαπλασιασμού του πλάτους του ηχητικού κύματος, 10 dB λόγω εστίασεως εκ μέρους του στεντοροφωνικού σωλήνα, 5 dB λόγω των υψηλών συχνοτήτων). Δέχομαι ότι στο πεδίο της μάχη θα πρέπει να υπάρχει μία στάθμη θορύβου τουλάχιστον 100 dB (fff fortissisimo).

Εάν η μάχη γίνεται σε απόσταση R από τον στεντοροφωνικό σωλήνα, τότε:

$$\Delta IL = 20 \cdot \log\left(\frac{R}{1}\right) \rightarrow R = 10^{\frac{\Delta IL}{20}} = 10^{\frac{IL_{output} - IL_{μάχης}}{20}} = 10^{\frac{163 - 100}{20}} = 10^{\frac{63}{20}} = 1.412,5 \text{ m.}$$

2^η περίπτωση: Εάν σε συνθήκες ειρήνης επιθυμούμε το μήνυμα να φθάσει σε απόσταση R, όπου η στάθμη θορύβου στον χώρο ακρόασεως θα είναι 90 dB (f forte), τότε:

$$R = 10^{\frac{\Delta IL}{20}} = 10^{\frac{IL_{output} - IL_{μάχης}}{20}} = 10^{\frac{163 - 90}{20}} = 10^{\frac{73}{20}} = 4.467 \text{ m.}$$

Με $IL_{input} = IL_{ολ} = 142 \text{ dB}$ και $IL_{output} = 142 + 6 + 10 + 5 = 163 \text{ dB}$ στον στεντοροφωνικό σωλήνα για τιμές $IL_{μάχης}$, όπως αυτές που δείχνονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 6.4.1, τα μηνύματα διαδίδονται με ευκρίνεια μέσω του αέρα σε αποστάσεις που αναφέρονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 6.4.1.

Πίνακας 6.4.1: Συσχέτιση στάθμης θορύβου (dB) στο πεδίο μάχης και αποστάσεως διαδόσεως του φωνητικού μηνύματος από το στόμα του στεντοροφωνικού σωλήνα.

$IL_{μάχης}$ (dB)	R (m)
120	141,3
110	446,7
100	1.412,5
90	4.466,8

3^η περίπτωση: Έστω ότι ένας μόνο βροντόφωνος άνδρας φωνασκεί στον λαιμό ενός στεντοροφωνικού σωλήνα με στάθμη έντασης $IL = 125 \text{ dB}$.

Για $IL_{input} = IL = 125 \text{ dB}$ έχουμε $IL_{output} = 125 + 6 + 10 + 5 = 146 \text{ dB}$

(6 dB λόγω διαπλασιασμού του πλάτους του ηχητικού κύματος, 10 dB λόγω εστίασεως εκ μέρους του στεντοροφωνικού σωλήνα, 5 dB λόγω των υψηλών συχνοτήτων).

Δέχομαι ότι για ν' ακούγεται το ηχητικό μήνυμα στο πεδίο της μάχης θα πρέπει να υπάρχει μία στάθμη θορύβου τουλάχιστον 90 dB (f forte).

Εάν η μάχη γίνεται σε απόσταση R από τον στεντοροφωνικό σωλήνα, τότε:

$$R = 10^{\frac{\Delta IL}{20}} = 10^{\frac{IL_{output} - IL_{μάχης}}{20}} = 10^{\frac{146 - 90}{20}} = 10^{\frac{56}{20}} = 10^{\frac{56}{20}} = 631 \text{ m.}$$

7. Αναφορές

[1] πολυτελεστάτην τὴν τοῦ ὄραν τε καὶ ὄρασθαι δύνάμιν (Πλάτωνος Πολιτεία, 507 c, 8)

ὄψιν καὶ ἀκοὴν τῶν δυνάμεων εἶναι (Αυτόθι, 477 c, 3)

[2] Ως ακουστική σύνθετη αντίσταση ορίζεται το πηλίκο των μιγαδικών πλατών της πίεσης του ήχου προς την ταχύτητα ταλάντωσης του όγκου των σωματιδίων σε ένα ελαστικό μέσο. Το πραγματικό μέρος λέγεται ακουστική αντίσταση και έχει σχέση με τις απώλειες ενέργειας από την εκπομπή του ήχου ενός ακουστικού συστήματος το φανταστικό μέρος λέγεται ακουστική αντίδραση και έχει σχέση με τις αντιδράσεις των δυνάμεων αδράνειας ή ελαστικότητας.

$$z = \frac{p}{v} = \frac{I}{v^2} = \frac{p^2_{\text{RMS}}}{I_{\text{RMS}}} \left(\rho \left(\frac{Nt}{m^2} \right), v \left(\frac{m}{sec} \right), I \left(\frac{W}{m^2} \right), z \left(\frac{Nt \cdot sec}{m^3} \right) \right)$$

[3] http://www.rintelen.ch/download/JMMLC_horns_lecture_etf10.pdf

[4] Σε περίπτωση που κάποιος θα επιθυμούσε να αντιμετωπίσει τον στεντοροφωνικό σωλήνα ως ακουστικό σύστημα και να τον μελετήσει λεπτομερέστερα βάσει της Ηλεκτροακουστικής, θα μπορούσε να τον μετατρέψει σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σύστημα εφαρμόζοντας την αναλογία «τάση-πίεση».

Σημειωτέον ότι τα δύο ημιπεριφερειακά κέρατα του κυκλικού στεντοροφωνικού σωλήνα στην είσοδο και στην έξοδο έχουν την ίδια διαφορά πίεσεως, που σημαίνει ότι είναι συνδεδεμένα εν παραλλήλω. Μετατρέποντάς τον σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σύστημα, αυτό θα περιέχει μια πηγή τάσεως v και δύο ίσες σύνθετες ηλεκτρικές αντιστάσεις $z = R + X_L$ συνδεδεμένες σε σειρά ή μία σύνθετη ηλεκτρική αντίσταση $z_{ολ} = 2z$. (Βλέπε Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδη, Στοιχεία Ηλεκτρακουστικής)

8. Βιβλιογραφία

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης, Φυσική και Μουσική Ακουστική, Εκδόσεις Grapholine, Θεσσαλονίκη, 2005.

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδη, Στοιχεία Ηλεκτρακουστικής, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1989, σελ. 145 κ.ε.

[Βιβλίο τσέπης του Newnes Audio και Hi-Fi Engineer](#) από τον Vivian Capelm (Elsevier, 2016).

[Ηλεκτροακουστικές Συσκευές: Μικρόφωνα και Ηχεία 1ης Έκδοσης](#) από τον Glen Ballou (Focal Press, 2009).

[The Sound Reinforcement Handbook 2nd Edition](#) by Gary Davis and Ralph Jones (Yamaha, 1988).

http://autochthoneseilhnes.blogspot.gr/2015/09/blog-post_90.html

<http://www.ekivolos.gr/Oi%20thlepikoinwnies%20sthn%20Arxaia%20Ellada.htm>

[m](#)

http://www.rintelen.ch/download/JMMLC_horns_lecture_etf10.pdf

Ομηρικοί ήχοι. Καταγραφή, ταξινόμηση και σύγκριση των ηχητικών φαινομένων που περιγράφονται στην Ιλιάδα και την Οδύσσεια

Ηλίας Παπαγεωργίου
Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ,
Κανάρη 8 Νέο Ψυχικό 15451
hliap@teemail.gr

Φώτης Παπαγεωργίου
Ακαδημαϊκός Διευθυντής
Μητροπολιτικού Κολεγίου
Σωτήρος 1^Α, Πειραιάς 16535
fpapageorgiou@metropolitan.edu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα ομηρικά έπη πολλά ακουστικά φαινόμενα καταγράφονται με τέτοια σαφήνεια που μπορούμε να τα ταυτίσουμε με αντίστοιχά τους όπως περιγράφονται με επιστημονικούς όρους: Πρόσθεση ηχητικής πίεσης πολλών πηγών, εξασθένιση ηχητικής πίεσης, επικάλυψη από περιβαλλοντικό θόρυβο και αντήχηση. Η καταγραφή, εκτός από χρήσιμες πληροφορίες με ακουστικό, φιλολογικό και αρχαιολογικό ενδιαφέρον παρέχει τη δυνατότητα σύγκρισης: Στην Ιλιάδα κυριαρχεί η ένταση της φωνής και η επικάλυψη από τον θόρυβο της μάχης, ενώ αντίθετα η Οδύσσεια κυριαρχείται από αντήχηση Αυτό συμβαίνει επειδή η Ιλιάδα διαδραματίζεται στο ύπαιθρο ενώ η Οδύσσεια κυρίως σε εσωτερικούς χώρους. Οι ήχοι ακολουθούν αυτή τη διαφορά.

Homer's sounds Recording, classification and comparison of sound phenomena appearing in Iliad and Odyssey

ABSTRACT

In Homeric poems many acoustic phenomena are described with such clarity that we are able to identify them with equivalents that can be described with scientific terms: Summation of sound pressure level of many sources, attenuation of sound pressure level, masking of sound and reverberation. The classification, apart from useful information of acoustic, literal, and archaeological interest, provides also the possibility of comparison: Iliad is characterized by the loudness of human voice and it's masking by the battle noise, while the Odyssey is characterized by reverberation. This happens because Iliad takes place outdoors while Odyssey indoors. The described sound phenomena follow this difference.

Εισαγωγή

Διαβάζοντας τα ομηρικά έπη ο αναγνώστης εντυπωσιάζεται από τον πλούτο των ηχητικών περιγραφών που ακολουθούν την πλοκή. Οι οπτικές εικόνες συνδυάζονται με τις ηχητικές και ενισχύουν την αίσθηση που κάθε φορά παράγεται. Το ενδιαφέρον από ακουστικής απόψεως είναι πως οι ήχοι δεν περιορίζονται σε μια απλή καταγραφή. Αν και συχνά απαντώνται περιγραφές ήχων κάθε λογής, αυτό που κάνει εντύπωση είναι οι περιγραφές φαινομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία του ήχου και τις ιδιότητές του καθώς παράγεται και διαδίδεται στον χώρο.

Πολλών ειδών ηχητικά φαινόμενα περιγράφονται, όχι προφανώς με επιστημονικό τρόπο και μαθηματικά μεγέθη, αλλά με αρκετή σαφήνεια, ώστε να μπορούμε να τα ταυτίσουμε με αντίστοιχά τους, όπως θα τα περιγράφαμε σήμερα με επιστημονικούς όρους: Πρόσθεση ηχητικής πίεσης πολλών πηγών, εξασθένηση ηχητικής πίεσης, επικάλυψη από περιβαλλοντικό θόρυβο, αντήχηση ή και άλλα όπως ο θόρυβος, η ένταση της ανθρώπινης φωνής και η καταληπτότητα ομιλίας. Οι περιγραφές δείχνουν πως ο ποιητής, όχι μόνο έδινε σημασία στους ήχους, αλλά είχε και μια στοιχειώδη αντίληψη για τη λειτουργία και τη διάδοση του ήχου.

Σε αρκετούς στίχους μέσα στα έπη διακρίνονται επαναλαμβανόμενα μοτίβα που αφορούν στον ήχο. Πρόκειται για ένα γενικότερο χαρακτηριστικό των ομηρικών επών: Συγκεκριμένες λέξεις ή φράσεις επαναλαμβάνονται για να περιγράψουν ίδια ή και διαφορετικά πρόσωπα ή γεγονότα. Κάποια από αυτά μας είναι τόσο γνωστά που τα χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας γλώσσα, όπως τα «ἔπεα πτερόεντα», δηλαδή τα λόγια των ηρώων που «πετάνε σαν τα πουλιά» (και δεν είναι λόγια αστόχαστα, όπως λανθασμένα χρησιμοποιούμε τον όρο σήμερα).

Στην εισήγηση καταγράφονται αποσπάσματα από το πρωτότυπο και γνωστές μεταφράσεις [1,2,3,4]. Τα ηχητικά φαινόμενα ταξινομούνται ανάλογα με το είδος τους.

1. Πρόσθεση σταθμών ηχητικής πίεσης και ένταση φωνής

Η πιο χαρακτηριστική ταύτιση ενός ηχητικού φαινομένου με το αντίστοιχό του στο ομηρικό κείμενο είναι η περιγραφή της έντασης της φωνής των ανθρώπων ή και των θεών ως αποτέλεσμα πρόσθεσης σταθμών ηχητικών πιέσεων πολλών πηγών. Η φιγούρα του Στέντορα, με τη «στεντόρεια» φωνή, απαντάται στην Ιλιάδα, όχι καθεαυτή, αλλά ως πρότυπο που το μιμείται μια θεά, η Αθηνά, φωνάζοντας με δυνατή φωνή σαν αυτόν (Ε.785):

Στέντορι είσαμένη μεγαλήτορι χαλκεοφώνω,
ὄς τόσον αὐδήσασχ' ὅσον ἄλλοι πενήκοντα

Κι έβγαλε τότε στεντόρεια φωνή,
την όψη παίρνοντας του Στέντορα, άφοβου και χαλκόφωνου,
που όταν αυτός βρυχάται είναι σαν να φωνάζουν όλοι μαζί πενήντα

Παρατηρούμε ως η ηχητική πίεση της φωνής περιγράφεται ως πρόσθεση ηχητικών πιέσεων πολλών πηγών ίσης στάθμης. Η «χαλκόφωνη» φωνή του Στέντορα ισοδυναμεί με εκείνη πενήντα ανδρών. Είναι γενικά γνωστό πως το άθροισμα ηχητικών πιέσεων δεν γίνεται αναλογικά αλλά λογαριθμικά. (Δύο πηγές των 40 dB

δεν έχουν ηχητική πίεση 80 dB). Για να δημιουργηθεί μια αισθητή διαφορά χρειάζεται να προστεθούν πολλές πηγές [5]. Αν θεωρήσουμε πως μια δυνατή ανδρική φωνή έχει ηχητική πίεση 70 dB και προσθέσουμε πενήντα φωνές, το αποτέλεσμα ισοδυναμεί με 87 dB.

$$L_{ολ} = 10 \log_{10}(\sum_i 10^{L_i/10})$$

$$\text{Για } i = 50 \text{ προκύπτει πως } L_{ολ} = 10 \log_{10}(50 \cdot 10^{70/10}) = 87 \text{ dB}$$

Ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον έχει η σύγκριση μεταξύ της φωνής του Στέντορα και αυτής των θεών. Όταν ο Άρης ή ο Ποσειδώνας εμφανίζονται και φωνάζουν οι ίδιοι (χωρίς να παίρνουν ανθρώπινη μορφή) η φωνή τους ισοδυναμεί με εκείνη εννέα ή και δέκα χιλιάδων ανδρών μέσα στη μάχη (Ιλ. Ε860, Ξ148).

ὄ δ' ἔβραχε χάλκεος Ἄρης
ὄσσόν τ' ἐννεάχιλοι ἐπίαχον ἢ δεκάχιλοι
ἄνερες ἐν πολέμῳ ἔριδα ζυνάγοντες Ἄρης

Η σύγκριση των προστιθέμενων φωνών κάνει εντύπωση στον αναγνώστη, Για να τονίσει τη διαφορά της θεϊκής με την ανθρώπινη φωνή ο ποιητής δεν προσθέτει διπλάσιο ή έστω δεκαπλάσιο αριθμό ανδρών σε σχέση με του Στέντορα, αλλά πολύ περισσότερους που αυξάνονται εκθετικά ($10.000=10^4$). Αν υπολογίσουμε με την ίδια εξίσωση το άθροισμα 10.000 πηγών, προκύπτει πως η ηχητική πίεση της φωνής του Άρη ή του Ποσειδώνα είναι 110 dB. Η διαφορά είναι εμφανής.

Μπορούμε να υποθέσουμε πως ο Όμηρος γνώριζε εμπειρικά πως η αύξηση της ηχητικής πίεσης δεν είναι ανάλογη της αύξησης του αριθμού των πηγών.

Επισημαίνεται πως η ηχητική πίεση από τις φωνές 10.000 ανδρών δεν υπολογίζεται με ακρίβεια από τον συγκεκριμένο τύπο, καθώς η διασπορά των πηγών διαφοροποιεί την απόσταση της εκάστοτε πηγής από τον δέκτη και άρα την ηχητική της πίεση. Σημειώνεται επίσης πως στην τελική ηχητική πίεση δεν συνυπολογίζονται οι ήχοι των όπλων, που ίσως να ενίσχυαν την ηχητική πίεση.

Αξίζει τέλος να σχολιαστεί πως αν και η διαφορά ανάμεσα στη φωνή των ανθρώπων και εκείνη των θεών είναι έντονη, μπορούσε να γίνει νοητή με ανθρώπινα μέτρα, αν και τα ξεπερνούσε, σύμφωνα με τις αντιλήψεις των αρχαίων Ελλήνων για τους θεούς τους. Για να δώσουμε μια τάξη μεγέθους, η ένταση της φωνής τους δεν ξεπερνούσε εκείνη ενός αεροπλάνου ή το ανώφλιο του πόνου [6].

2. Εξασθένιση ηχητικής πίεσης και καταληπτότητα ομιλίας

Η ανθρώπινη ή και η θεϊκή φωνή αποτελεί ένα στοιχείο που εμφανίζεται στο κείμενο με πολλούς τρόπους. Σε αρκετά σημεία επισημαίνεται η εξασθένισή της μέσα από το επαναλαμβανόμενο μοτίβο «ὄσσον τε γέγωνε βοήσας», που συνήθως μεταφράζεται ως «όσο εκεί που φτάνει ο ήχος ανθρώπου που φωνάζει». Το ενδιαφέρον της φράσης είναι η λέξη «γέγωνε». Το ρήμα «γεγωνέω» δεν σημαίνει απλά ακούω, αλλά «γίνομαι κατανοητός». Ο Αριστοτέλης [7] γράφει χαρακτηριστικά πως ο αέρας «διὰ τὸ ψαθυρὸς εἶναι οὐ γεγωνεῖ», δηλαδή δεν παράγει ήχο που γίνεται καταληπτός με τρόπο που να βγάζει νόημα. Η υπαρξιακή σημασία που έδιναν οι αρχαίοι στον λόγο, ανάγει την ανθρώπινη φωνή σε μέτρο και εμβάτη μέσα από το

οποίο μετριέται ο χώρος, δίνοντας κλίμακα στα ανθρώπινα συμβάντα. Η καταληπτότητα της ομιλίας είναι τόσο σημαντική που αποτελεί τμήμα του επαναλαμβανόμενου μοτίβου,.

Η περιγραφή της εξασθένησης της φωνής, σε κάποια σημεία γίνεται με μια γνώση του τρόπου με τον οποίο λαμβάνει χώρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η απομάκρυνση από το νησί του Πολύφημου. Ο Οδυσσεύς και οι σύντροφοί του, για να γλυτώσουν, μπαίνουν στο πλοίο και κάνουν γρήγορα κουπί. Αφού το πλοίο έχει απομακρυνθεί αρκετά από το νησί, αλλά τόσο «ὄσσον τε γέγωνε βοήσας» (I.473), ο ήρωας φωνάζει πως δεν είναι ο “Ούτις” (ο Κανένας) αλλά ο Οδυσσεύς ο γιος του Λαέρτη. Ο κύκλωπας τότε πετάει έναν βράχο που βρίσκεται το καράβι λίγο μπροστά από την πλώρη και το κύμα που δημιουργείται το γυρίζει πίσω στην ακτή. Το καράβι γρήγορα τότε απομακρύνεται σε διπλάσια απόσταση (δix τόσσον ἄλα πρήσσοντες ἀπήμεν). Παρά τον διπλασιασμό της απόστασης, η φωνή του Οδυσσεά συνεχίζει να ακούγεται όταν ξαναφωνάζει με μίσος στον Πολύφημο. Ο δεύτερος βράχος που ρίχνει όμως ο κύκλωπας δεν μπορεί να φτάσει πια το πλοίο. Ο διπλασιασμός της απόστασης αντιστοιχεί στον τρόπο εξασθένησης της ηχητικής πίεσης, που γίνεται με λογαριθμικό τρόπο [8] και περιγράφεται πιο απλά με τον κανόνα του αντίστροφου τετραγώνου, σύμφωνα με τον οποίο έντονη μεταβολή (της τάξης των 6 dB) στην ηχητική πίεση, παρατηρείται όχι με μικρομεταβολές αλλά με διπλασιασμούς της απόστασης της πηγής από τον δέκτη.

Ο Όμηρος μέσα από το συγκεκριμένο μοτίβο μας δίνει μια τάξη μεγέθους για την κλίμακα του χώρου που λαμβάνουν χώρα τα τεκταινόμενα. Για παράδειγμα ο Οδυσσεύς, φτάνοντας στην πόλη των Φαιάκων, σταματά σε ένα άλσος που απέχει τόσο «ὄσσον τε γέγωνε βοήσας» (Οδ. Z.295). Δεν γνωρίζουμε την ηχητική πίεση της φωνής του, ούτε την τιμή του περιβαλλοντικού θορύβου στη συγκεκριμένη περιοχή και εποχή, ώστε να υπολογίσουμε την εξασθένηση της ηχητικής πίεσης. Συνεπώς δεν μπορούμε να βγάλουμε ακριβή συμπεράσματα για τις αποστάσεις τις οποίες σκιαγραφεί. Παρόλα αυτά μπορούμε να έχουμε μια τάξη μεγέθους, καθώς η κλίμακα της ανθρώπινης φωνής είναι της τάξης κάποιων δεκάδων ή ίσως εκατοντάδων μέτρων, όχι όμως χιλιομέτρων.

Το ίδιο μοτίβο απαντάται στη σκηνή των Σειρήνων (Οδ. M.185). Όταν το πλοίο του Οδυσσεά απείχε «ὄσσον τε γέγωνε βοήσας», εκείνες άρχισαν το «λιγυρό», δηλαδή το «λιγυρόφθογγο», το «οξύφωνο» τραγούδι τους.

Η ένταση της φωνής των ανθρώπων και των θεών συνδέεται με αρκετούς ακόμα τρόπους με την εξασθένηση της ηχητικής πίεσης. Στην Ιλιάδα (Λ.005) η Έριδα φωνάζει από το πλοίο του Οδυσσεά με «ανήκουστη στριγκιά φωνή» (ἦδσε θεά μέγα τε δεινόν) που έχει τέτοια ένταση που, αν και βρίσκεται στο μέσον του στρατοπέδου, ακούγεται μέχρι τα άκρα του. Δυστυχώς δεν έχουμε πληροφορίες για το μέγεθος του στρατοπέδου ώστε να υπολογίσουμε την αρχική ηχητική πίεση, παρά μόνο ίσως από το πλήθος των караβιών.

Η ανθρώπινη φωνή περιγράφεται με εξίσου γλαφυρούς όρους. Η φωνή του Αίαντα φτάνει μέχρι τον ουρανό (αιθήρ' ἴκανεν) (Ιλ. O.686), ενώ ο Οδυσσεύς, ο Διομήδης, ο Αχιλλέας ή και οι Τρώες βρωντοφωνάζουν τρομακτικά (σμερδαλέον εβόησε ή σμερδαλέα ιάχων) (Οδ. Ω.537, Ιλ. Θ.94, T.041). Ο Διομήδης και ο Μενέλαος, άλλωστε, φημίζονται για την βροντερή ή τη βαριά φωνή τους (βοήν αγαθόν, Οδ. O.12, O.57, O.67, O. 92, Ιλ. Z.36, Z. 124, Θ.94, I. 696, K.220).

3. Επικάλυψη από περιβαλλοντικό θόρυβο

Όσο έντονη κι αν είναι, όμως, η φωνή των ηρώων και των θεών, ποτέ δεν καταφέρνει να ακούγεται παντού. Σε πολλά σημεία των επών οι ήχοι επικαλύπτονται από τον περιβαλλοντικό θόρυβο, όπως θα περιγράψαμε σήμερα το φαινόμενο της επικάλυψης (masking) ήχων ίδιου φάσματος, όταν υπάρχει διαφορά στην ηχητική πίεση και ο δυνατότερος επικαλύπτει τον πιο αδύνατο [9]. Οι ήρωες το γνωρίζουν αυτό και φωνάζουν δυνατά για να ακουστούν: «αὐτὰρ ὁ μακρὸν ἄϋσεν ἄναξ ἀνδρῶν Ἀγαμέμνων» (βγάζει φωνή μεγάλη για να ακουστεί παντού) (Ιλ.Γ.82). Δεν τα καταφέρνουν πάντα όμως. Ειδικά στην Ιλιάδα, οι φωνές των ηρώων χάνονται από τον θόρυβο της μάχης (Ιλ. Μ.337)

Τεῦκρόν τε νέον κλισίηθεν ἰόντα
ἐγγύθεν· ἄλλ' οὐ πῶς οἱ ἔην βώσαντι γεγωνεῖν·
τόσσος γὰρ κτύπος ἦεν, αὐτὴ δ' οὐρανὸν ἴκε

όμως δεν ήταν δυνατόν φωνάζοντας να τον ακούσουν,
εμπόδιζε ο ορυμαγδός της μάχης,
το βουητό που ανέβαινε στον ουρανό...

Ο Πάτροκλος σκοτώνεται από τον Έκτορα χάρις στον δόλο του Απόλλωνα που κρυμμένος μέσα σε πυκνή νεφέλη κατάφερε ώστε να μην τον πάρει «εκείνος είδηση να φτάνει μέσα στη βαβούρα» (Π.789). Η επικάλυψη από τον θόρυβο, άλλωστε, τρομάζει ακόμα και τους πιο δυνατούς και έμπειρους ρήτορες, τόσο ηχητικά όσο και ψυχικά. Στη σύναξη των Αχαιών, ο Αγαμέμνων επιχειρεί να απολογηθεί για τις επιλογές του που καθυστερούν τη νίκη, όμως το ακροατήριο θορυβεί. Ο Αγαμέμνων τότε τους παρακαλεί να σωπάσουν (Ιλ.Τ.78) :

έσταότος μὲν καλὸν ἀκούειν, οὐδὲ ἔοικεν
ὑββάλλειν· χαλεπὸν γὰρ ἐπισταμένῳ περ ἐόντι.
ἀνδρῶν δ' ἐν πολλῷ ὀμάδῳ πῶς κέν τις ἀκούσαι
ἢ εἴποι; βλάβεται δὲ λιγύς περ ἐὼν ἀγορητής

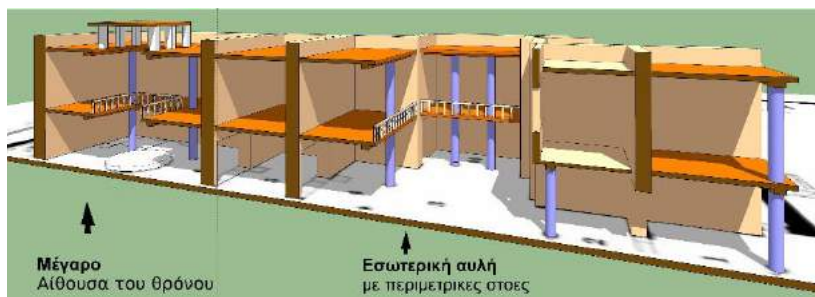
Είναι καλό αυτόν που στήνεται να σας μιλήσει, πρώτα να τον ακούτε,
δεν πρέπει να τον κόβετε στη μέση, πράγμα που δυσκολεύει
ακόμα και τον έμπειρο στα λόγια. Όταν κάποιος μιλά
μέσα σε φασαρία, πως να ακουστεί και τι να πει; Χάνεται ο λόγος του,
κι ας είναι ακόμη ρήτορας με δυνατή φωνή.

Ο θόρυβος αποτελεί στοιχείο που περιγράφεται και επαναλαμβάνεται στην Οδύσσεια και κυρίως στην Ιλιάδα, δίνοντας ένταση στα συμβάντα. Αλλά και το αντίθετό του, η σιωπή, αποκτά αξία που και που. Οι Φαίακες, ακούγοντας τη διήγηση του Οδυσσέα, βυθίζονταν στη σιωπή (οἱ δ' ἄρα πάντες ἀκὴν ἐγένοντο σιωπῆι). Το ίδιο συνέβαινε στις συνελεύσεις των Αχαιών και των Τρώων, όπου μετά από μια σημαντική ομιλία «πάντες ἀκὴν ἐγένοντο σιωπῆι», ώσπου να σηκωθεί να μιλήσει ο επόμενος μετά από αρκετή ώρα (Οδ. Η.154, Θ.234, Π.393, Λ.335, Ιλ. Η.92, Η.398, Θ.29, Ι.430, Ι.693, Κ.218, Κ.313, Ψ.676). Σημειώνεται πως σε κάποια σημεία, ενώ θα

περίμενε κανείς να κυριαρχούνται από έντονους ήχους, εκεί απουσιάζουν, όπως στη Μνηστηροφονία, αν εξαιρέσουμε τα λόγια που ανταλλάσσονται.

4. Αντήχηση

Η αντήχηση στα έπη εμφανίζεται κυρίως μέσα από ένα χαρακτηριστικό επαναλαμβανόμενο μοτίβο, τη φράση «αιθούσης έριδούπου», που μεταφράζεται ως «στην ηχηρή με τις κολώνες αίθουσα» (Χατζηγιακουμής) ή ως «πολύβουη στοά» (Μαρωνίτης) (Οδ. Γ.398, Γ. 494, Η. 345, Ο.145, Ο.191, Υ.176, Υ.189, Ιλ. Ω.323). Η έμφαση δίνεται από το συστατικό «έρι» που σημαίνει «πολύ» και πολλαπλασιάζει τον «δούπο». Εμφανίζεται μια αντιγνωμία ανάμεσα στους μεταφραστές για τη σημασία της λέξης «αίθουσα». Η λέξη ετυμολογικά προέρχεται από το «αΐθω» που σημαίνει «καίω» ή «λάμπω». Η αρχαία αίθουσα δεν ήταν σκοτεινή, τόσο που μας κάνει να πιστεύουμε πως αντιστοιχούσε με εξωτερικό χώρο, δηλαδή με μια στοά. Παλαιότεροι μελετητές, μάλιστα, έτειναν να πιστεύουν πως το «έριδούπου» περιέγραφε τον θόρυβο του αέρα που φυσούσε έξω από την στοά [10]. Οι βοσκοί δένουν τα ζώα τους μέσα στο παλάτι του Οδυσσέα «ὕπ' αιθούση έριδούπω». Η λέξη, όμως, μπορεί και να αναφέρεται στον εσωτερικό χώρο του μεγάρου που φωτίζονταν από την φωτιά της εστίας. Προφανώς δεν αντιστοιχεί στους εισηγητές να έχουν γνώμη πάνω στο ζήτημα. Περιοριζόμαστε μόνο σε μία επισήμανση για τον χρόνο αντήχησης σε έναν χώρο που αναφέρεται από τον Όμηρο και για τον οποίον έχουμε στοιχεία: το ανάκτορο του Νέστορα στην Πύλο. Στην Οδύσσεια αναφέρεται πως ο Τηλέμαχος φιλοξενείται από τον Νέστορα και πέφτει να κοιμηθεί «ὕπ' αιθούση έριδούπω».



*Εικόνα 4.1 Τομή στο ανάκτορο του Νέστορος.
Αριστερά φαίνεται το Μέγαρο και δεξιά η Εσωτερική αυλή*

Μπορούμε να υποθέσουμε πως ο Τηλέμαχος κοιμήθηκε στην Εσωτερική Αυλή του παλατιού που περιστοιχίζεται από στοές με κίονες ή μέσα στην αίθουσα του θρόνου με τους κίονες γύρω από την εστία, το Μέγαρο (Εικ. 4.1). Και οι δύο χώροι έχουν δάπεδο από ασβεστοκονίαμα χρωματισμένο, πέτρινους τοίχους επιχρισμένους με πηλό και χρώμα και ξύλινες οροφές και κίονες [11,12]. Με τη βοήθεια της εξίσωσης του Sabine, βλέπουμε πως το Μέγαρο έχει πολύ μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης από την Εσωτερική Αυλή (Πιν.4.1). Αν και έχει μικρότερο όγκο (1005 και 1409 μ³ αντίστοιχα), η διαφορά οφείλεται στο γεγονός πως η οροφή της Αυλής είναι ανοιχτή. Ούτε η αντήχηση της Αυλής, όμως, είναι αμελητέα, αν λάβουμε υπ' όψιν πως πρόκειται για υπαίθριο χώρο. Επισημαίνεται, επίσης, πως η Αυλή λειτουργούσε

και ως χώρος αναμονής, γεμάτος με κάθε λογής ανθρώπους [13]. Το γεγονός μπορεί να συνέβαλε στη δημιουργία μιας αίσθησης βουής από την ανθρώπινη δραστηριότητα, που δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τον χρόνο αντήχησης. Δεν αποκλείεται τέλος η πιθανότητα η βοή να οφείλεται σε πλαταγισμούς (flutter echo) όταν ο ήχος εγκλωβίζεται σε περιοχές των στοών με μικρές διαστάσεις.

Πίνακας 4.1 Χρόνος αντήχησης R_{60} στο Μέγαρο και την Εσωτερική Αυλή

	v (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Μέγαρο	R_{60} (sec)	1.01	1.53	2.65	2.55	2.23	1.61
Εσωτερική Αυλή	R_{60} (sec)	0.91	1,04	1,20	1,16	1,11	0,98

Μια ακόμα χαρακτηριστική περιγραφή του φαινομένου της αντήχησης εμφανίζεται με τη φράση «σμερδαλέον κονάβησε». Όταν ο Τηλέμαχος κάποια στιγμή φτερνίστηκε μέσα στο παλάτι του Οδυσσέα, «ἀμφὶ δὲ δῶμα σμερδαλέον κονάβησε», δηλαδή «αντήχησε τρομακτικά» (P.541), τόσο που ακούστηκε από την Πηνελόπη στον πάνω όροφο. (Συμπεραίνουμε μάλιστα από το γεγονός πως τα μέγαρα τότε δεν διέθεταν πολύ καλή ηχομόνωση). Παρόμοια αντήχηση εμφανίζεται και στη σπηλιά του Πολύφημου. Όταν ο Οδυσσέας τον τύφλωσε, εκείνος «μούγγρισε φοβερὰ κι ολόγυρα αντήχησε ἡ πέτρινη σπηλιά». (σμερδαλέον δὲ μέγ' ὄμωξεν, περὶ δ' ἴαχε πέτρη) (I.395). Η αντήχηση τέλος περιγράφεται sporadικά σε διάφορα άλλα σημεία, με όρους όπως «περιστεναχίζεται» (Οδ. K.10, Ψ.146) ή «δάπεδον δ' ἄπαν ἀμφιμέμυκεν» (Οδ. K.227).

5. Σύγκριση Οδύσσειας και Ιλιάδος

Η σύγκριση των ταξινομημένων αποσπασμάτων ανάλογα με το είδος του ηχητικού φαινομένου, αποκαλύπτει μια ενδιαφέρουσα διαφορά ανάμεσα στα δύο έπη: Στην Ιλιάδα κυριαρχεί ο θόρυβος (της μάχης), η επικάλυψη της φωνής από τον θόρυβο και η ένταση της φωνής των πρωταγωνιστών. Σπάνια όμως περιγράφονται φαινόμενα αντήχησης. Αντίθετα, στην Οδύσεια η αντήχηση κυριαρχεί. Πράγματι, είναι λογικό να συμβαίνει αυτό.

Στην Ιλιάδα τα περισσότερα γεγονότα είναι υπαίθρια ή λαμβάνουν χώρα μέσα στις σκηνές των Αχαιών, που ο ήχος δεν ανακλάται. Η μόνη ανακλαστική επιφάνεια είναι τα πλοία, που «αντηχούν τρομακτικά» όταν οι Αχαιοί ζητωκραυγάζουν. «Αμφὶ δὲ νῆες σμερδαλέον κονάβησαν ἄυσάντων ὑπ' Ἀχαιῶν» (B.333, Π.277). Το μόνο άλλο πράγμα που αντηχεί στην Ιλιάδα είναι τα χάλκινα όπλα των νεκρών πολεμιστών που, πέφτοντας, βροντούν στο έδαφος.

Από την άλλη μεριά, η Οδύσεια είναι ένα έπος “εσωτερικού χώρου”. Λίγα τμήματα του κειμένου διαδραματίζονται στη θάλασσα ή στο υπαίθρο, αντίθετα τα την περιληπτική αφήγηση που συνήθως περιορίζεται στα πάθη του Οδυσσέα στη θάλασσα. Αυτά δεν καταλαμβάνουν παρά μόνο λίγες ραψωδίες. Τα περισσότερα συμβάντα λαμβάνουν χώρα μέσα στις “πολύβουες” στοές, τις αίθουσες και τα δωμάτια των μεγάρων όπως είδαμε, αλλά και σε σπίτια, σπηλιές, καλύβες, εσωτερικές αυλές, ακόμα και στον Άδη που νοούνταν ως ένα κλειστό σπήλαιο. Στη Νέκυια (Ραψωδία λ) οι νεκροί συγκεντρώνονται με τρομερή ιαχή (θεσπεσίη ιαχῆ, ήχη θεσπεσίη Λ.42, Λ.633).

Τα ηχητικά φαινόμενα παρακολουθούν αυτή τη διαφοροποίηση κάνοντας την πλοκή ζωντανή και κυρίως αληθοφανή. Ο αναγνώστης νοιώθει πως βρίσκεται μέσα στους χώρους που περιγράφονται. Η παρουσία του ήχου του δίνει την εντύπωση πως είναι όχι μόνο αυτόπτης αλλά και αυτόκοος μάρτυς όσων διαδραματίζονται. Για να το περιγράψουμε με πιο «ελληνικούς» όρους, το «σάουντρακ» ακολουθεί το «σκριπτ». Αν αναλογιστούμε μάλιστα τις σύγχρονες κινηματογραφικές αποδόσεις των επών, συχνά το «σάουντρακ» απογοητεύει, αν έχει κανείς αντίληψη του πρωτοτύπου.

Κλείνοντας, επισημαίνουμε πως η καταγραφή των ηχητικών φαινομένων, εκτός από την κατανόηση των ίδιων των κειμένων μπορεί να συμβάλει και στην άντληση πραγματολογικών στοιχείων που πιθανόν να χρησιμεύουν στην αρχαιολογική έρευνα. Το πιο σημαντικό όμως είναι πως τα ομηρικά έπη, μπορούν να λειτουργήσουν ως διδακτικά παραδείγματα που περιγράφουν με εύγλωττο και γλαφυρό τρόπο τα ακουστικά φαινόμενα σε μια πρωτογενή και κατανοητή μορφή. Όσα σήμερα περιγράφουμε με εξισώσεις, καταλαβαίνουμε πως ένας προσεκτικός παρατηρητής, αν κλείσει λίγο τα μάτια και ανοίξει τα αυτιά του, μπορεί να τα ακούσει και να κατανοήσει την λειτουργία τους, συσχετίζοντάς τα με τον χώρο που τα περιβάλλει και τις ανθρώπινες ενέργειες που τα δημιουργούν.

6. Αναφορές

- [1] Ομήρου *Οδύσσεια*, Μετάφραση Δ.Ν. Μαρωνίτης, Ίδρυμα Νεοελληνικών Σπουδών, Αθήνα (2015)
- [2] Ομήρου *Ιλιάδα*, Μετάφραση Δ.Ν. Μαρωνίτης, Αγρα, Αθήνα (2006)
- [3] Ομήρου, *Οδύσσεια*, Μετάφραση Μανώλης Κ. Χατζηγιακουμής, Κέντρο Ερευνών και εκδόσεων (2017)
- [4] Ομήρου, *Ιλιάδα*, Μετάφραση Ν. Καζαντζάκη, Ι. Κακριδή,
- [5] Ευθυμιάτος Διονύσης *Ακουστική και κτιριακές εφαρμογές Παπασωτηρίου*, Αθήνα (2007), σελ. 46.
- [6] Τσινίκας Νίκος *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων* University studio press, Θεσσαλονίκη (2005), σελ. 18.
- [7] Αριστοτέλης *Περί Ψυχής*, 420a
- [8] Ευθυμιάτος, ο.π. σελ. 73.
- [9] Σωτηροπούλου Αλεξάνδρα *Ακουστικός σχεδιασμός αιθουσών ακροατηρίου* Ηλεκτρονικό Βιβλίο, (2015), σελ. 25
- [10] Matthaei Devarii (Ματθαίος Δίβαρης) *Index in Eustathii Commentarios in Homeri Iliadem et Odysseam*, Λειψία (1828), σελ. 17, 176.
- [11] Davis Jack *Πύλος η αμμονδερή. Ιστορικό και αρχαιολογικό ταξίδι από την εποχή του Νέστορα έως τη ναυμαχία του Ναβαρίνου*, Μετάφραση Μάγια Κόμβου, Παπαδήμας Αθήνα (2005), σελ. 116.
- [12] Blegen Carl, Rawson Marion *Οδηγός στο ανάκτορο του Νέστορα*, Μετάφραση Λίτσα Χατζηφώτη, Παπαδήμας Αθήνα (2004)
- [13] Vermeule Emily *Εποχή του χαλκού*, Μετάφραση Θεόδωρος Ξένος, Καρδαμίτσα, Αθήνα (1983), σελ. 191

Αρχαιοακουστική έρευνα σπηλαίων αφιερωμένων στη λατρεία του Πάνα και των Νυμφών στην Αττική

Νεκτάριος-Πέτρος Γιούτσος
Δρ. Αρχαιολογίας, Μεταδιδάκτωρ
ερευνητής / Τμήμα αρχαιολογίας,
Εθνικό Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών
nekt79@yahoo.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Υπ. Διδάκτωρ/Ομάδα τεχνολογίας
ήχου και ακουστικής, Τμήμα
ηλ. μηχανικών & τεχνολογίας
υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών
grkamaris@upatras.gr

Κωνσταντίνος Καλέρης
Υπ. Διδάκτωρ/ Ομάδα τεχνολογίας
ήχου και ακουστικής, Τμήμα
ηλ. μηχανικών & τεχνολογίας
υπολογιστών, Πανεπιστήμιο
Πατρών

Χαράλαμπος Παπαδάκος
Διδάκτωρ/ Ομάδα τεχνολογίας
ήχου και ακουστικής, Τμήμα
ηλ. μηχανικών & τεχνολογίας
υπολογιστών, Πανεπιστήμιο
Πατρών

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής/ Ομάδα τεχνολογίας ήχου
και ακουστικής, Τμήμα ηλ. μηχανικών &
τεχνολογίας υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών
mourjor@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατες αρχαιοακουστικές τεχνικές και νέες ερευνητικές μέθοδοι σε σπήλαια και αρχαίες κατασκευές επιτρέπουν μια νεωτερική προσέγγιση των αρχαίων κτισμάτων και των φυσικών χώρων, τα οποία θεωρούνταν στην αρχαιότητα τόποι θεικής παρουσίας, προσφέροντας τη δυνατότητα η αρχαία λατρεία και οι τελετουργικές πρακτικές να ερμηνευθούν με νέο τρόπο. Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάστηκε σε επιλεγμένα παραδείγματα σπηλαίων με γνωστή ιστορική σημασία στην αρχαία ελληνική κοινωνία. Τα σπήλαια επιλέχθηκαν από μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, την Αττική, όπου η κοινή λατρεία του Πάνα και των γυναικείων συντρόφων του, των Νυμφών, οργανώθηκε για πρώτη φορά κατά τον 5^ο αιώνα π.Χ. Πρόκειται για ένα πρόδρομο διεπιστημονικό πρόγραμμα που σκοπό έχει την ενίσχυση υφιστάμενων γνώσεων σχετικά με τη χρήση του ήχου και της ακουστικής μέσω τελετουργικών δρώμενων μέσα σε σπήλαια, σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί κατά πόσο η ακουστική των χώρων αυτών και η ανταπόκριση τους σε πηγές ήχου, που σύμφωνα με τα αρχαιολογικά και ιστορικά δεδομένα αναπαράγονταν στο εσωτερικό τους κατά την αρχαιότητα, επηρέασε στην επιλογή τους για τη λατρεία των θεοτήτων αυτών. Παρόλο που η πρόσβαση σε τέτοιους χώρους παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις σε δύο τουλάχιστον λατρευτικά σπήλαια (Πάρνηθα – Βάρη) σε διαφορετικές θέσεις πηγή-δέκτη σε σημεία, όπου ιστορικά στοιχεία και αρχαιολογικές μαρτυρίες επιβεβαιώνουν ότι ανάλογες τελετουργικές πράξεις λάβαιναν χώρα. Στα σπήλαια αυτά πραγματοποιήθηκαν δύο ειδών ακουστικές μετρήσεις. Ακουστικές μετρήσεις με

παντοκατευθυντικό μικρόφωνο με σκοπό την καταγραφή των ακουστικών παραμέτρων και των ακουστικών ιδιοτήτων των χώρων αυτών και μετρήσεις με τη χρήση αμφιωτικής τεχνικής με σκοπό αργότερα να δημιουργηθούν δείγματα εικονικών ακροάσεων χρησιμοποιώντας κατάλληλα προ-ηχογραφημένα ηχητικά δείγματα, τα οποία σύμφωνα με αρχαιολογικά και ιστορικά δεδομένα αναπαράγονταν κατά τη διάρκεια των αρχαίων τελετών και έκαναν τους λατρευτές να πιστεύουν ότι επρόκειτο για χώρους κατοικίας των θεοτήτων αυτών. Οι μετρήσεις και οι ανάλυση των δεδομένων θα παρέχουν νέα στοιχεία σχετικά με την καταλληλότητα της ακουστικής των σπηλαίων για τέτοιες τελετουργικές πράξεις.

Archaeoacoustic Research on Caves dedicated to Pan and the Nymphs in Attica, Greece

ABSTRACT

Recent archaeoacoustic techniques, applied in ancient sacred grottos and other constructions, have paved the way for new research insights in ancient cult and ritual practice, offering the potential to enrich interpretations of how ancient buildings or natural spaces were perceived as loci of divine presence and worship. Here, the acoustic research was focused on selected examples of caves with known historic significance in ancient Greek societies. The caves were selected from a specific geographical region, Attica in Greece, where the combined worship of the hoofed-god Pan with his female companions, the Nymphs, was first organized and performed inside caves during the 5th century BC. The purpose of this inter-disciplinary research is to enhance our existing knowledge regarding the utilization of sound and acoustics during ritual ceremonies in caves, in an attempt to understand whether sound was a determining factor in the selection of caves as appropriate sacred sites. Although access to such caves introduces significant difficulties, acoustic measurements were obtained in two caves (Parnitha and Vari) at different source-receiver positions at locations where historic evidence indicates that such rituals were taken place. The single channel measurements were used for extraction of the acoustic parameters of the caves. For the same positions, binaural responses were recorded using a dummy head and these were later utilized via virtual listening scenarios for presentations and controlled evaluation of the cave acoustics by listeners in the laboratory using appropriate pre-recorded audio samples which according to the archaeological and historical data were reproduced during ancient rituals, made people believe that they were the abodes of these sacred spirits. The tests and analysis provide novel findings with regards to the suitability of cave acoustics for such ritual ceremonies.

Εισαγωγή

Παρότι η οπτική αντίληψη κυριαρχεί στη σύγχρονη επιστημονική σκέψη, τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον στις ακουστικές και αισθητηριακές ιδιότητες του υλικού παρελθόντος[1]. Ειδικότερα, η σύγχρονη έρευνα στην αρχαιολογία των αισθήσεων ασχολείται περισσότερο με τις αισθητηριακές ιδιότητες των αρχαίων λατρευτικών χώρων. Πρόσφατες αρχαιοακουστικές τεχνικές που εφαρμόζονται σε σπήλαια και αρχαίες κατασκευές, προσφέρουν χρήσιμα

στοιχεία για νέες ερευνητικές μεθόδους, που βοηθούν στην κατανόηση της αρχαίας λατρείας και των τελετουργικών πρακτικών των αρχαίων κτισμάτων και φυσικών χώρων που θεωρούνταν στην αρχαιότητα τόποι θεϊκής παρουσίας [2,3, 4, 5].

Τα σπήλαια αποτελούνται από πολλές επιφάνειες, γεωμετρικούς όγκους και σχήματα που διαμορφώνουν έναν ιδιόζοντα ακουστικό χώρο διαφορετικό από αυτόν που δημιουργείται σε ένα υπαίθριο ιερό [6]. Κατά συνέπεια, τα υπόγεια ιερά που ήταν αφιερωμένα στη λατρεία του Πάνα και των Νυμφών δεν θα πρέπει να εκλαμβάνονται αποκλειστικά ως τοπία με ορισμένα οπτικά χαρακτηριστικά, αλλά και ως ηχοτοπία με ιδιαίτερες ακουστικές ιδιότητες που διαμόρφωσαν και επηρέασαν τις τελετουργικές πράξεις που τελούνταν στο εσωτερικό τους [7]. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η ακουστική έρευνα αυτών των σπηλαίων και η κατάλληλη ανάλυση των ακουστικών τους χαρακτηριστικών, σε συνδυασμό με αρχαιολογικές και μουσικές μεθόδους, σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί κατά πόσο η ακουστική των χώρων αυτών και η ανταπόκριση τους σε πηγές ήχου, που σύμφωνα με τα αρχαιολογικά και ιστορικά δεδομένα αναπαράγονταν στο εσωτερικό τους κατά την αρχαιότητα, επηρέασε στην επιλογή τους για τη λατρεία των θεοτήτων αυτών.

1. Ιστορικά δεδομένα

Ο πρωταρχικός χώρος της λατρείας του θεού Πάνα ήταν η Αρκαδία και από εκεί το όνομα και η λατρεία του εξαπλώθηκαν σε άλλα μέρη της Ελλάδας [8]. Οι Αθηναίοι ήταν από τους πρώτους που καθιέρωσαν επίσημα ως τόπο λατρείας του θεού το σπήλαιο, ένα φυσικό ιερό απομακρυσμένο από τα αστικά κέντρα κατά το πρώτο τέταρτο του 5^{ου} αιώνα π.Χ. (Ηροδότος, *Ιστορίαι*, VI, 105-106). Η παρουσία του υγρού στοιχείου, τα ίχνη παλαιότερης λατρείας στο χώρο, τα στενά στόμια, το υψηλό υψόμετρο, η δύσκολη προσβασιμότητα και ο χαμηλός, συχνά ανύπαρκτος φωτισμός είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα που επηρέασαν στην επιλογή των σπηλαίων αυτών για να υποδεχτούν τη συνδυασμένη λατρεία του τραγοπόδαρου θεού και των θηλυκών συντρόφων του [9]. Επιπλέον, το σπήλαιο αποτέλεσε το κατάλληλο μέρος για το τελετουργικό της λατρείας του Πάνα και για την ταυτόχρονη έκφραση της αρκαδικής του καταγωγής, καθώς ήταν ταιριαστό με τον άγριο και πρωτόγονο χαρακτήρα του αρκαδικού θεού [10]. Εξάλλου, ο Πάνας είχε μία ιδιαίτερη σχέση με τους φυσικούς ήχους, την ηχώ και τον θόρυβο και ο ήχος αποτελούσε βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της λατρείας του. Κατά συνέπεια το τελετουργικό πρωτόκολλο της λατρείας του Πάνα και των Νυμφών περιλάμβανε την παραγωγή διαφόρων ήχων (Λουκιανός, *Δις κατηγορούμενος*, 8-9) και οι συνεπακόλουθες αντηχήσεις στους υπόγειους χώρους θα θεωρούνταν πιθανότατα ως σημάδια θεϊκής παρουσίας. Κατά τη διάρκεια τέτοιων λατρευτικών πρακτικών οι συμμετέχοντες μέσω του χορού, της μουσικής, του γέλιου, του φαγητού και γενικότερα του θορύβου που προκαλούσαν, δημιούργησαν ένα σύστημα τελετουργικής δράσης, μέσω του οποίου γίνονταν οι ίδιοι κοινωνοί της θεϊκής επιφάνειας. Στην Αττική έχουν μέχρι τώρα αναγνωρισθεί δεκατέσσερα λατρευτικά σπήλαια που ήταν αφιερωμένα στη λατρεία των παραπάνω θεοτήτων, όπως στην Ακρόπολη, στον Μαραθώνα, στο Δαφνί, στον Υμηττό, στη Βάρη, στην Πάρνηθα, στην Πεντέλη κ.ο.κ. Από το σύνολο των λατρευτικών σπηλαίων στην Αττική επελέγησαν για τη συγκεκριμένη έρευνα δύο, των οποίων η χρήση έχει τεκμηριωθεί από την ανασκαφική σκαπάνη και τα οποία παρουσιάζουν ελάχιστες αλλοιώσεις στο εσωτερικό και στον ευρύτερο περιβάλλοντα χώρο, το σπήλαιο «Λυχοσπηλίας» στην Πάρνηθα και το σπήλαιο «Νυμφόληπτου» στη Βάρη.

2. Τοποθεσία και χαρακτηριστικά των σπηλαίων

1.1. Το σπήλαιο «Λυχνοσπηλιά» Πάρνηθας

Το σπήλαιο «Λυχνοσπηλιά» βρίσκεται στις νοτιοδυτικές υπώρειες της Πάρνηθας σε απόσταση 1500μ. από το απόκρημνο όρος Άρμα, σε ύψος 35μ. από την αριστερή όχθη χειμάρρου που ονομάζεται «ρεύμα της Γκούρας» και σε υψόμετρο 773μ. από την επιφάνεια της θάλασσας. Η πρόσβαση σε αυτό γίνεται σχετικά δύσκολα από δρόμο διανοιγμένο ήδη από τη αρχαιότητα που οδηγούσε από το μεσαιωνικό οικισμό στη θέση «Ρουμάνι» για να καταλήξει στη βόρεια πλευρά του πρόθυρου της σπηλιάς. Το σπήλαιο έχει μερικώς ανασκαφεί από τον αρχαιολόγο Ανδρέα Σκιά στα 1900-1901 αποκαλύπτοντας εκτεταμένη λατρεία των Νυμφών και του Πάνα κατά τον 5^ο και 4^ο αιώνα π.Χ. [11]. Το τριγωνικό στόμιο πλάτους 1.05μ. ανοίγεται στο νότιο άκρο του πρόθυρου και γύρω του υπάρχουν λαξεύματα και κόγχες για την τοποθέτηση αναθημάτων από τους πιστούς, καθώς και επιγραφές χαραγμένες από άνδρες και γυναίκες προσκυνητές στο ιερό που χρονολογούνται στους ύστερους ρωμαϊκούς χρόνους. Το άντρο εκτείνεται από δυτικά προς ανατολικά σε μήκος συνολικά 62μ., ενώ το πλάτος κυμαίνεται μεταξύ 3.00-14.40μ. Αμέσως μετά την είσοδο εντοπίζεται ευρύ πλάτωμα (9.00x8.00μ.), ενώ από τα μισά σχεδόν του σπηλαίου το δάπεδο παρουσιάζει ανύψωση, όπως επίσης και κατά μήκος της νότιας πλευράς. Στην Εικ.2.1 απεικονίζεται ένα αναθηματικό ανάγλυφο που εντοπίστηκε στο σπήλαιο κατά τη διάρκεια των ανασκαφών.



Εικόνα 2.5 Αναθηματικό ανάγλυφο που απεικονίζει το χορό του Πάνα και των Νυμφών από το σπήλαιο Πάρνηθας, αρ. 1448, Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο (© Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού / Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο).

1.2. Το σπήλαιο «Νυμφόληπτου» Βάρης

Το σπήλαιο «Νυμφόληπτου» βρίσκεται στις νότιες υπώρειες του Υμηττού σε υψόμετρο 290μ. από την επιφάνεια της θάλασσας. Σώζεται σε πολύ καλή κατάσταση και η πρόσβαση σε αυτό θα πρέπει να ήταν στην αρχαιότητα σχετικά δύσκολη. Τα πρώτα ίχνη κατοίκησης στο σπήλαιο χρονολογούνται από τον 6^ο αιώνα π.Χ. ενώ κατά

το τρίτο τέταρτο του 5^{ου} αιώνα π.Χ. το σπήλαιο διαμορφώθηκε σε άντρο των Νυμφών και του Πάνα από τον Θηραίο Αρχέδημο, τον Νυμφόληπτο, κατόπιν θείκης εμπνεύσεως. Το στόμιό του σπηλαίου (4.00x2.00μ.) είναι κάθετο και ωοειδές, ενώ μία σκάλα από αδρά λαξευμένα σκαλοπάτια οδηγεί στο εσωτερικό διαστάσεων 21.00x23.75μ., ύψους 2.50μ. και βάθους 15.00μ. Στο εσωτερικό ένας ογκώδης σταλακτιτικός βράχος με διεύθυνση Α-Δ χωρίζει το σπήλαιο σε δύο θαλάμους, τον νότιο που είναι μεγαλύτερος και αρκετά φωτεινός (17.5x11.5μ.) και τον βόρειο, που είναι στενότερος, σκοτεινός και με πλούσιο σταλακτιτικό διάκοσμο (18.5x8.00μ.). Η μορφή του εσωτερικού διευκολύνει την κυκλική πορεία αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού, πρώτα στο στενό και σκοτεινό θάλαμο και έπειτα στο μεγαλύτερο θάλαμο. Ο τελευταίος ταυτίζεται με το κυρίως ιερό, όπου εντοπίζονται οι περισσότερες διαμορφώσεις, το άγαλμα μιας καθιστής θεότητας, θρανία, κόγχες για την τοποθέτηση αναθημάτων, επιγραφές και βωμοί. Κατά τη διάρκεια των ανασκαφών από την Αμερικάνικη Αρχαιολογική Σχολή στις αρχές του 20^{ου} αιώνα εντοπίστηκε στο νότιο τμήμα του θαλάμου αναλημματικός τοίχος, ο οποίος με τη συσσώρευση χωμάτων και βραχώδους υλικού θα δημιουργούσε ένα επίπεδο πλάτωμα κατάλληλο για τέλεση τελετουργικών δρώμενων [12].

3. Μεθοδολογία ακουστικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις ακουστικής πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 23-24 Νοεμβρίου 2017 από ομάδα που αποτελούσαν οι τέσσερις πρώτοι συγγραφείς της εργασίας με υποστήριξη υπαλλήλων της Εφορείας Σπηλαιολογίας και Παλαιοανθρωπολογίας. Οι σπηλιές δεν είναι προσβάσιμες από δρόμο βατό από αυτοκίνητα, είναι σχετικά από μονωμένες και προσεγγίζονται δύσκολα. Στο σπήλαιο «Λυχνοσπηλιά» φτάνει κανείς μετά από μισή ώρα περπάτημα και στο τέλος χρειάζεται να κάνει κάθετη κατάβαση περίπου 10μ. για να καταλήξει σε ένα πρόθυρο μπροστά στην είσοδο του σπηλαίου (Εικ. 3.1α). Το σπήλαιο «Νυμφόληπτου» (Εικ. 3.1β) μπορεί να προσεγγιστεί μόνο από δύσβατο χωματόδρομο μετά από ειδική άδεια για την πρόσβαση σε κλειστούς προς το κοινό δρόμους.

Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε λογαριθμικό σήμα σάρωσης ημιτόνου [13] διάρκειας $T=10\text{sec}$, με συχνότητα δειγματοληψία $f_s=44100\text{Hz}$, στάθμη ηχητικής πίεσης $\text{SPL}=88.5\text{dB}/1\text{m}$ και εύρος ζώνης $40\text{Hz}-20\text{kHz}$. Οι μετρήσεις έγιναν παράλληλα με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο και με αμφιωτική διάταξη χρησιμοποιώντας το ανδρείκελο G.R.A.S. KEMAR. Τα αυτιά του ανδρείκελου τοποθετήθηκαν σε ύψος 1.2μ. από το έδαφος, ύψος που αντιπροσωπεύει το μέσο ύψος των Ελλήνων εκείνη την εποχή, ενώ το παντοκατευθυντικό μικρόφωνο τοποθετήθηκε 15εκ. πάνω από το κεφάλι του ανδρείκελου με γωνία 45° .

Οι θέσεις πηγής δέκτη φαίνονται για τα δύο σπήλαια στις Εικόνες 3α και 3β. Η θέση της πηγής επελέγησαν βάση αρχαιολογικών στοιχείων για τις πιθανές θέσεις, όπου κάποιος μουσικός θα στεκόταν και θα έπαιζε μουσική. Αντίστοιχα, οι δέκτες τοποθετήθηκαν σε θέσεις, όπου οι συμμετέχοντες στη λατρεία θα στέκονταν ή θα χόρευαν. Ειδικά στο σπήλαιο «Νυμφόληπτου», υπάρχει μια διαδρομή που οι πιστοί ακολουθούσαν υποχρεωτικά μετά την είσοδό τους στο σπήλαιο περνώντας πρώτα από έναν σκοτεινό θάλαμο, για να εισέλθουν κατόπιν στην κεντρική φωτεινή αίθουσα του σπηλαίου. Στο σπήλαιο «Λυχνοσπηλιά» πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εννέα θέσεις και δώδεκα στο σπήλαιο «Νυμφόληπτου». Διπλές μετρήσεις λήφθηκαν, επίσης, από θέσεις, όπου η πηγή ή ο δέκτης θα μπορούσαν να παρίστανται καθήμενοι.

Στο σπήλαιο «Νυμφόληπτου» πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δεκατέσσερις αμφιωτικές μετρήσεις ακολουθώντας το μονοπάτι προς τη φωτεινή αίθουσα (Εικ. 3β μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

Δεδομένου ότι δεν υπήρχε πρόσβαση σε παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε μία φορητή γεννήτρια βενζίνης για να παράγει το απαραίτητο για τον εξοπλισμό ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή τοποθετήθηκε και στις δύο περιπτώσεις περίπου 50μ. μακριά από την είσοδο των σπηλαίων χωρίς να υπάρχει απευθείας οπτική επαφή και σε διαφορετικό υψομετρικό επίπεδο. Ο θόρυβος υποβάθρου που μετρήθηκε με τη γεννήτρια σε λειτουργία αποτυπώνεται στον Πίνακα 3.1 και η στάθμη του είναι κατάλληλη για την διεξαγωγή μετρήσεων με πολύ καλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR). Επιπλέον, η θερμοκρασία και η υγρασία και στα δύο σπήλαια ήταν σταθερές: στη «Λυχνοσπηλιά» ήταν 8°C με 55% σχετική υγρασία, ενώ στο σπήλαιο «Νυμφόληπτου» 17°C με 80% σχετική υγρασία.



(α)



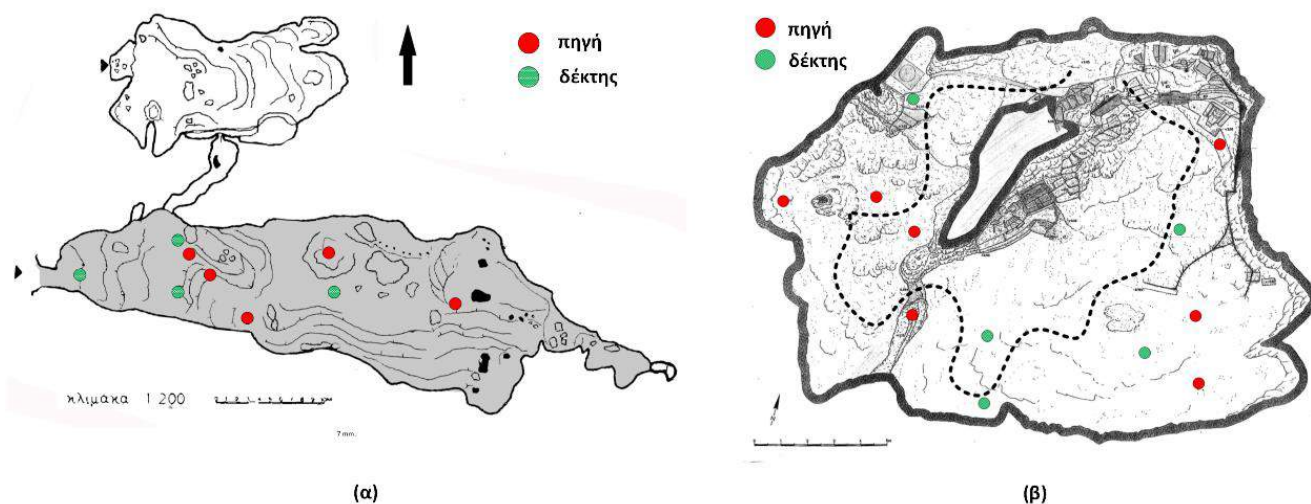
(β)

Εικόνα. 3.1 (α) Η δύσκολη πρόσβαση στο σπήλαιο «Λυχνοσπηλιά» Πάρνηθας, (β) η ερευνητική ομάδα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο σπήλαιο «Νυμφόληπτου» Βάρης.

4. Αποτελέσματα και σχόλια

Από τις μετρήσεις με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο για στις παραπάνω θέσεις υπολογίστηκε η μέση απόκριση συχνότητας και οι παράμετροι T30, C50, C80 και STI, ενώ από τις αμφιωτικές μετρήσεις υπολογίστηκε ο δείκτης IACC. Εκτός από την απόκριση συχνότητας (Εικ. 4.1 με εξομάλυνση 1/12 οκτάβας), οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίστηκαν σε περιοχές 1/3οκτάβας σύμφωνα με το ISO382 [14] με τη χρήση του λογισμικού Audacity 2.0.5 [15] και των πρόσθετων Auroraplug [16]. Ο δείκτης STI υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού WinMLS2004[17] με στάθμη αναφοράς ομιλίας 80dB/1m (σήμα λευκού θορύβου) με καμπύλη προφίλ στάθμης θορύβου υποβάθρου το NR25[18] που προέκυψε από τις μετρήσεις του Πίνακα 3.1.

Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με άλλους χώρους λατρείας: έναν μεγάλο ορθόδοξο ναό (I.N. Αγίου Ανδρέα, Πάτρα), έναν μικρό ορθόδοξο ναό (I.N. Κοιμήσεως Θεοτόκου, Κομοτηνή) και ένα τζαμί (Γιενί Τζαμί, Κομοτηνή), χώροι στους οποίους έχει πραγματοποιήσει αντίστοιχες μετρήσεις η ομάδα στο παρελθόν [19]. Το τζαμί και ο ναός επελέγησαν λόγω του παρόμοιου όγκου τους σε σύγκριση με τα σπήλαια. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων αυτών χώρων και ο ιδανικός χρόνος αντήχησης (RT_{ref}) ανάλογα με τη χρήση τους, όπως επίσης και ο καταγεγραμμένος χρόνος αντήχησης (RT_{meas}).



Εικόνα 3.2. Κατόψεις των σπηλαίων με τις θέσεις των μετρήσεων (α) στη «Λυχνοσπηλιά» Πάρνηθας και (β) στο «Νυμφόληπτος» Βάρης.

Πίνακας 3.1 Στάθμη ηχητικής πίεσης για τον θόρυβο υποβάθρου στα δύο σπήλαια.

Σπήλαιο	Θόρυβος υποβάθρου dB(A)
Λυχνοσπηλιά	26.6
Νυμφόληπτος	22.8

Πίνακας 4.1 Ιστορικά και ακουστικά χαρακτηριστικά των χώρων.

Τοποθεσία	Χρονολογία	Όγκος (m^3)	$RT_{ref}(s)$	$RT_{meas}(s)$
Λυχνοσπηλιά	5 ^ο -4 ^ο αι. π.Χ.	2250	2.0-3.0	1.0
Νυμφόληπτος	5 ^ο -4 ^ο αι. π.Χ.	2100	2.0-3.0	1.1
Άγιος Ανδρέας	1970	143520	6.0-10.0	5.5
Κοίμηση Θεοτόκου	1580	1520	1.8-2.6	0.9
Γιενί Τζαμί	1580	950	1.7-2.5	1.8

Η απόκριση συχνότητας και στα δύο σπήλαια (Εικ. 4.1) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την παρουσία κάποιων μικρών συντονισμών στις χαμηλές συχνότητες, επίπεδη απόκριση στην περιοχή του 1kHz, μικρή εξασθένηση περίπου

στα 2kHz και ομαλή εξασθένιση στις υψηλές συχνότητες. Γενικά, οι αποκρίσεις φαίνονται ισορροπημένες και κυριαρχεί η συμπεριφορά διάχυτου ακουστικού πεδίου στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Ο χρόνος αντήχησης στα σπήλαια είναι ιδανικός για τη μετάδοση ομιλίας (Εικ.4.2). Ο ελαφρύς τονισμός στις χαμηλές συχνότητες προσφέρει ένα «ζεστό» ηχητικό αποτέλεσμα, ενώ οι τιμές 0.9sec με 1.3sec στη μεσαία περιοχή προσδίδουν διαύγεια στη μετάδοση ομιλίας. Συγκριτικά, ο πρόσφατα κατασκευασμένος ναός του Αγίου Ανδρέα και το τζαμί παρουσιάζουν αύξηση του χρόνου αντήχησης στη μεσαία περιοχή συχνοτήτων.

Οι δείκτες της διαύγειας για την ομιλία C50 (Εικ. 4.3) και τη μουσική C80 (Εικ. 4.4) για τα σπήλαια παρουσιάζουν αποδεκτές τιμές (μεγαλύτερες από 0dB) σχεδόν από τα 200Hz και πάνω, σε αντίθεση με τον ναό Κοιμήσεως Θεοτόκου και το Γενί Τζαμί, όπου οι αποδεκτές τιμές ξεκινάνε περίπου από τα 400Hz. Τέλος ο ναός του Αγίου Ανδρέα παρουσιάζει ξεκάθαρα ακατάλληλες τιμές του δείκτη.

Ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας STI (Εικ. 4.5) των σπηλαίων υποδεικνύει καλή έως άριστη καταληπτότητα. Σε αντίθεση, οι σύγχρονοι χώροι λατρείας, όπως ο μικρός ναός και το τζαμί, παρουσιάζουν αποδεκτές τιμές, ενώ ο ναός του Αγίου Ανδρέα παρουσιάζει τιμές κάτω από το αποδεκτό όριο 0.5.

Ο δείκτης IACC (Εικ. 4.6) για τους διάφορους χώρους υπολογίστηκε από τις αμφιοτικές μετρήσεις. Οι τιμές του δείκτη δείχνουν ότι σε όλους τους χώρους κυριαρχεί το διάχυτο ακουστικό πεδίο για συχνότητες πάνω από τα 400Hz. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει μία αυξημένη αίσθηση του χώρου στους ακροατές.

5. Συμπεράσματα

Υπερβαίνοντας τις δυσκολίες προσέγγισης των σπηλαίων, για πρώτη φορά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ακουστικής σε δύο σπήλαια με ενδείξεις για την λατρεία του Πάνα και των Νυμφών στην αρχαία Ελλάδα.

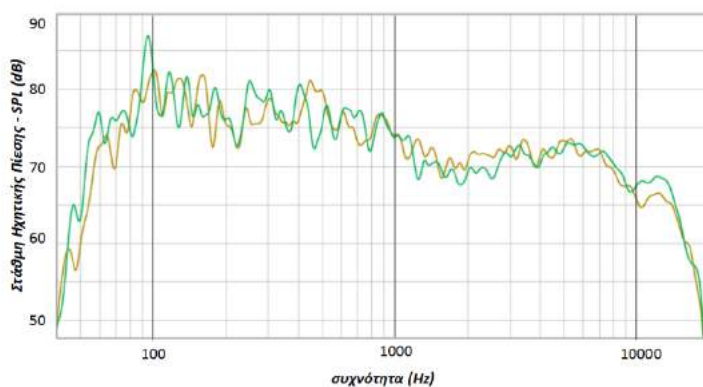
Πέρα από την ησυχία και την απομόνωση που χαρακτηρίζουν αυτούς τους χώρους, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα σπήλαια παρουσιάζουν χαμηλή αντήχηση σχετικά με τον όγκο τους, πολύ καλή διαύγεια για μετάδοση ομιλίας και μουσικής επιτυγχάνοντας παράλληλα πολύ καλή καταληπτότητα τουλάχιστον στις θέσεις, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις σύμφωνα με τις ενδείξεις των αρχαιολόγων. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι παρόλη τη σχετικά χαμηλή αντήχηση, η αίσθηση του περιβάλλοντος χώρου και της διάχυσης είναι επίσης έντονη και προσομοιάζει αυτήν των πιο σύγχρονων λατρευτικών χώρων, οι οποίοι όμως εμφανίζουν υψηλή αντήχηση και συχνά χαμηλή διαύγεια και καταληπτότητα. Όπως γίνεται φανερό, η ακουστική συμπεριφορά αυτών των χώρων είναι καλύτερη σε σχέση με νεότερους χώρους λατρείας αντίστοιχου όγκου.

Ως μελλοντική εργασία, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν θα γίνουν διαθέσιμες σε δημόσιες βάσεις δεδομένων [21] και θα συγκριθούν με άλλους χώρους λατρείας [19]. Επίσης, θα δημιουργηθούν δείγματα εικονικών ακρόασεων μουσικής και λόγου [22] και θα πραγματοποιηθούν υποκειμενικά τεστ ακρόασης για την προτίμηση του κοινού σε τέτοιους χώρους λατρείας σε αρχαίους και νεότερους χρόνους.

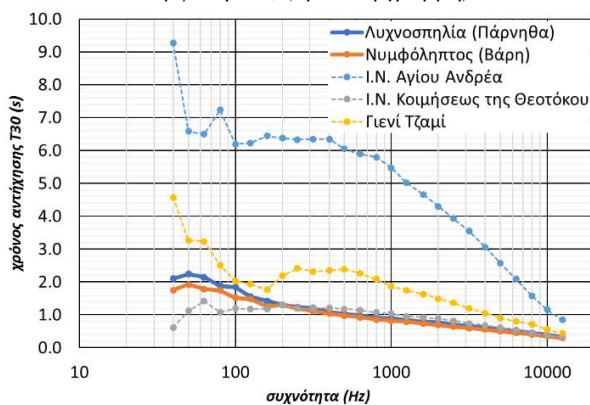
Ευχαριστίες

Η άδεια πρόσβασης στα σπήλαια με σκοπό τη λήψη μετρήσεων δόθηκε από την Εφορεία Σπηλαιολογίας και Παλαιοανθρωπολογίας και το Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού. Ευχαριστούμε, επίσης, το Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, την αρχαιολόγο κα Αλεξάνδρα Μαρή και τους υπαλλήλους του Υπουργείου Πολιτισμού κ. Χαράλαμπο Μπουγάδη και κ. Αλέξανδρο Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθεια τους.

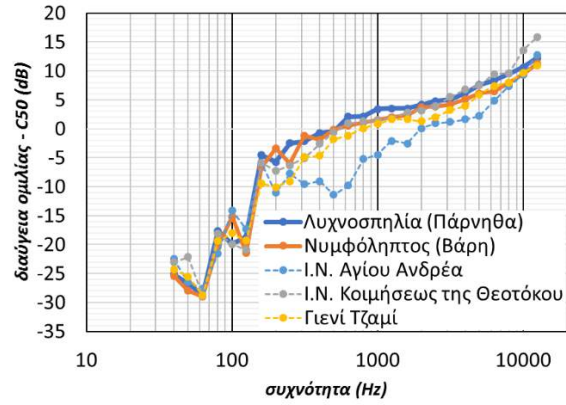
Ο κ. Κωνσταντίνος Καλέρης ευχαριστεί την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την υποστήριξη αυτής της ερευνητικής εργασίας



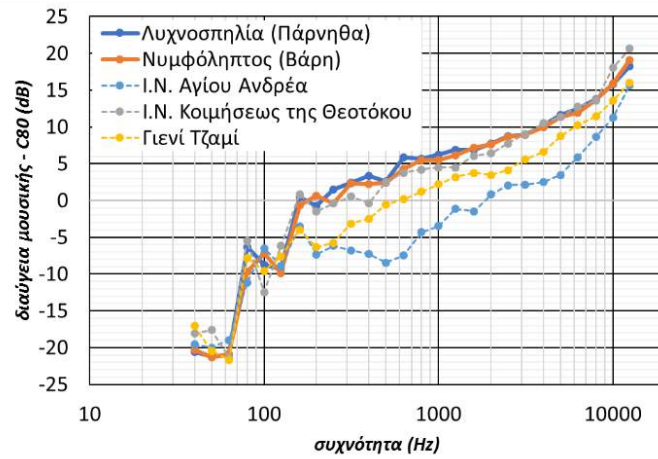
Εικόνα 4.1 Απόκριση συχνότητας στα δύο σπήλαια. Λυχνοσπηλιά (καφέ γραμμή) Νυμφόληπτος (πράσινη γραμμή).



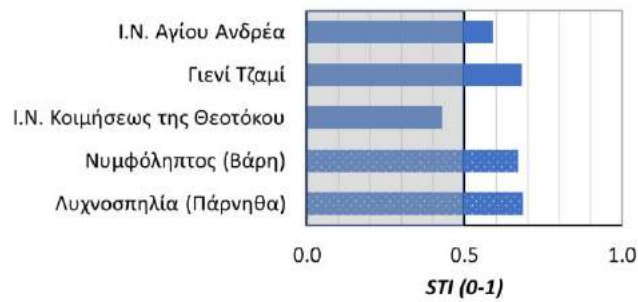
Εικόνα 4.2 Ο χρόνος αντήχησης των δύο σπηλαίων συγκρινόμενος με άλλους χώρους λατρείας.



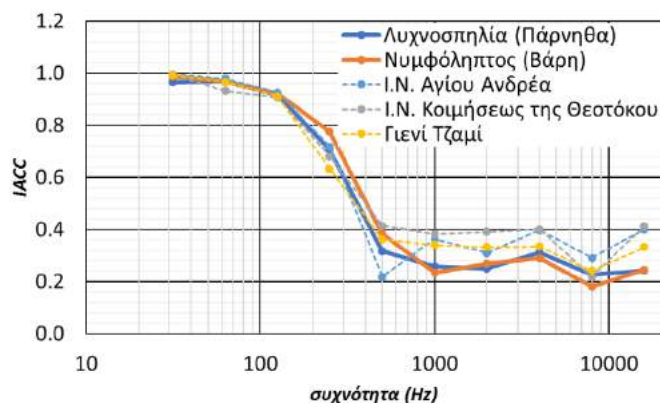
Εικόνα 4.3 Η διαύγεια για ομιλία των δύο σπηλαίων συγκρινόμενη με άλλους χώρους λατρείας.



Εικόνα 4.4 Η διαύγεια για μουσική των δύο σπηλαίων συγκρινόμενη με άλλους χώρους λατρείας.



Εικόνα 4.5 Ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας των δύο σπηλαίων συγκρινόμενος με άλλους χώρους λατρείας.



Εικόνα 4.6 Ο δείκτης IACC των δύο σπηλαίων συγκρινόμενος με άλλους χώρους λατρείας.

6. Αναφορές

- [1] A. Synnott, "Puzzling over the Senses: From Plato to Marx, σε: D. Howes (Ed.), *The varieties of sensory experience, A sourcebook in the Anthropology of the Senses*", Toronto, Buffalo, London: University of Toronto Press, 61-76 (1991).
- [2] C. Scarre, G. Lawson, *Archaeoacoustics*, Cambridge: McDonald Institute for Archaeological Research (2006)
- [3] L. Eneix, E.B.W. Zubrow (Eds.), *Archaeoacoustics. The archaeology of sound*", Proceedings from the Conference in Malta, Florida: OTS Foundation (2014).
- [4] L. Eneix, F. Coimbra (Eds.), *Archaeoacoustics II. The archaeology of sound*", Publication of proceedings from the 2015 Conference in Istanbul, Florida: OTS Foundation (2016).
- [5] Fazenda, Bruno, et al. "Cave acoustics in prehistory: Exploring the association of Paleolithic visual motifs and acoustic response." *The Journal of the Acoustical Society of America* 142.3, 1332-1349 (2017).
- [6] G. Lawson, C. Scarre, I. Cross, C. Hills, "Mounds, megaliths, music and mind: some thoughts on the acoustical properties and purposes of archaeological spaces", *Archaeological Review from Cambridge* 15, 111-134 (1998).
- [7] R.M. Schafer, *Soundscape, Our Sonic Environment and the Tuning of the World. Rochester*", Vermont: Destiny Books (1977).
- [8] P. Borgeaud, *The Cult of Pan in Ancient Greece*", K. Atlass, J. Redeld (trans.), Chicago: University of Chicago Press (1988).
- [9] N. Pierce, *The archaeology of sacred caves in Attica*", Greece, PhD, Canada: Mc Master University (2006).
- [10] J.M. Wickens, *The archaeology and history of cave use in Attica, Greece from prehistoric through late roman times*", Vol I,II, Ph.D., Indiana University (1986).
- [11] Α. Σκιάς "Τό παρά την Φυλήν άντρον τοϋ Πανός κατά τας ανασκαφάς τών έτων 1900 και 1901", *ΑΕφημ* 57, 1-28 (1918).
- [12] C. Weller, "The cave at Vari", *AJA* VII, 263-288 (1903).

- [13] Farina, Angelo. "Advancements in impulse response measurements by sine sweeps." AES Convention 122 (2007)
- [14] ISO3382 - Acoustics Measurement of room acoustic parameters
- [15] Team, Audacity. "Audacity (Version 2.0.5)" Audio editor and recorder (2013).
- [16] Campanini, S., and A. Farina. "A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module", Parma, Italy, paper B 2 (2009).
- [17] Morset Sound Development - WinMLS2004, <http://www.nvo.com>.
- [18] ISO 1996-1:2016 - Acoustics Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures
- [19] G. Kamaris, F. Kontomichos, Ch. Papadakos, A.N. Tatlas, St. Potirakis, J Mourjopoulos, "Comparison of the acoustics for orthodox churches", presented at HELINA 2016, Piraeus, Greece.
- [20] Brown, Kenneth, Matthew Paradis, and Damian Murphy. "OpenAirLib: A JavaScript Library for the Acoustics of Spaces" AES Convention 142(2017).
- [21] S. Vassilantonopoulos and J. Mourjopoulos, "Virtual acoustic reconstruction of ritual and public spaces of Ancient Greece", *Acta Acoustica united with Acustica*, 87 (5), 604-609 (2001).

Ακουστική μοντελοποίηση του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου

Κωνσταντίνος Καλέρης
Υποψήφιος Διδάκτορας
kkaleris@upnet.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Υποψήφιος Διδάκτορας
gpkamaris@upatras.gr

Γεώργιος Μουράγιας
Προπτυχιακός Φοιτητής
ece7846@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής
mourjop@upatras.gr

Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας,
Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα από υπολογιστικές εξομοιώσεις του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου βασισμένες σε κυματικές εξισώσεις διάδοσης του ήχου, που επιτρέπουν την αποτίμηση διαδρομών πολλαπλών ανακλάσεων και περιθλάσεων. Η μελέτη βασίζεται πάνω σε δύο τρισδιάστατα μοντέλα (με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας της γεωμετρίας), οι παράμετροι των οποίων προσαρμόστηκαν σε υπάρχουσες μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων του θεάτρου. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη συμβολή του περιθλώμενου ήχου στην καλή ακουστική του θεάτρου, καθώς προκύπτει πως μέσω του συγκεκριμένου μηχανισμού διάδοσης ενισχύεται σημαντικά η ακουστική ενέργεια στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, βελτιώνοντας την καταληπτότητα της ομιλίας ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι αποτιμήσεις της ακουστικής του θεάτρου για διαφορετικές κλίσεις των δύο διαζωμάτων και μελετώνται οι επιπτώσεις της αλλαγής της γεωμετρίας στην ακουστική απόδοση. Τέλος, μέσω των εξομοιώσεων αναδεικνύεται η αρνητική επίδραση που έχει η προσθήκη υφασμάτων καθισμάτων (μαξιλάρια) στις πρώτες σειρές του κάτω διαζώματος.

Wave-based acoustic model of the Epidaurus theatre

ABSTRACT

In this work, new results are presented from wave-based simulations of the acoustics of the ancient theatre of Epidaurus, enabling the evaluation of paths with multiple reflections and diffractions. The study is based on two 3D models with different levels of geometrical detail. The parameters of the models were calibrated in accordance with existing measurements of the theatre's impulse response in different auditory positions. The analysis highlights the contribution of diffracted sound in the theatre's excellent acoustic performance, since diffracted paths appear to boost the mid-low frequencies, enhancing speech intelligibility, especially in the most remote auditory positions. It also becomes evident that the acoustic response of the middle auditory positions is the result of two distinct sound fields, one

reaching the listener from the front (ascending field) and one from behind (descending field). Moreover, evaluations with different step geometries (leading to different tier inclinations) are carried out, showing the impact of the tier geometry to the theatre's acoustic performance. Finally, it is shown that the placement of pillows in the front seating positions has a degenerative effect on the theatre's acoustics.

Εισαγωγή

Το θέατρο της Επιδαύρου αποτελεί το καλύτερα διατηρημένο αρχαίο θέατρο της κλασικής αρχαιότητας στον ελλαδικό χώρο ενώ είναι φημισμένο για την εξαιρετική ακουστική του, επιτρέποντας άριστη καταληπτότητα ομιλίας σε κοινό έως 14.500 άτομα. Οι ακουστικές ιδιότητες του θεάτρου αποτελούν αντικείμενο έρευνας εδώ και δεκαετίες [1,2]. Πληθώρα μετρήσεων έχουν επιβεβαιώσει την εξαιρετική ακουστική του ακόμα και στις πιο απομακρυσμένες θέσεις, όπου η απόσταση από την ορχήστρα φτάνει τα 60 μέτρα [3]. Η καταληπτότητα, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες ακρόασης και κυρίως τον θόρυβο υποβάθρου, έχει αξιολογηθεί - υπό την προϋπόθεση φυσιολογικών επιπέδων θρύβου (35dB) - ως ικανοποιητική σε όλες τις θέσεις του κοίλου ακόμα και για ιδιαίτερα σιγαλή ομιλία (60-65dB). Αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν προκύψει από πρώιμες υπολογιστικές ακουστικές εξομοιώσεις [4], ενώ σημαντική πρόοδος στην κατανόηση των μηχανισμών διάδοσης του ήχου στο θέατρο έχει συντελεστεί μέσα από τις εργασίες των Declercq and Dekeyser [5], Farnetani et al. [6], Lokki et al. [7] and Psarras and Kountouras [8]. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση των Ψαρρά και Κουντουρά, ότι η καταληπτότητα της ομιλίας υποβαθμίζεται σημαντικά όταν στις θέσεις του πρώτου διαζώματος τοποθετούνται πλαστικά μαξιλάρια καθισμάτων, τα οποία καλύπτουν τις μαρμάρινες ακμές των σειρών του διαζώματος. Μάλιστα, η παρατήρηση έρχεται να συμπληρώσει ένα σχόλιο του Βιτρούβιου [9] για την ακουστική του θεάτρου: «[...] το ηχητικό κύμα [θα πρέπει] να αγγίζει τις ακμές των εδωλίων και να φτάνει στους ακροατές του επάνω τμήματος ανεμπόδιστα ούτως ώστε οι καταλήξεις των λέξεων να ακούγονται καθαρά...». Τα στοιχεία αυτά υποδείκνυαν την σημασία της περίθλασης του ήχου στην καλή ακουστική του θεάτρου, όμως τα έως τώρα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία που βασίζονταν σε ray tracing και image source αλγορίθμους αδυνατούσαν να την επιβεβαιώσουν. Στην παρούσα εργασία η ακουστική του θεάτρου μελετάται μέσα από υπολογιστικές εξομοιώσεις βασισμένες σε κυματικές εξισώσεις διάδοσης του ήχου που επιτρέπουν την αξιολόγηση της περίθλασης. Από την μελέτη προκύπτουν σαφή αποτελέσματα που αναδεικνύουν τη σημασία της περίθλασης στην ακουστική απόδοση του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου και κατ' επέκτασιν, σε ανοιχτούς χώρους ακρόασης αντίστοιχης αρχιτεκτονικής.

1. Περιγραφή του ηχητικού πεδίου

Από προηγούμενες εργασίες [5-7,9-10] είναι εμφανές ότι το ηχητικό πεδίο των ανοιχτών θεάτρων δημιουργείται από τον συνδυασμό διάφορων μηχανισμών διάδοσης των ηχητικών κυμάτων. Οι διαδρομές που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι:

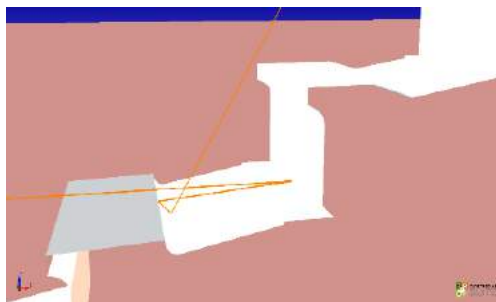
- Ανακλώμενες διαδρομές (r) λόγω ανακλάσεων διαφόρων τάξεων

- Ανακλώμενες και περιθλώμενες διαδρομές (d) από ένα σημείο περίθλασης (rd1)
- Ανακλώμενες και περιθλώμενες διαδρομές από δύο και πάνω σημεία περίθλασης στην ίδια διαδρομή (rd2)
- Ανακλώμενες, περιθλώμενες και περιθλώμενες - ανακλώμενες διαδρομές με ένα μόνο σημείο ανάκλασης ανάμεσα σε δύο σημεία περίθλασης (rd2b1)

Επιπλέον, οι διαδρομές αυτές διαχωρίζονται με βάση την κατεύθυνση άφιξης τους σε διαδρομές που φτάνουν στον ακροατή α) από μπροστά (ανιούσες διαδρομές) και β) από πίσω (κατιούσες διαδρομές).

2. Υλοποίηση υπολογιστικού μοντέλου

Το μοντέλο του θεάτρου σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα ακουστικών εξομοιώσεων Olive Tree Lab (OTL) [11]. Για τον υπολογισμό της Κρουστικής Απόκρισης μιας γεωμετρίας, το OTL χρησιμοποιεί μιγαδική συχνотική αναπαράσταση του σήματος πηγής με παραμετροποιημένο δείκτη δειγματοληψίας και ανάλυση συχνότητας. Η κυματική ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της περίθλασης του ήχου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν δύο τρισδιάστατες εκδοχές του θεάτρου με διαφορετικό επίπεδο λεπτομέρειας: α) ένα απλοποιημένο μοντέλο, στο οποίο αγνοήθηκαν οι γεωμετρικές λεπτομέρειες του καθίσματος (το κάθισμα έχει παραλληλεπίπεδο σχήμα) και β) ένα αναλυτικό μοντέλο με το ακριβές προφίλ του καθίσματος, που περιλαμβάνει την κοίλη επιφάνεια κάτω από την άκρη του καθίσματος και τα δύο διαφορετικά επίπεδα στην επάνω πλευρά του, βλ. Σχ. 2.



Σχ. 2. Προφίλ σειράς του λεπτομερούς μοντέλου, που δείχνει τους σύνθετους μηχανισμούς διάδοσης που λαμβάνουν χώρα στην κοιλότητα του εδωλίου

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε δισδιάστατη προσέγγιση, όπου η κοιλότητα του θεάτρου αντικαταστάθηκε από μια λωρίδα ίσων καθισμάτων, θεωρώντας μόνο οριζόντιες και κάθετες αποστάσεις από την πηγή και αγνοώντας τη διάδοση στο επίπεδο xy . Σημειώνεται ότι σε αυτήν την περίπτωση, το πεδίο εκπομπής της πηγής από σφαιρικό γίνεται κυλινδρικό. Στην παρούσα μελέτη ο μετασχηματισμός δεν είναι απαραίτητος, λόγω συμμετρίας, καθώς η πηγή είναι τοποθετημένη ακριβώς στο μέσο της ορχήστρας. Οι αποκρίσεις υπολογίσθηκαν σε τέσσερις θέσεις με τις εξής αποστάσεις από την πηγή:

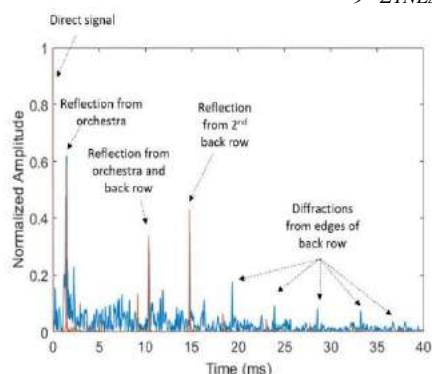
Διάζωμα	Θέση	Συντεταγμένες x, y (m)	Απόσταση (m)
κάτω	R1	15.30, 1.15	15.34
	R2	29.70, 7.53	30.67
άνω	R3	48.10, 17.15	51.06
	R4	57.50, 23.30	62.04

Η πηγή (ομιλητής) τοποθετήθηκε αρχικά σε απόσταση 12,68m από την πρώτη σειρά και ύψος 1,485m. Η ακριβής θέση της, όπως και των δεκτών και άλλες μικρολεπτομέρειες της γεωμετρίας του μοντέλου επιλέχθηκαν με βάση τις αποκρίσεις που μετρήθηκαν στο []. Για την ακριβή συμφωνία του μοντέλου με τις μετρήσεις απαιτήθηκε μετακίνηση του δέκτη λίγων εκατοστών στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα. Ως εικονική πηγή ήχου, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “man shouting” της βιβλιοθήκης του OTL. Για την αποτίμηση της επίδρασης της στάθμης του ομιλητή και του θορύβου του περιβάλλοντος στην καταληπτότητα της ομιλίας, μελετήθηκαν τέσσερις στάθμες 86, 70, 65 και 60 dB-SPL / 1m. Η καταληπτότητα της ομιλίας μελετήθηκε μέσω του δείκτη Speech Transmission Index (STI), όπου εφαρμόστηκε προφίλ θορύβου σύμφωνα με τον πρότυπο NR-35. Οι ακουστικές αποκρίσεις του θεάτρου στις διάφορες θέσεις των ακροατών υπολογίστηκαν στην προσομοίωση λαμβάνοντας υπόψιν τις 60 ισχυρότερες διαδρομές αφού διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη περισσότερων διαδρομών δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα.

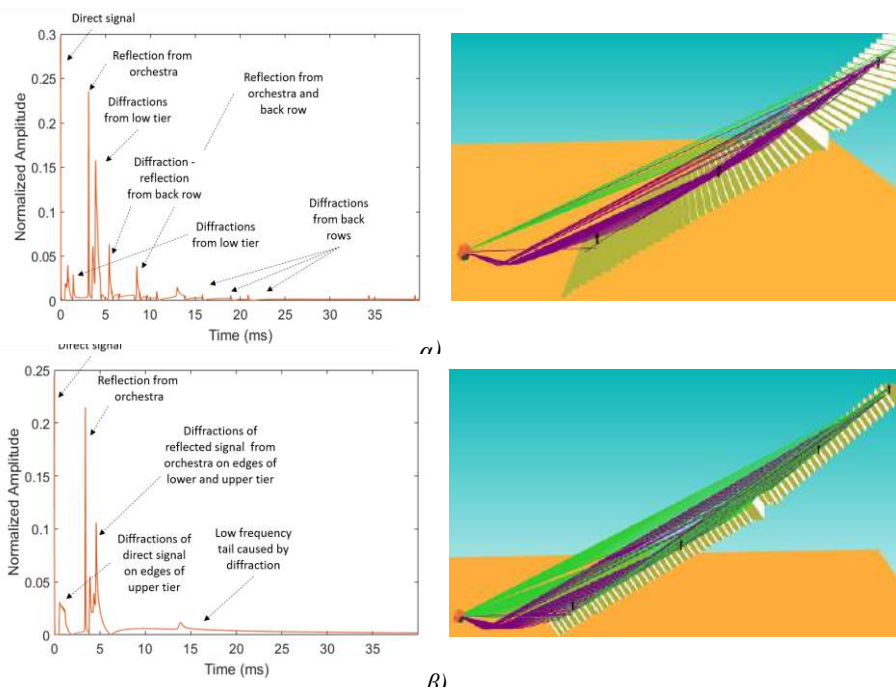
3. Αποτελέσματα

3.1 Αποτίμηση στο πεδίο του χρόνου

Οι κρουστικές αποκρίσεις που παρουσιάζονται εδώ υπολογίστηκαν από το απλοποιημένο μοντέλο, για λόγους μείωσης της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Σημειώνεται ότι στο λεπτομερές μοντέλο εμφανίζονται κάποιοι επιπλέον μηχανισμοί διάδοσης, όπως αυτός του Σχ.2, ο ρόλος των οποίων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στο Σχ.3.1 παρουσιάζεται η κρουστική απόκριση στην θέση R1, όπως προκύπτει από την εξομοίωση και την μέτρηση αντίστοιχα. Στο Σχ.3.2α απεικονίζεται η κρουστική απόκριση και οι διαδρομές του ήχου για τη θέση R7. Είναι προφανές ότι για τις θέσεις ακρόασης του άνω



Σχ. 3.2: Κρουστική απόκριση για την θέση R1 όπως προέκυψε από την εξομοίωση (κόκκινο) και την μέτρηση (μπλέ).



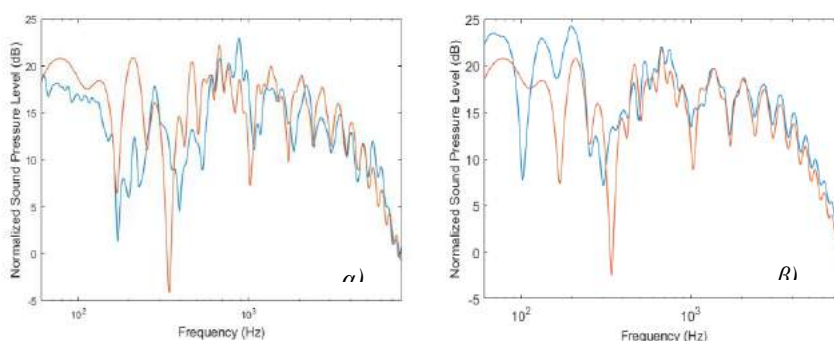
Σχ. 3.2: Κρουστική απόκριση και διαδρομές διάδοσης ήχου για τις θέσεις α) R7 και β) R10.

διαζώματος, η περιθλώμενη ενέργεια καταφτάνει σε συντομότερο χρονικό διάστημα μετά το απευθείας σήμα, σε σχέση με τις θέσεις του κάτω διαζώματος. Η τέταρτη διαδρομή δημιουργείται από περίθλαση στην άρκη των δύο καθισμάτων πίσω από τον ακροατή, ενώ η πέμπτη διαδρομή είναι ανάκλαση από την πλάτη του καθισματος του ακροατή. Επίσης, αμέσως μετά την ανάκλαση από την ορχήστρα παρατηρείται ακόμα μία κορυφή στην κρουστική, η οποία διαφέρει από τις κορυφές που οφείλονται σε ανακλώμενες ή περιθλώμενες διαδρομές στο ότι η ενέργειά της εκτείνεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το σήμα αυτό σχηματίζεται από την

υπέρθυση πολλαπλών περιθλάσεων από διαφορετικές άκρες καθισμάτων, οι οποίες όμως διανύουν σχεδόν την ίδια απόσταση μέχρι να φτάσουν στον ακροατή. Τέτοιες διαδρομές θεωρείται ότι παίζουν καταλυτικό ρόλο στην καλή καταληπτότητα του θεάτρου, ειδικά για τις πιο απομακρυσμένες θέσεις στο άνω διάζωμα. Στην τελευταία θέση (R10), δύο ισχυρά μέτωπα κύματος σχηματίζονται από τον περιθλώμενο ήχο, το πρώτο φτάνει ένα millisecond μετά το απευθείας σήμα και το δεύτερο ένα millisecond μετά την ανάκλαση από την ορχήστρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Το πρώτο μέτωπο δημιουργείται από ανιούσες περιθλάσεις του απευθείας σήματος, ενώ το δεύτερο από ανιούσες περιθλάσεις της ανάκλασης στην ορχήστρα. Στη δεύτερη περίπτωση, η υπέρθεση των περιθλάσεων φαίνεται να οδηγεί στη δημιουργία μιας ουράς με διάρκεια μεγαλύτερη από 30ms, η οποία φέρει σημαντική ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες. Η ενίσχυση αυτή σχετίζεται πιθανώς με τη βελτίωση του STI στις πλέον απομακρυσμένες θέσεις του θεάτρου.

3.2 Αποτίμηση στο πεδίο της συχνότητας

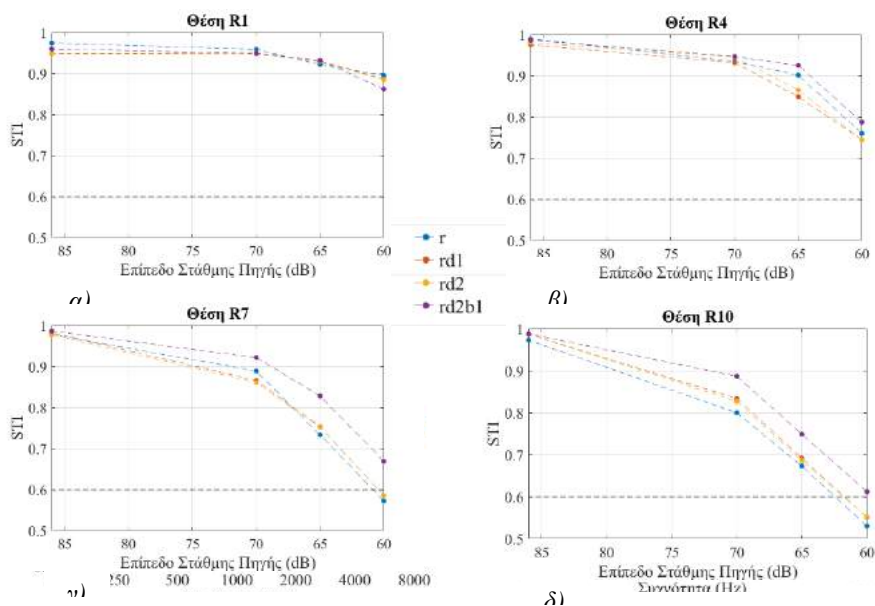
Από τις εκτιμώμενες κρουστικές αποκρίσεις υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα φάσματα, όπου το φάσμα για τη θέση R1 απεικονίζεται στο Σχ. 3.3α σε σύγκριση με το σχετικό φάσμα όπως προκύπτει από την μέτρηση (βλ. Παρ. 3.1). Η προσαρμογή του υπολογισμένου φάσματος στο μετρημένο επετεύχθη με την κατάλληλη επιλογή συντελεστών απορρόφησης για τα υλικά των επιφανειών της ορχήστρας και των καθισμάτων στο μοντέλο. Μέσω των εξομοιώσεων διαφορετικής ακρίβειας μπορεί να προσδιοριστεί η φασματική συνεισφορά των ανακλώμενων και περιθλώμενων διαδρομών όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 7β για τους μηχανισμούς r και $rd2b1$. Είναι εμφανές ότι οι περιθλώμενες συνιστώσες ενισχύουν το φασματικό περιεχόμενο στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό το SNR και και το STI (βλ. Παρ. 3.3).



Σχήμα 3.3. Φάσματα υπολογισμένα από α) προσομοίωση r (κόκκινο) και μετρήσεις (μπλε) και β) προσομοίωση r (κόκκινο) και $rd2b1$ (μπλε)

3.3 Αξιολόγηση καταληπτότητας μέσω του δείκτη STI

Στο Σχήμα 3.4, παρουσιάζονται οι τιμές του STI για προφίλ θορύβου NR-35, όπως υπολογίστηκαν από τις εξομοιωμένες κρουστικές αποκρίσεις στις 4 θέσεις ακρόασης, για τα διάφορα επίπεδα στάθμης του ομιλητή. Για κάθε θέση, υπολογίστηκε η τιμή του STI με όλα τα επίπεδα ακρίβειας της εξομοίωσης (βλ. Ενότητα 1). Τα αποτελέσματα δείχνουν την μη αμελητέα συνεισφορά της περιθλάσης στην καταληπτότητα της ομιλίας, ειδικά για τις πιο απομακρυσμένες θέσεις και για τις λιγότερο ισχυρές στάθμες ομιλητή. Οι περιθλώμενες διαδρομές προκύπτουν από το απευθείας σήμα ή τις ανακλάσεις στην ορχήστρα, οι οποίες δημιουργούν ανιούσες περιθλάσεις στις αιχμές των καθισμάτων. Ο περιθλώμενος ήχος δεν επηρεάζει σημαντικά την καταληπτότητα στις θέσεις ακρόασης που βρίσκονται κοντά στην πηγή, αφού εκεί το απευθείας σήμα και οι ανακλάσεις είναι πολύ ισχυρές και ουσιαστικά καθορίζουν το ηχητικό πεδίο (βλ. Σχήμα 3.4α,3.4β). Αντιθέτως στις απομακρυσμένες θέσεις, ο περιθλώμενος ήχος εμφανίζεται να επηρεάζει θετικά την καταληπτότητα, ειδικά για τα πιο αδύναμα σήματα ομιλίας στις χαμηλές συχνότητες με αύξηση ακόμα και 10% του συνολικού STI (βλ. Σχήμα 3.4γ,3.4δ). Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, η περιθλάση οδηγεί σε αποδεκτή καταληπτότητα, ανεβάζοντας τον δείκτη STI πάνω από το κατώφλι του 0,6.



Σχήμα 3.4. STI για τους διάφορους μηχανισμούς διάδοσης ήχου συναρτήσει της ηχητικής στάθμης για τις θέσεις α) R1, β) R4, γ) R7, δ) R10. Σημειώνεται το όριο καλής ακουστότητας (γκρι διακεκομμένο)

Το STI στη θέση R10 ανά συχνотική ζώνη οκτάβας που έχει εξαχθεί από τις κρουστικές αποκρίσεις τόσο για τις κρουστικές r όσο και για τις κρουστικές rd2b1 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5 για δύο επίπεδα στάθμης. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχει η κατεύθυνση άφιξης των περιθλώμενων διαδρομών. Για τις χαμηλότερες

θέσεις του κάτω διαζώματος πολλαπλές περιθλώμενες διαδρομές από τις γωνίες των καθισμάτων πίσω από τον ακροατή σχηματίζουν ένα κατιόν ηχητικό πεδίο, ενώ για τις υψηλότερες θέσεις του άνω διαζώματος σχηματίζουν ένα χαμηλής συχνότητας ηχητικό πεδίο που φτάνει στον ακροατή σχεδόν αμέσως μετά τις ανακλάσεις από την ορχήστρα, χάρη στην απότομη κλίση του άνω διαζώματος.

Ευχαριστίες

Ο κ. Κωνσταντίνος Καλέρης ευχαριστεί την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την υποστήριξη αυτής της ερευνητικής εργασίας.

4. Αναφορές

- [1] F. Canac, “L’acoustique des théâtres antiques”, published by the CNRS, Paris, 1967.
- [2] R. Shankland, “Acoustics of Greek theatres”, *Physics Today*, pp.30-35, 1973.
- [3] S. L.Vassilantonopoulos, J. N. Mourjopoulos, “A Study of Ancient and Roman Theater Acoustics”, *Acta Acustica united with Acustica*, 89, 2002.
- [4] S. Vassilantonopoulos, T. Zakyntinos, P. Hatziantoniou, N-A. Tatlas, D. Skarlatos, J. Mourjopoulos, “Measurement and Analysis of Acoustics of Epidaurus Theatre”, *Hellenic Institute of Acoustics Conference (in Greek)*, Thessaloniki, 2004.
- [5] N.F. Declercq, C.S. Dekeyser, “Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheatre of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvellous acoustics”, *J.Acoust.Soc.Am.* 121(4), 2007.
- [6] A. Farnetani, N. Prodi, R. Pompoli, “On the acoustics of ancient Greek and Roman theatres”, *J.Acoust.Soc.Am.* 124 (3), 2008.
- [7] T. Lokki, A. Southern, S. Siltanen, L. Savioja, “Studies of Epidaurus with a hybrid room acoustics modelling method”, *The Acoustics of Ancient Theatres Conference*, Patras, 2011.
- [8] S. Psarras, M. Kountouras, “Acoustic and environmental parameter measurements in Epidaurus ancient theatre”, *The Acoustics of Ancient Theatres Conference*, 2011.
- [9] K. Chourmouziadou and J. Kang, “Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres”, *Applied Acoustics* 69, 514-529, 2008.
- [10] A. Farnetani, N. Prodi, P.Fausti, “Validation of a numerical code for the edge diffraction by means of acoustical measurements on a scale model of an ancient theatre”, *The Acoustics of Ancient Theatres Conference*, 2011.

***Ασύρματο Δίκτυο Ακουστικών Αισθητήρων στο
Ερευνητικό Πρόγραμμα STORM για Επιστασία
Αρχαιολογικών Χώρων και Χώρων Πολιτιστικής
Κληρονομιάς***

Νικόλας-Αλέξανδρος Τάτλας¹, Στέλιος Μ. Ποτηράκης², Στέλιος Α. Μυτιληναίος³,
Μαρία Ραγκούση⁴

Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω
1ntatlas@uniwa.gr, 2spoti@uniwa.gr, 3smitil@uniwa.gr, 4mariar@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ερευνητικό έργο STORM στοχεύει στην παροχή κρίσιμων εργαλείων λήψης αποφάσεων σε όλους τους φορείς της ευρωπαϊκής πολιτιστικής κληρονομιάς που είναι επιφορτισμένοι με την αντιμετώπιση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και των φυσικών κινδύνων. Στο πλαίσιο αυτό και με στόχο την ενίσχυση της προστασίας μνημείων και αρχαιολογικών χώρων, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε δίκτυο ασύρματων ακουστικών αισθητήρων. Στην εργασία παρουσιάζεται το υλικό και το ενσωματωμένο λογισμικό του αισθητήρα ενώ παρατίθεται προκαταρκτικά αποτελέσματα σχετικά με την πιστότητα των ηχητικών σημάτων που καταγράφονται από τους κόμβους του δικτύου.

***Wireless Acoustic Sensor Network in the STORM
Research Project for Archeological and Cultural Sites
Monitoring***

ABSTRACT

The STORM research project aims to provide critical decision-making tools to all European cultural heritage actors in charge of managing the effects of climate change and natural hazards. In this context and aiming to enhance the protection of monuments and archaeological sites, a wireless acoustic sensor network was designed and developed. The paper presents the sensor hardware and embedded software and provides preliminary results on the fidelity of the audio signals recorded by the network nodes.

Εισαγωγή

Το ερευνητικό Έργο STORM [1] στοχεύει στην παροχή κρίσιμων εργαλείων λήψης αποφάσεων σε όλους τους φορείς της ευρωπαϊκής πολιτιστικής κληρονομιάς που είναι επιφορτισμένοι με την αντιμετώπιση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και των φυσικών κινδύνων. Το έργο πρόκειται να βελτιώσει τις υπάρχουσες διαδικασίες που σχετίζονται με τρεις προσδιορισμένους τομείς: α) Πρόληψη, β) Παρέμβαση και πολιτικές, και γ) Σχεδιασμός και διαδικασίες.

Στο πλαίσιο του έργου αναπτύσσεται από την Ομάδα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων (Wireless Acoustic Sensor Network - WASN). Παρόλο που τα WASN έχουν εξελιχθεί στο σημείο που μπορούν να θεωρούνται σχεδόν ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία [2], οι απαιτήσεις λειτουργίας με στόχο την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς θέτουν πρακτικούς περιορισμούς στη χρήση λύσεων εμπορικά διαθέσιμου υλικού / λογισμικού, οδηγώντας έτσι στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη καινοτόμου συστήματος. Οι απαιτήσεις αυτές επικεντρώνονται στο είδος των αισθητήρων ήχου, την πιθανή απαίτηση για παρακολούθηση επιπλέον φυσικών μεγεθών, το πεδίο εφαρμογής, τη λειτουργία χαμηλής ισχύος, το μέγεθος κόμβου, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την ευρεία χωρική κάλυψη και την ύπαρξη απομονωμένων ή απομακρυσμένων σημείων παρακολούθησης.

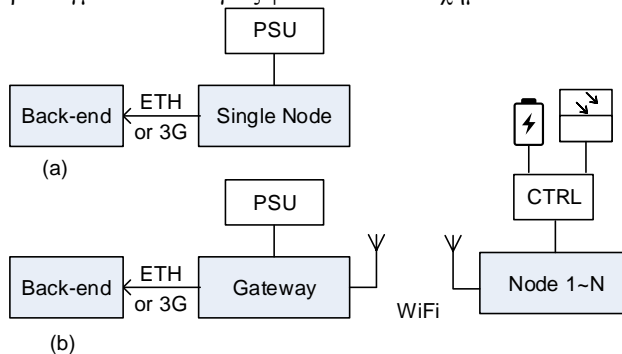
Στο Έργο προτείνεται η χρήση ενός WASN για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως ισχυρός άνεμος, έντονη βροχή / χαλάζι, καταιγίδες ή υψηλά θαλάσσια κύματα και ανθρωπογενείς απειλές, όπως δραστηριότητα σε απαγορευμένα σημεία κ.α.. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, καθώς χρησιμοποιείται κατά βάση ένας μόνο αισθητήρας, σε αντίθεση με πολλούς διαφορετικούς αισθητήρες στα παραδοσιακά συστήματα. Το WASN μπορεί να καλύπτει μια οποιαδήποτε περιοχή ενώ μπορεί εύκολα να επεκταθεί μέσω λογισμικού για την ανίχνευση επιπλέον απειλών για τα μνημεία πολιτιστικής κληρονομιάς (όπως για παράδειγμα εκρήξεις ή υπερβολική συγκέντρωση επισκεπτών).

1. Υλικό Ασύρματου Δικτύου Ακουστικών Αισθητήρων

Ένα σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής διαχωρίζεται σε 3 τμήματα: α) έναν ή περισσότερους κόμβους εγκατεστημένους στο χώρο ενδιαφέροντος προς καταγραφή, επεξεργασία και αποστολή των δεδομένων στο επόμενο στάδιο, β) υπολογιστικό σύστημα τύπου back-end όπου πραγματοποιείται τμήμα της επεξεργασίας των σημάτων προς εξαγωγή των γεγονότων και γ) υπηρεσία cloud που εξασφαλίζει αρχειοθέτηση, παρουσίαση των πληροφοριών, την πρόσβαση των χρηστών καθώς και επιπλέον υπηρεσίες όπως ειδοποιήσεις.

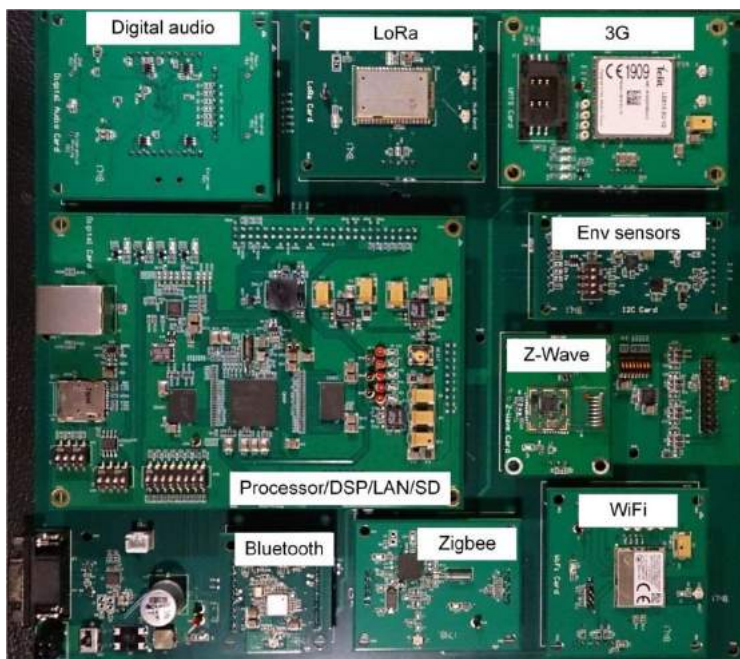
Δεδομένου ότι η τοπολογία του WASN μπορεί να είναι διαφορετική ανά σημείο εγκατάστασης, το υλικό σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές ανάγκες με αντίστοιχες διαμορφώσεις. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί με ένα μόνο κόμβο, όπου τα δεδομένα συλλέγονται και αποστέλλονται στο back-end από τον ίδιο κόμβο ή να λειτουργήσει με πολλαπλούς κόμβους, όπου τα

δεδομένα συλλέγονται από ένα κόμβο-διακομιστή και αποστέλλονται από αυτόν στο back-end. Παραδείγματα τοπολογίας φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.6 Υποστηριζόμενες τοπολογίες (α) Ενός κόμβου (β) Πολλαπλών κόμβων/διακομιστή

Ο κόμβος έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί με βάση έναν ενσωματωμένο επεξεργαστή / DSP της Texas Instruments (TI), τον OMAP L132 [3] που αποτελείται από δύο πυρήνες, έναν DSP και έναν ARM, ενώ διαθέτει μνήμη τύπου DDR2 και NAND Flash. Το υλικό ακολουθεί αρθρωτή αρχιτεκτονική που επιτρέπει την σύνδεση διαφορετικών περιφερειακών δικτύου.



Σχήμα 1.7 Εικόνα υλικού του κόμβου

Το ενσωματωμένο λογισμικό ορίζει τη λειτουργία του ώστε να ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις που κυμαίνονται από ένα έξυπνο μικρόφωνο μέχρι έναν

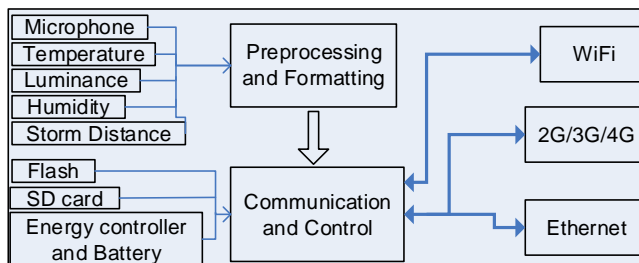
αυτόνομο έξυπνο αισθητήρα. Το υποσύστημα ηχητικής υποστήριξης περιλαμβάνει 4 MEMS μικρόφωνα υψηλής πιστότητας, 2 με ψηφιακή έξοδο [4] και 2 με αναλογική έξοδο [5], αφενός για λόγους ανοχής σε περίπτωση σφαλμάτων και αφετέρου για να είναι εφικτή η διακοπτόμενη λειτουργία κατόπιν ανίχνευσης ηχητικής πληροφορίας.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες δικτύωσης, θα χρησιμοποιείται το WiFi [6] για την υποστήριξη των συνδέσεων μεταξύ των αισθητήρων (προκειμένου να υποστηριχθεί η μετάδοση ήχου υψηλής πιστότητας) και τεχνολογίες δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3G/LTE/UMTS [7] για την αναμετάδοση επεξεργασμένης ή μη πληροφορίας στο back-end του συστήματος. Πέραν αυτών των τεχνολογιών δικτύου, και με στόχο την δυνατότητα επέκτασης και επαναχρησιμοποίησης του συστήματος, έχουν συμπεριληφθεί στον κόμβο περιφερειακά για την υποστήριξη των τοπικών ασύρματων δικτύων Bluetooth [8], Zigbee [9] και Z-Wave [10] καθώς και του ασύρματου δικτύου περιοχής LoRA [11].

Επιπλέον, και προς επέκταση της λειτουργικότητας του κόμβου πέραν του αμιγώς ακουστικού αισθητήρα, στο υλικό περιλαμβάνονται περιβαλλοντικοί αισθητήρες για την μέτρηση φωτεινότητας, θερμοκρασίας, υγρασίας και απόστασης καταιγίδων (κεραυνών). Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το υλικό του κόμβου με όλα τα περιφερειακά συστήματα, συγκεκριμένα WiFi, Zigbee, Bluetooth, Z-Wave, Ψηφιακές I/O, LAN, UART, SD slot, 3G, LoRA και Ψηφιακού Ήχου.

2. Ενσωματωμένο λογισμικό

Παράλληλα με την ανάπτυξη του υλικού, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε το ενσωματωμένο λογισμικό των κόμβων. Το διάγραμμα του λογισμικού φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



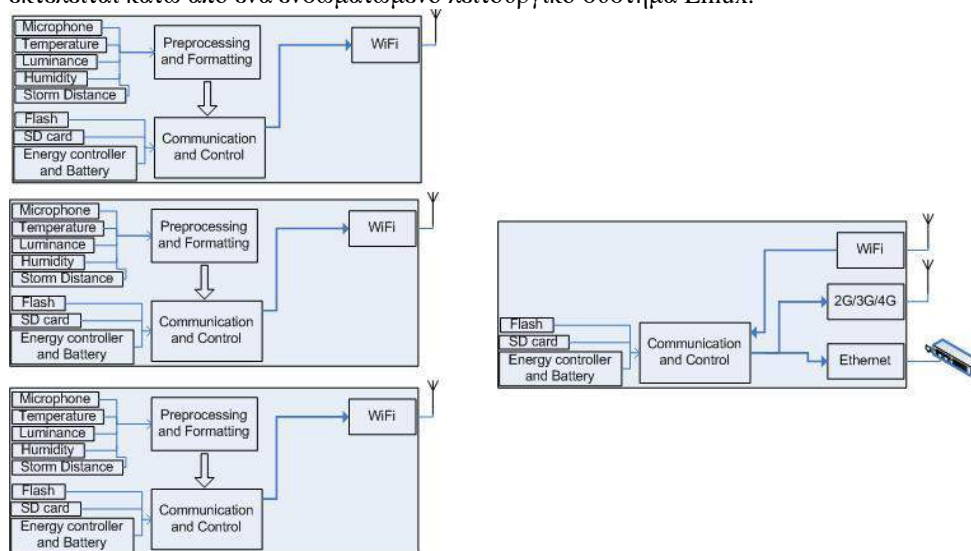
Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ενσωματωμένου λογισμικού

Πέραν του ηχητικού σήματος, τα δεδομένα που συλλέγονται από τα αισθητήρα είναι όπως προαναφέρθηκε η φωτεινότητα, η θερμοκρασία, η υγρασία και η απόσταση από καταιγίδα (κεραυνό). Στο στάδιο της προεπεξεργασίας, τα δεδομένα μορφοποιούνται κατάλληλα (π.χ. κατάτμηση σε blocks) με στόχο τη βέλτιστη μετάδοσή τους. Κατόπιν, αποστέλλονται στο back-end μέσω του Communication and Control block. Στο πλαίσιο του Έργου STORM, τρεις επιλογές είναι διαθέσιμες, συγκεκριμένα το Wi-Fi block, το block κινητής τηλεφωνίας (2G/3G/4G) και το Ethernet block. Το ίδιο τμήμα ενσωματωμένου λογισμικού είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του συστήματος και διαχειρίζεται το υποσύστημα Flash (όπου όλες οι παράμετροι λειτουργίας αποθηκεύονται), τον ελεγκτή ενέργειας και το υποσύστημα ελέγχου μπαταρίας που ρυθμίζει τις απαιτήσεις ισχύος κάθε υποσυστήματος.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο επεξεργαστής διαθέτει δύο πυρήνες, έναν DSP και έναν ARM. Στην εφαρμογή μας, ο DSP είναι υπεύθυνος για την συλλογή δεδομένων, την προεπεξεργασία και τη μορφοποίησή τους, ενώ ο ARM είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του συστήματος και την επικοινωνία με τον εξωτερικό κόσμο. Ο ARM χειρίζεται επίσης τη δυνατότητα ενημέρωσης ενσωματωμένου λογισμικού σε επίπεδο firmware του συστήματος.

Ο πυρήνας DSP επικοινωνεί με τους αισθητήρες μέσω ενός λογισμικού οδήγησης χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιώντας διαφορετικά τμήματα υλικού όπως τους διαύλους I2C, SPI και McASP. Κάθε αισθητήρας απαιτεί τη ρύθμιση διαφόρων παραμέτρων, αποτελώντας μέρος των αποφάσεων σχεδιασμού που λαμβάνουν υπόψη το μέγιστο ρυθμό δεδομένων που παρέχεται από κάθε αισθητήρα αλλά και τον επιθυμητό ρυθμό δειγματοληψίας για κάθε αισθητήρα. Τα τμήματα λογισμικού στον πυρήνα DSP εκτελούνται υπό την επίβλεψη ενός ενσωματωμένου λειτουργικού συστήματος πραγματικού χρόνου (RTOS) που παρέχεται από την TI και ονομάζεται TI-RTOS.

Τα δεδομένα από το DSP μεταφέρονται στον πυρήνα ARM μέσω ενός μπλοκ λογισμικού που ονομάζεται Syslink. Το Syslink χρησιμοποιεί κοινή μνήμη μεταξύ των δύο πυρήνων, αλλά χειρίζεται επίσης την απαραίτητη σηματοδότηση έτσι ώστε η επικοινωνία DSP-ARM να είναι αποτελεσματική. Το βασικό λογισμικό ARM εκτελείται κάτω από ένα ενσωματωμένο λειτουργικό σύστημα Linux.



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα ενσωματωμένου λογισμικού σε περίπτωση πολλαπλών κόμβων

Στο σενάριο λειτουργίας ενός κόμβου, τα δεδομένα αποκτώνται και στη συνέχεια αποστέλλονται στον εξωτερικό κόσμο είτε μέσω της σύνδεσης Ethernet είτε μέσω της μονάδας 3G. Και στις δύο περιπτώσεις το σύστημα επικοινωνεί με το back-end όπου αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα. Το Ethernet μπορεί να τροφοδοτείται από τον πάροχο σταθερής επικοινωνίας/internet του αρχαιολογικού χώρου, ενώ το μπλοκ 3G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία μέσω ενός οποιουδήποτε παρόχου κινητής τηλεφωνίας. Το κανάλι επικοινωνίας Wi-Fi δεν χρησιμοποιείται σε αυτό το σενάριο.

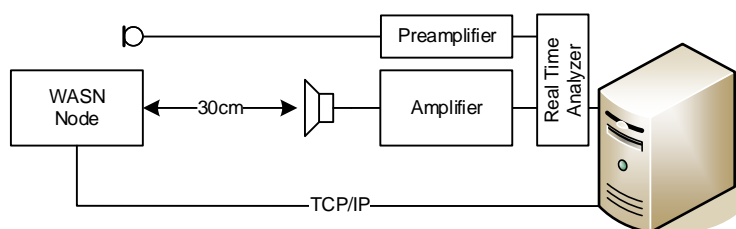
Στα μνημεία όπου απαιτείται μεγάλη χωρική κάλυψη ή είναι αδύνατη η παροχή Ethernet ή 3G στο σημείο ενδιαφέροντος και άρα είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν πολλαπλοί κόμβοι, ακολουθείται η αρχιτεκτονική που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Τρεις κόμβοι του WASN εμφανίζονται στα αριστερά του σχήματος. Τα δεδομένα συλλέγονται σε κάθε έναν και μεταδίδονται μέσω του καναλιού επικοινωνίας Wi-Fi. Ο κόμβος σε ρόλο διακομιστή (που εμφανίζεται στα δεξιά του σχήματος) είναι υπεύθυνος για τη συλλογή των δεδομένων αισθητήρων από το υποσύστημα Wi-Fi και την αναμετάδοση στο back end μέσω της 3G ή σταθερής Ethernet σύνδεσης.

Στην περίπτωση πολλαπλών κόμβων, ο μόνος περιορισμός χωρικής κάλυψης είναι η εμβέλεια του δικτύου WiFi, και συγκεκριμένα η επικοινωνία μεταξύ κάθε κόμβου με το διακομιστή. Δεδομένης της ευρύτατης χρήσης του δικτύου WiFi, υπάρχουν μια σειρά εμπορικά διαθέσιμων λύσεων σε περιπτώσεις όπου δεν αρκεί η αρχική λειτουργικότητα των κόμβων, όπως για παράδειγμα η χρήση κατευθυντικών κεραιών ή ακόμα και συστημάτων ενίσχυσης του σήματος (WiFi boosters) ή επανάληψης (WiFi Repeaters). Παράλληλα, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων και ένταση του σήματος για κάθε έναν, ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η χρήση αλγορίθμων συμπίεσης για τους οποίους έχει αποδειχθεί [12] ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του σήματος που εξετάζονται κατά την ταξινόμηση.

3. Προκαταρκτικά αποτελέσματα

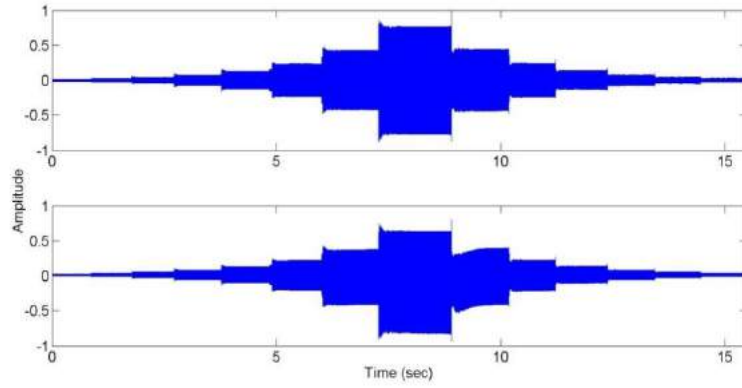
Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος, ειδικά σε ό,τι αφορά το ψηφιακό υποσύστημα ήχου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές εγγραφές ακολουθώντας τη συνδεσμολογία που φαίνεται στο Σχήμα 3.5, όπου αναπαράγονται ημιτονικά σήματα δοκιμής μεταβλητής στάθμης και συχνότητας και καταγράφονται από τον κόμβο WASN και ταυτόχρονα από εργαστηριακό μικρόφωνο μέσω συστήματος ανάλυσης πραγματικού χρόνου [13]. Οι ηχογραφήσεις από το WASN ανακτώνται μέσω σύνδεσης δικτύου.

Καθώς η λειτουργία του συστήματος βασίζεται σε ανίχνευση δραστηριότητας, αυτό το χαρακτηριστικό δοκιμάζεται επίσης, εξασφαλίζοντας ότι α) δεν πραγματοποιείται εγγραφή για σήματα κάτω από προκαθορισμένη στάθμη ηχητικής πίεσης και ότι β) πραγματοποιούνται εγγραφές για σήματα πάνω από το όριο.

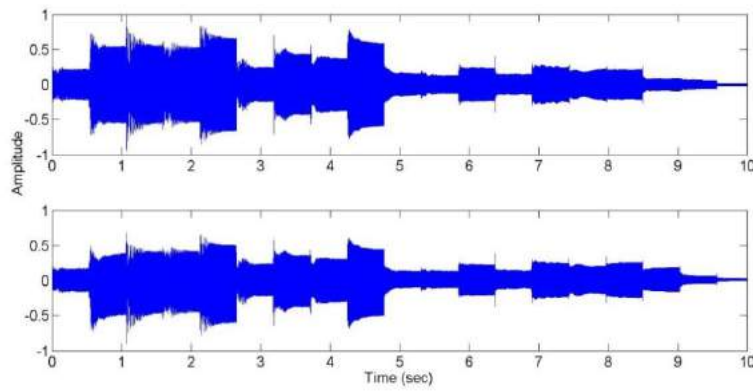


Σχήμα 3.10 Διάταξη προκαταρκτικού ελέγχου του υποσυστήματος ήχου

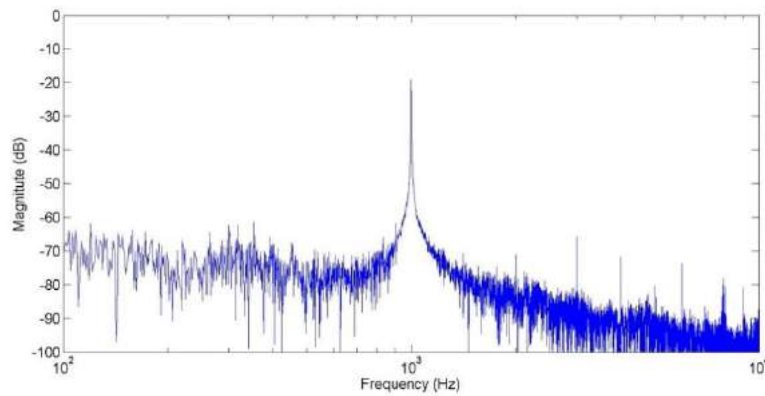
Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται το πλάτος του σήματος μεταβαλλόμενης στάθμης, όπου είναι εμφανές ότι το καταγραφόμενο σήμα από τον κόμβο WASN ταυτίζεται με αυτό του εργαστηριακού μικρόφωνου. Τυχόν αποκλίσεις οφείλονται στην ύπαρξη DC συνιστώσας, ζήτημα που έχει πλέον επιλυθεί.



Σχήμα 3.11 Διάγραμμα μεταβαλλόμενης στάθμης ημιτόνου 1 KHz (α) μετρητικό μικρόφωνο, (β) κόμβος WASN



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα μεταβαλλόμενης συχνότητας ημιτόνου 1 KHz (α) μετρητικό μικρόφωνο, (β) κόμβος WASN



Σχήμα 3.13 Φάσμα ημιτόνου 1 KHz κόμβου WASN

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το πλάτος του σήματος μεταβαλλόμενη συχνότητα, όπου είναι και πάλι εμφανής η αντιστοιχία κόμβου WASN και εργαστηριακού μικρόφωνου. Η μεταβολή του πλάτους και στις δύο εγγραφές οφείλεται στη φασματική απόκριση του ηχείου. Τέλος, στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται το φάσμα ισχύος του σήματος που καταγράφεται στον κόμβο WASN, για αναπαραγόμενο σήμα 1 KHz.

4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν ερευνητικά αποτελέσματα σχετικά με την σχεδίαση και κατασκευή ασύρματου δικτύου ακουστικών αισθητήρων με στόχο να ενισχυθεί η προστασία χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς. Όπως καταδείχθηκε από τα ερευνητικά αποτελέσματα, ο κόμβος λειτουργεί ικανοποιητικά ως προς την ανίχνευση, καταγραφή και μετάδοση ηχητικών σημάτων. Ωστόσο, για την πλήρη λειτουργία του συστήματος πρέπει να αντιμετωπιστούν επιπλέον πολυάριθμες τεχνολογικές προκλήσεις, όπως η εξέλιξη του ενσωματωμένου λογισμικού / λογισμικού για την ανίχνευση των περιβαλλοντικών απειλών, καθώς η επιτυχής κατάπιση της λειτουργικότητας του συστήματος μεταξύ των κόμβων και του back-end του συστήματος με γνώμονα το trade-off μεταξύ της καταναλισκόμενης ενέργειας, του διαθέσιμου εύρους ζώνης μετάδοσης και της περίσσειας επεξεργαστικής ισχύος σε επίπεδο κόμβου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε με την οικονομική συνεισφορά του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος “STORM: Safeguarding Cultural Heritage through Technical and Organizational Resources Management”, Σύμβαση No. 700191, Horizon 2020.

5. Αναφορές

[1] *STORM: Safeguarding Cultural Heritage through Technical and Organizational Resources Management*, co-funded by the Horizon 2020 Programme of the European Union; project website: <http://www.storm-project.eu/>, Grant Agreement No. 700191.

[2] M. Cobos, F. Antonacci, A. Alexandridis, A. Mouchtaris, and B. Lee, “A Survey of Sound Source Localization Methods in Wireless Acoustic Sensor Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2017, Article ID 3956282, 24 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/3956282>.

[3] OMAP-L132 C6000 DSP+ ARM Processor available at <http://ww.ti.com/lit/ds/symlink/omap-l132.pdf>.

[4] SPM0437HD4H-B, Digital SiSonic Microphone, <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Knowles%20Acoustics%20PDFs/SPV0840LR5H-B.pdf>.

[5] SPV0840LR5H-B, Zero-Height SiSonic Microphone, <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Knowles%20Acoustics%20PDFs/SPV0840LR5H-B.pdf>.

- [6] CC3100MOD SimpleLink™ Certified Wi-Fi Network Processor Internet-of-Things Module Solution for MCU Applications
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3100mod.pdf>.
- [7] LE910 V2 LTE/HSPA+ Telit, https://www.telit.com/wp-content/uploads/2017/11/Telit_LE910-V2_Datasheet.pdf.
- [8] CC2564MODx Bluetooth Host Controller Interface (HCI) Module
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2564moda.pdf>.
- [9] CC2538 Wireless Microcontroller System-On-Chip for 2.4-GHz IEEE 802.15.4,6LoWPAN,and ZigBee Applications
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2538.pdf>.
- [10] ZM5304 Z-Wave wireless modem Silicon Labs,
<https://www.silabs.com/documents/login/data-sheets/DSH12461-14.pdf>.
- [11] RN2483 Low-Power Long Range LoRa Technology Transceiver Module
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346C.pdf>.
- [12] Tatlas, N. –A., Potirakis, S. M., Mitilneos, S. A., Ragkoussi, M., “On the effect of compression on the complexity characteristics of wireless acoustic sensor network signals”, *Signal Processing*, Vol. 107, pp. 153-163, 2015.
- [13] Vibro-Acoustics SCS-DT4 Real-Time Acoustics Analyzer.

Κατηγοριοποίηση Ήχων στο Ερευνητικό Πρόγραμμα STORM για Επιστασία Αρχαιολογικών Χώρων και Χώρων Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Στέλιος Α. Μυτιληναίος¹, Στέλιος Μ. Ποτηράκης², Νικόλας-
Αλέξανδρος Τάτλας³, Μαρία Ραγκούση⁴
^{1,3}Επίκουρος Καθηγητής, ²Αναπληρωτής Καθηγητής, ⁴Καθηγήτρια
Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω
¹smitil@uniwa.gr, ²spoti@uniwa.gr, ³ntatlas@uniwa.gr,
⁴mariar@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα STORM στοχεύει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης δέσμης τεχνολογιών για την προστασία χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς. Σε αυτό το πλαίσιο, ασύρματα δίκτυα ακουστικών αισθητήρων θα τοποθετηθούν σε παρόμοιους χώρους με στόχο την καταγραφή ηχητικών δειγμάτων. Τα ηχητικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων θα τροφοδοτούνται σε ένα νευρωνικό δίκτυο ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την πιθανή επικινδυνότητα της αντίστοιχης δραστηριότητας για τους προφυλασσόμενους χώρους. Στην εργασία παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες υλοποίησης του δικτύου για την κατηγοριοποίηση των ήχων και εξετάζεται η επίδοση της προτεινόμενης πλατφόρμας για κάθε υποσύνολο ηχητικών χαρακτηριστικών. Επίσης, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την επίδοση των προτεινόμενων τεχνικών σε θορυβώδες περιβάλλον.

Sound Classification in the STORM Research Project for Archeological and Cultural Sites Monitoring

ABSTRACT

The STORM European research project aims in developing an integrated set of technological and organizational resources for monitoring and safeguarding cultural heritage sites. In this context, wireless acoustic sensor networks that detect and record sound samples are deployed over cultural sites. The features of the recorded samples are calculated and forwarded to a feed-forward neural network for classification in order to extract information about the potential hazardous effect of the activity or activities that generated the sounds. Implementation details about the classifier and the sound features are discussed in this paper. Sound features are grouped with respect to their scalar or time-frequency nature and results are presented regarding the classification accuracy of each subset. Results are also presented regarding the accuracy of the proposed approach when operated in noisy environments.

Εισαγωγή

Είναι γεγονός ότι οι ευρωπαϊκές χώρες μπορούν στο σύνολό τους να υπερηφανεύονται για μια πολιτιστική κληρονομιά με εξέχον ηθικό και ιδεολογικό ειδικό βάρος. Επιπλέον, υπάρχει και ένα ειδικό χρηματοοικονομικό βάρος αφού σχετικές μελέτες καταδεικνύουν την προσέλευση εκατομμυρίων τουριστών κάθε χρόνο με την ανάλογη χρηματική ροή σε χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς [1-2]. Ως εκ τούτου, η διαφύλαξη της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι σημαντική τόσο προκειμένου να διαφυλαχθεί η συλλογική ευρωπαϊκή ταυτότητα αλλά επίσης και λόγω των σημαντικών οικονομικών επιπτώσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα STORM [3] έρχεται να οικοδομήσει στα ερευνητικά αποτελέσματα προηγούμενων προσπαθειών [4-7] προκειμένου να αναπτύξει μια ολοκληρωμένη δέσμη τεχνολογιών και μεθόδων διαχείρισης και οργάνωσης με σκοπό την προστασία υποδομών και υλικών πολιτιστικής κληρονομιάς.

Σε αυτά τα πλαίσια, μέρος της δέσμης τεχνολογιών του STORM θα κατευθυνθεί στην ανάπτυξη ενός συστήματος ασύρματων δικτύων ακουστικών αισθητήρων (Wireless Acoustic Sensor Networks, WASNs) οι οποίοι θα είναι εγκατεστημένοι σε αρχαιολογικούς χώρους και χώρους πολιτιστικής κληρονομιάς, και της διασύνδεσής τους σε μια υπηρεσία Cloud (το λεγόμενο STORM Cloud). Οι αισθητήρες θα καταγράφουν ήχους από το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο προκειμένου να εξαχθούν τα ηχητικά τους χαρακτηριστικά (sound features). Τα τελευταία θα προωθούνται προς μηχανές αναγνώρισης προτύπων προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την προέλευση των ήχων και την πιθανή επικινδυνότητα της δραστηριότητας από την οποία προέρχονται. Επιπλέον, θα υπάρχει η δυνατότητα τοπικού υπολογισμού των ηχητικών χαρακτηριστικών από τους κόμβους του δικτύου, καθώς και η δυνατότητα μετάδοσης των δειγμάτων ήχου προς το STORM Cloud, είτε στην αρχική τους μορφή είτε συμπιεσμένων, αφού έχει καταδειχθεί ότι η ποιότητα της κατηγοριοποίησης δεν επηρεάζεται σημαντικά με την κατάλληλη επιλογή τύπου και αλγορίθμων συμπίεσης [8].

Πιο συγκεκριμένα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν νευρωνικά δίκτυα τύπου feed-forward (Feed-forward Artificial Neural Networks, FANNs) για τα οποία υπολογίζεται η επίδοσή τους για κάθε ομάδα των επιλεγμένων ηχητικών χαρακτηριστικών. Περαιτέρω, διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια της κατηγοριοποίησης βελτιώνεται αν ακολουθηθεί μια τακτική ταξινόμησης των ήχων σε δύο επίπεδα ιεράρχησης σε σχέση με την απουσία ταξινόμησης. Τέλος, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα της επίδοσης της προτεινόμενης πλατφόρμας σε θορυβώδες περιβάλλον, και συγκεκριμένα υπό την επίδραση λευκού και ροζ θορύβου σε διάφορες σχετικές στάθμες ενέργειας θορύβου προς ενέργεια του σήματος (Signal to Noise Ratio, SNR).

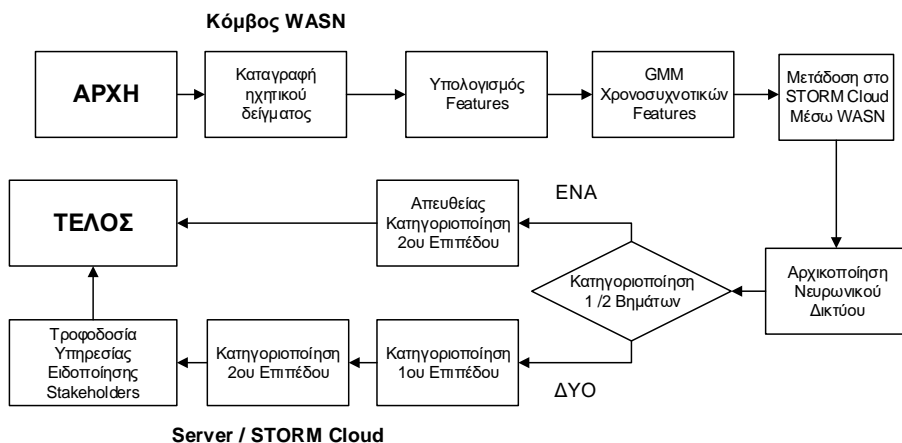
1. Κατηγοριοποίηση ήχων και επισκόπηση προτεινόμενης πλατφόρμας

Η επιλογή των ηχητικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κατηγοριοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδοση της τελευταίας. Στην βιβλιογραφία έχει προταθεί μια μεγάλη ποικιλία ηχητικών χαρακτηριστικών τα οποία μπορεί να αφορούν είτε την χρονική εξέλιξη του σήματος, όπως ο ρυθμός εναλλαγής

προσήμου (zero crossing rate), ο όγκος (volume), οι συντελεστές LPC (Linear Prediction Coefficients), είτε τα συχνοτικά χαρακτηριστικά αυτού, όπως η θεμελιώδης συχνότητα (fundamental frequency), το εύρος ζώνης (bandwidth), το pitch, οι φασματικοί συντελεστές (Fourier transform coefficients / spectral coefficients), οι συντελεστές συχνότητας Mel (Mel Frequency Cepstral Coefficients, MFCC), κ.ο.κ. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται και μέτρα της εντροπίας του ήχου, όπως οι εντροπίες τύπου Shannon, Tsallis, Wavelet, καθώς και στατιστικά μέτρα όπως η μέση και η μεσαία τιμή, η διασπορά, η κύρτωση κλπ. [8-9].

Ωστόσο, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η χρονική εξάρτηση των ηχητικών δειγμάτων, έχει προταθεί μια σειρά από χαρακτηριστικά υπό την γενική ονομασία χρονο-συχνοτικά, τα οποία αφορούν την χρονική εξέλιξη των συχνοτικών χαρακτηριστικών του σήματος. Καθώς ο τελικός όγκος ενός χρονοσυχνοτικού χαρακτηριστικού είναι αρκετά μεγάλος, συχνά χρησιμοποιούνται μοντελοποιήσεις της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας αυτών, όπως π.χ. η χρήση μοντέλων μεικτών Γκαουσιανών συναρτήσεων (Gaussian Mixture Models, GMMs).

Στην δική μας περίπτωση, κατόπιν εκτεταμένης έρευνας και δοκιμών στο χρησιμοποιούμενο σύνολο δειγμάτων, αποφασίστηκε η χρήση των εξής ηχητικών χαρακτηριστικών καθώς και η χρήση GMM για τα αντίστοιχα χρονοσυχνοτικά χαρακτηριστικά: zero-crossing rate, pitch, bandwidth, MFCCs, spectrogram coefficients, καθώς και μέτρα πολυπλοκότητας, όπως οι εντροπίες Shannon, Tsallis, wavelet και permutation. Επίσης, σε ό,τι αφορά την επιλεγθείσα τεχνική κατηγοριοποίησης, επιλέχθηκε η χρήση νευρωνικών δικτύων ευθείας τροφοδότησης (Feed-forward Artificial Neural Networks, FANNs), ενώ χρησιμοποιήθηκε ανασύνθεση σήματος μέσω ανάλυσης wavelets για την μείωση του θορύβου [10].



Σχήμα 1.14 Λειτουργικότητα προτεινόμενης πλατφόρμας κατηγοριοποίησης ήχων

Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η λειτουργικότητα της προτεινόμενης πλατφόρμας κατηγοριοποίησης ήχων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα, αρχικά υπολογίζονται τα προτεινόμενα features και τα GMM αυτών, και στη συνέχεια πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση του ήχου σε ένα ή δύο βήματα.

Σχετικά με την κατηγοριοποίηση του ήχου, σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ταξινόμησης όπου οι ήχοι αρχικά κατηγοριοποιούνται σε τρεις γενικές κλάσεις και συγκεκριμένα μια κλάση ανθρωπογενούς δραστηριότητας, μια κλάση ήχων ζώων και μια κλάση ήχων φυσικών φαινομένων. Περαιτέρω, οι ήχοι μπορούν να ταξινομηθούν σε ένα δεύτερο επίπεδο ιεράρχησης. Έτσι, οι ανθρωπογενείς ήχοι μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε ήχους προερχόμενους από αεροσκάφη, αυτοκίνητα ή χρήση πυροβόλων όπλων, οι ήχοι ζώων μπορούν να ταξινομηθούν σε ήχους προερχόμενους από πουλιά, σκύλους ή φίδια, ενώ οι φυσικοί ήχοι μπορούν να ταξινομηθούν σε ήχους προερχόμενους από φωτιά, καταρρακτώδη βροχόπτωση ή θυελλώδεις ανέμους. Οι συγκεκριμένες κλάσεις ήχων αντιστοιχούν, επίσης, στις κατηγορίες ήχων οι οποίες διαπιστώθηκε ότι αποτελούν σημαντικό παράγοντα σημειώσεων στο πρόγραμμα STORM ως τελικοί χρήστες.

Εκτός από ιδιαίτερες περιπτώσεις, εν γένει μας ενδιαφέρει η κατηγοριοποίηση των ήχων στο δεύτερο επίπεδο ιεράρχησης. Αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Ο ένας τρόπος είναι απευθείας, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση θα έχουμε απευθείας κατηγοριοποίηση του δείγματος σε 1 από τις 9 διαθέσιμες κλάσεις. Ο δεύτερος τρόπος είναι η κατηγοριοποίηση να γίνει σε δύο βήματα, ένα για κάθε επίπεδο ιεράρχησης. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη ταξινόμηση δύο επιπέδων είναι αρκετά δημοφιλής και στην βιβλιογραφία [11-13].

Τέλος, σε σχέση με το προτεινόμενο νευρωνικό δίκτυο, αυτό διαθέτει ένα ενδιάμεσο κρυφό επίπεδο νευρώνων μόνο. Οι συναρτήσεις εκμάθησης και μέτρησης επίδοσης ήταν μια παραλλαγή της scaled conjugate back-propagation και μια συνάρτηση μέσης τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος (Mean Square Error, MSE) αντίστοιχα. Η συνάρτηση κατωφλίου εξόδου ήταν σιγμοειδής. Επίσης, το μέγεθος του ενδιάμεσου επιπέδου νευρώνων επιλέχθηκε να είναι κάθε φορά ανάλογο του είδους των features που χρησιμοποιούνται.

2. Αριθμητικά αποτελέσματα επίδοσης της προτεινόμενης πλατφόρμας κατηγοριοποίησης ήχων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα επίδοσης της προτεινόμενης πλατφόρμας εξήχθησαν με χρήση ενός συνόλου δειγμάτων τα οποία προέρχονται από την συλλογή “505 Digital Sound Effects” [14]. Επαναλαμβάνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν 3 κλάσεις ήχων στο 1^ο επίπεδο ιεράρχησης (ανθρωπογενείς ήχοι, ήχοι ζώων, ήχοι φυσικών φαινομένων) και 9 συνολικά κλάσεις ήχων στο 2^ο επίπεδο ιεράρχησης ως εξής: αεροσκάφη, αυτοκίνητα, πυροβόλα όπλα (ανθρωπογενείς ήχοι), πουλιά, σκύλοι, φίδια (ήχοι ζώων), και φωτιά, καταρρακτώδης βροχόπτωση, θυελλώδεις άνεμοι (ήχοι φυσικών φαινομένων).

Ο Πίνακας 2.1 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ακρίβειας κατηγοριοποίησης σε μια σειρά 1000 δοκιμασιών της προτεινόμενης πλατφόρμας, στην περίπτωση όπου η κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται απευθείας σε 1 βήμα μόνο [10]. Η αναγραφόμενη ακρίβεια αντιστοιχεί στον μέσο όρο της επιτυγχανόμενης ακρίβειας για κάθε δοκιμασία.

Πίνακας 2.1 Ακρίβεια κατηγοριοποίησης προτεινόμενης πλατφόρμας με κατηγοριοποίηση 2^ο επιπέδου σε ένα βήμα μόνο

	Βαθμωτά Features	MFCCs	Συντελεστές Φάσματος	Βαθμωτά Features + MFCCs	Βαθμωτά Features + Συντελεστές Φάσματος	MFCCs + Συντελεστές Φάσματος	Βαθμωτά Features + MFCCs + Συντελεστές Φάσματος
Μέσος Όρος Ορθών Κατηγοριοποιήσεων	80.07 %	79.55 %	66.99 %	85.34 %	85.67 %	75.77 %	85.98 %
Διασπορά Ορθών Κατηγοριοποιήσεων	26.45 %	23.77 %	26.00 %	23.38 %	21.69 %	23.42 %	22.74 %
Features / Νευρώνες Ενδιάμεσου Επιπέδου	12 / 24	26 / 40	64 / 95	38 / 60	76 / 110	90 / 100	102 / 140

Αντίστοιχα, ο Πίνακας 2.2 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ακρίβειας κατηγοριοποίησης σε μια σειρά 1000 δοκιμασιών της προτεινόμενης πλατφόρμας, στην περίπτωση όπου η κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται σε 2 βήματα [10]. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται ότι στην γραμμή όπου εμφανίζονται οι νευρώνες του ενδιάμεσου επιπέδου υπάρχουν δύο τιμές. Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στον αριθμό των νευρώνων του ενδιάμεσου επιπέδου του νευρωνικού δικτύου το οποίο πραγματοποιεί την κατηγοριοποίηση στο πρώτο επίπεδο ταξινόμησης, ενώ η δεύτερη τιμή αντίστοιχα στο νευρωνικό δίκτυο του δευτέρου επιπέδου ταξινόμησης.

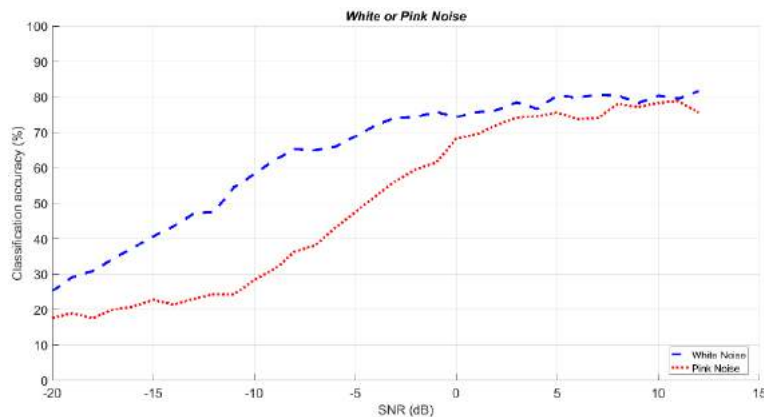
Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες μεταξύ τους, προκύπτει ότι για κάθε περίπτωση χρησιμοποιούμενων features υπάρχει μια σημαντική βελτίωση του μέσου όρου της επίδοσης στην περίπτωση όπου η κατηγοριοποίηση γίνεται σε 2 βήματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η βελτίωση αυτή είναι της τάξης του 10 %, αλλά υπάρχει και μια περίπτωση όπου η βελτίωση είναι της τάξης του 15 %. Ταυτόχρονα, παρατηρούμε ότι υπάρχει βελτίωση και στην διασπορά της ακρίβειας των ορθών

κατηγοριοποιήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η διασπορά στην περίπτωση της κατηγοριοποίησης σε 2 βήματα είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη από ό,τι η διασπορά σε 1 βήμα μόνο.

Πίνακας 2.2 Ακρίβεια κατηγοριοποίησης προτεινόμενης πλατφόρμας με κατηγοριοποίηση 2^ο επιπέδου σε δύο βήματα

	Βαθμωτά Features	MFCCs	Συντελεστές Φάσματος	Βαθμωτά Features + MFCCs	Βαθμωτά Features + Συντελεστές Φάσματος	MFCCs + Συντελεστές Φάσματος	Βαθμωτά Features + MFCCs + Συντελεστές Φάσματος
Μέσος Όρος Ορθών Κατηγοριοποιήσεων	94.33 %	87.80 %	80.69 %	96.73 %	94.27 %	86.99 %	94.27 %
Διασπορά Ορθών Κατηγοριοποιήσεων	14.98 %	11.12 %	27.56 %	16.96 %	19.64 %	26.92 %	19.94 %
Features / Νευρώνες Ενδιάμεσου Επιπέδου	12/18/18	26/42/40	64/85/100	38/40/70	76/75/140	90/65/135	102/140/150

Επιπλέον, στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η ακρίβεια επίδοσης της προτεινόμενης τεχνικής στην περίπτωση όπου το σήμα προέρχεται από θορυβώδες περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δείγμα προερχόμενο από την βάση ήχων προστίθεται τεχνητός θόρυβος έτσι ώστε ο λόγος σήματος προς θόρυβο να λαμβάνει τιμές από +12 ως -15 dB. Προκειμένου να καταδειχθεί η επίδοση της προτεινόμενης πλατφόρμας σε διαφορετικούς τύπους θορύβου, χρησιμοποιήθηκε τόσο λευκός όσο και ροζ θόρυβος. Επίσης, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την περίπτωση της κατηγοριοποίησης με χρήση βαθμωτών features σε 1 βήμα μόνο, χωρίς βλάβη της γενικότητας σε ό,τι αφορά την συμπεριφορά της προτεινόμενης πλατφόρμας ως προς την στάθμη θορύβου.



Σχήμα 2.15 Μέσος όρος ακρίβειας κατηγοριοποίησης σε 1 βήμα μόνο για διάφορες τιμές σήματος προς θόρυβο: λευκός και ροζ θόρυβος

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα, η συμπεριφορά της επίδοσης ως προς τον θόρυβο ακολουθεί ένα αναμενόμενο μοτίβο. Αρχικά (μεγάλες τιμές SNR, δεξί τμήμα των καμπυλών) κυμαίνεται γύρω από τις τιμές οι οποίες επιτυγχάνονται χωρίς τεχνητή έγχυση θορύβου ενώ υπάρχει μια τιμή θορύβου γύρω στα +5 dB από την οποία είναι εμφανής η έναρξη της επίδρασης του θορύβου στην ακρίβεια κατηγοριοποίησης. Οι τιμές της επίδοσης βαίνουν μειούμενες όσο μειώνεται το SNR ενώ, όπως είναι αναμενόμενο, στην περίπτωση του ροζ θορύβου η επιτυγχάνομενη ακρίβεια κατηγοριοποίησης είναι μικρότερη από ό,τι στην περίπτωση του λευκού θορύβου.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν ερευνητικά αποτελέσματα σχετικά με την χρήση μιας πλατφόρμας αυτόματης κατηγοριοποίησης ήχων με σκοπό την εγκατάστασή της σε ένα δίκτυο αισθητήρων προκειμένου να ενισχυθεί η προστασία αρχαιολογικών χώρων και χώρων πολιτιστικής κληρονομιάς. Όπως καταδείχθηκε από τα ερευνητικά αποτελέσματα, η χρήση ταξινόμησης σε 2 επίπεδα ιεράρχησης βελτιώνει την επίδοση της πλατφόρμας. Επίσης, καταδείχθηκε η συμβολή στην επίδοση διαφόρων ηχητικών features, καθώς και η συμπεριφορά της επίδοσης σε θορυβώδες περιβάλλον. Οι επιτυγχάνομενες τιμές της ακρίβειας κατηγοριοποίησης επιτρέπουν την χρήση της προτεινόμενης πλατφόρμας για τους προαναφερόμενους σκοπούς. Σε επόμενο στάδιο, προτείνεται η περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς της επίδοσης σε θορυβώδες περιβάλλον καθώς και η ανάλυση της επίδοσης στην περίπτωση ταυτόχρονης καταγραφής δύο ή περισσότερων ήχων.

Ευχαριστίες

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε με την οικονομική συνεισφορά του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος “STORM: Safeguarding

4. Αναφορές

[1] “Towards an integrated approach to Cultural Heritage for Europe”, European Commission, 2015, available at

<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?type=REPORT&reference=A8-2015-0207&language=EN>.

[2] InHERIT: Promoting Cultural Heritage as a Generator of Sustainable Development, European Research Project, co-funded by the ERASMUS+ action of the European Union; project website: <http://www.inherit.tuc.gr/en/home/>.

[3] *STORM: Safeguarding Cultural Heritage through Technical and Organizational Resources Management*, co-funded by the Horizon 2020 Programme of the European Union; project website: <http://www.storm-project.eu/>, Grant Agreement No. 700191.

[4] “Carte del Rischio”, Territorial information system for the protection of cultural heritage, ISCR, Italy, 1992; project websites: <http://www.cartadelrischio.it/eng/index.html>;
<http://www.icr.beniculturali.it/pagina.cfm?usz=1&uid=16>.

[5] HAR – Heritage at Risk Programme, Historic England; project website: <https://historicengland.org.uk/advice/heritage-at-risk/types/>

[6] EMERIC – Expert System for the Monitoring and Management of the Natural Environment of Crete; project website: <http://emic.ims.forth.gr/>.

[7] Mazzolani, F. M., “The PROHITECH research project”, appears in *Structural Analysis of Historic Construction*, Taylor and Francis Ed., 2008 (available at: <http://www.hms.civil.uminho.pt/sahc/2008/CH123.pdf>).

[8] Tatlas, N. –A., Potirakis, S. M., Mitilineos, S. A., Ragkoussi, M., “On the effect of compression on the complexity characteristics of wireless acoustic sensor network signals”, *Signal Processing*, Vol. 107, pp. 153-163, 2015.

[9] Paraskevas, I., Potirakis, S. M., and Rangoussi, M., “Natural soundscapes and identification of environmental sounds: a pattern recognition approach”, *Proceedings of the 16th International Conference on Digital Signal Processing*, pp. 473-478, July 5-7, 2009, Santorini, GREECE.

[10] Mitilineos, S. A., Potirakis, S. M., Tatlas, N.-A., Ragkoussi, M., “A Two-Level Sound Classification Platform for Environmental Monitoring”, *Journal of Sensors*, pp. 1-13, 2018.

[11] Matsinos, Y. G., et al., “Spatio-temporal variability in human and natural sounds in a rural landscape”, *Landscape Ecology*, Vol. 2008, No. 23, pp. 945-959.

[12] Mazaris, A. D., et al., “Spatio-temporal analysis of an acoustic environment: interactions between landscape features and sounds”, *Landscape Ecology*, Vol. 2009, No. 24, pp. 817-831.

[13] Papadimitriou, K. D., et al., “Cartographic representation of the sonic environment”, *The Cartographic Journal*, Vol. 46, No. 2, pp. 126-135, May 2009.

[14] “505 Digital Sound Effects”, CD Box Set, Laserlight Digital, 2006.

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 9: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου I**Στατιστική ανάλυση του χρωματισμού σε ηχητικά
σήματα**

Γιώργος Χριστόπουλος
Προπτυχιακός φοιτητής
ece7662@upatras.gr

Κωνσταντίνος Καλέρης
Υποψήφιος διδάκτωρ
kkaleris@upnet.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Υποψήφιος διδάκτωρ
grkamaris@upatras.gr

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου
Ερευνητικό Διδακτικό Προσωπικό
phatziantoniou@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής
mourjor@upatras.gr

Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αραιοί συντονισμοί χαμηλών συχνοτήτων που αντιστοιχούν στις ισχυρές πρώιμες ανακλάσεις μικρών κλειστών χώρων έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση της χροιάς, της αίσθησης του ρυθμού και του τόνου των ηχητικών σημάτων που αναπαράγονται σε αυτούς. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ακουστικός χρωματισμός. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του ακουστικού χρωματισμού μέσω της επίδρασής του πάνω σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών παραμέτρων περιγραφής των ηχητικών σημάτων. Για αυτό το σκοπό συγκεντρώθηκε ένα σύνολο ανηχοικών (αχρωμάτιστων) ηχητικών δεδομένων, από τα οποία υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα χρωματισμένα σήματα για διάφορους κλειστούς χώρους. Για το σύνολο των αχρωμάτιστων και χρωματισμένων σημάτων εξήχθη ένα πλήθος χαρακτηριστικών ηχητικών παραμέτρων οι οποίες συγκρίθηκαν για τα δύο είδη ως προς τη μέση τιμή τους με μεθόδους στατιστικού ελέγχου κατά ζεύγη. Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των παραμέτρων ως προς την επίδραση που έχει πάνω τους ο χρωματισμός και επιλέχθηκαν οι πλέον σημαντικές παράμετροι με βάση το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας τους. Από την ανάλυση προέκυψαν συμπεράσματα για την λειτουργία του χρωματισμού σε διαφορετικά δωμάτια και είδη ηχητικών σημάτων.

Statistical analysis of coloration in audio signals**ABSTRACT**

Acoustic coloration is the audible distortion of a sound's timbre, rhythmic sensation or pitch, which comprise the sound's color [1]. It is caused by sparse low-frequency resonances of small size rooms which correspond to their early, strong reflections. In this paper, we study the impact of coloration on audio features that describe the color of audio signals. Hence, we collected a set of anechoic (uncolored) signals, which was later colored by the early reflections of various rooms. Audio

features were extracted from both these types of signals and the means of their values were compared with the use of paired samples t-tests. The results of these tests led to feature evaluation and selection in terms of acoustic coloration. In the end, we conducted an analysis on the impact of coloration on values of features that were marked as statistically significant.

Εισαγωγή

Ως χρώμα ενός ήχου ορίζεται η ιδιότητά του που κάνει έναν ακροατή να χαρακτηρίσει δύο φαινομενικά όμοιους και εξίσου ηχηρούς ήχους ως ανόμοιους. Το χρώμα ενός ήχου περιγράφεται από τη χροιά, την αίσθηση του ρυθμού και τον τόνο του, ενώ η ακουστική παραμόρφωσή πάνω σε αυτά τα χαρακτηριστικά ονομάζεται ακουστικός χρωματισμός [1,4]. Ο χρωματισμός προκαλείται κατά την αναπαραγωγή ενός ηχητικού σήματος μέσα σε έναν ακουστικό χώρο και οφείλεται στις πρώιμες ανακλάσεις. Η πρώιμη απόκριση αντιστοιχεί χρονικά στις πρώτες δεκάδες ms [7] (ανάλογα με τον εκάστοτε χώρο), και ακολουθείται από το πεδίο αντήχησης. Οι πρώιμες ανακλάσεις ως διακριτές, ισχυρές επαναλήψεις του απευθείας ήχου λειτουργούν ως φίλτρο χτένας (comb filter) και οδηγούν στην εμφάνιση κορυφών και κοιλάδων στην φασματική απόκριση του χώρου. Στις χαμηλές συχνότητες, κάτω από την συχνότητα Schroeder, τα φασματικά αυτά χαρακτηριστικά είναι αραιά (ως εκ τούτου, διακριτά) και προκαλούν στον ακροατή την αίσθηση του χρωματισμού. Ο χρωματισμός παρατηρείται κυρίως σε μικρούς και μεσαίους χώρους, οι οποίοι εμφανίζουν υψηλότερη συχνότητα Schroeder σε σχέση με τους μεγάλους χώρους.

Ως προς την αντιληπτότητα του, ο χρωματισμός έχει μελετηθεί τόσο σε επίπεδο σημάτων (σύγκριση αχρωμάτιστων και χρωματισμένων σημάτων) όσο και σε επίπεδο χώρων (σύγκριση απόκρισης συχνότητας). Οι Atal et al. [3] διατύπωσαν δύο κριτήρια για την ύπαρξη χρωματισμού συγκρίνοντας λευκό θόρυβο και αρμονικό λευκό θόρυβο (λευκός θόρυβος με μια ανάκλαση) ως προς τη μέγιστη αυτοσυσχετισή τους και τη διαφορά μέγιστης και ελάχιστης φασματικής τιμής. Η Salomons [4] επέκτεινε αυτά τα κριτήρια, χρησιμοποιώντας περισσότερες από μία ανακλάσεις, καθώς και μια αντιληπτική τράπεζα φίλτρων. Ο Berkley [5] πρότεινε πως η φασματική τυπική απόκλιση των αποκρίσεων συχνότητας μπορεί να οδηγήσει στην πρόβλεψη του ακουστικού χρωματισμού, ενώ οι Meynier et al. [6] προσέθεσαν τη μέγιστη και εκατοστιαία φασματική τιμή των αποκρίσεων συχνότητας στα μεγέθη που υποδεικνύουν το χρωματισμό.

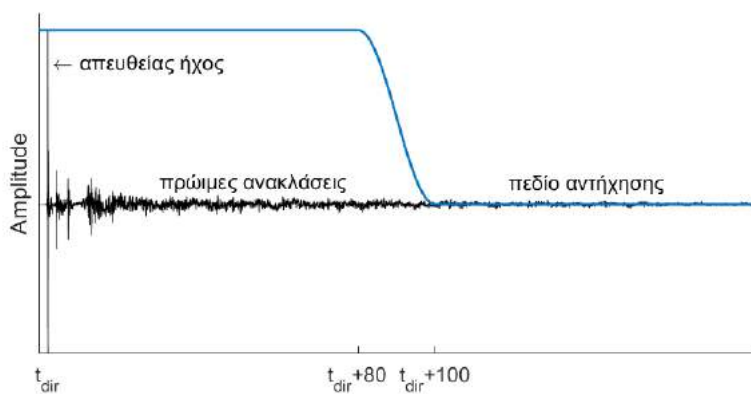
Στη παρούσα εργασία, ο χρωματισμός μελετήθηκε στατιστικά με βάση την επίδρασή του πάνω στις τιμές ενός πλήθους παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα ηχητικά σήματα. Για την μελέτη εφαρμόστηκε ο στατιστικός έλεγχος t κατά ζεύγη ως κατάλληλος για ανάλυση παραμέτρων οι οποίες παίρνουν τιμές πριν και μετά από κάποια διεργασία. Τα ηχητικά σήματα μελετήθηκαν ξεχωριστά ανά είδος αλλά και όλα μαζί. Με αυτό τον τρόπο κατέστη δυνατή η αξιολόγηση των παραμέτρων ως επιμέρους (για συγκεκριμένα είδη) ή καθολικά (για όλα τα είδη) σημαντικές. Επιπλέον, προκειμένου να αναδειχθεί η σημασία του χρωματισμού – σε σχέση και με την αντήχηση – έγινε συγκριτική μελέτη των παραμέτρων λαμβάνοντας υπόψιν α) μόνο το πρώιμο κομμάτι της κρουστικής απόκρισης, το οποίο συνδέεται με τον χρωματισμό και β) την πλήρη κρουστική απόκριση του χώρου μαζί με το πεδίο αντήχησης.

1. Μεθοδολογία

Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 140 αχρωμάτιστα σήματα $s_{0,b}(n)$, όπου $b \in [1, B]$ ο δείκτης των ηχητικών σημάτων και $B = 140$, διάρκειας 5s το καθένα, μεταξύ των οποίων σήματα ομιλίας, κλασικής κιθάρας, εγχόρδων και πνευστών (35 σε κάθε κατηγορία). Τα σήματα προέκυψαν από τεμαχισμό κομματιών που επιλέχθηκαν από πρότυπη βιβλιοθήκη ανηχικών ηχογραφήσεων [8]. Ο τεμαχισμός έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε τα επιμέρους σήματα να μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για τη δημιουργία των χρωματισμένων σημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρώτο μέρος των κρουστικών αποκρίσεων 7 κλειστών χώρων $h_r(n)$, όπου $r \in [1, R]$ ο δείκτης των κρουστικών αποκρίσεων και $R = 7$, από τα κτίρια του Συνεδριακού Κέντρου και του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών (Πίνακας 1). Στις κρουστικές αποκρίσεις εφαρμόστηκε παράθυρο προκεκλιμένο να απομονωθούν τα πρώτα 100 ms, τα οποία θεωρήθηκε πως περιλαμβάνουν την πρώιμη απόκριση του δωματίου (Σχήμα 1).

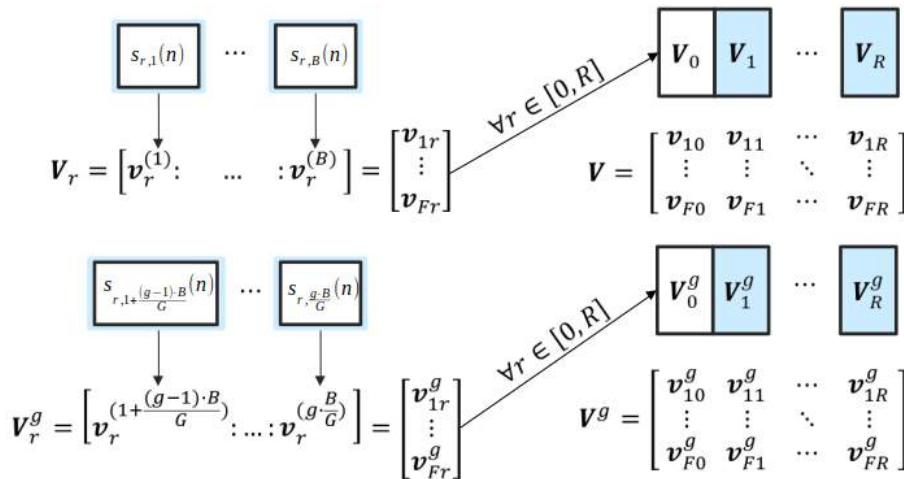
r	Περιγραφή	Όγκος (m ³)	T30 (s)	EDT (s)	D50 (%)	C50 (dB)	STD (dB)
1	Μικρός συναυλιακός χώρος	1292	0,96	0,73	87,39	8,41	4,96
2	Καμαρίνι	55	0,3	0,18	97,12	15,28	4,99
3	Αίθουσα διδασκαλίας	555	1,03	0,44	89,11	9,13	5,04
4	Αίθουσα διδασκαλίας	336	1	0,59	86,93	8,23	5,19
5	Εργαστήριο	84	0,24	0,15	96,95	15,02	5,89
6	Αίθουσα Συνεδριάσεων	240	0,6	0,45	90,26	9,67	10,02
7	Αίθουσα διδασκαλίας	372	1,46	1,44	50,5	0,09	14,91

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των κλειστών χώρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του συνόλου ηχητικών δεδομένων



Σχήμα 1. Εφαρμογή παραθύρου για την απομόνωση του πρώιμου μέρους της κρουστικής απόκρισης

Από τη συνέλιξη των αχρωμάτιστων σημάτων με τις πρώιμες κρουστικές αποκρίσεις προέκυψαν τα χρωματισμένα σήματα $s_{r,b}(n)$. Από κάθε σήμα εξήχθησαν 35 χαρακτηριστικές παράμετροι $f \in [1, F]$, $F = 35$ που περιγράφουν τη χροιά, την αίσθηση του ρυθμού και τον τόνο, με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου MIRtoolbox [9]. Έτσι, σε κάθε αχρωμάτιστο ($r = 0$) και χρωματισμένο ($r \in [1, R]$) σήμα $s_{r,b}(n)$ αντιστοιχεί ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών παραμέτρων $v_r^{(b)} \in R^F$. Τα διανύσματα χαρακτηριστικών που προέκυψαν για το σύνολο των σημάτων σχηματίζουν τους πίνακες χαρακτηριστικών $V_r \in R^{F \times B}$ ενώ οι πίνακες χαρακτηριστικών όλων των δωματίων σχηματίζουν τον χώρο χαρακτηριστικών $V \in R^{F \times (R+1) \cdot B}$ (Σχήμα 2). Σημειώνεται ότι τα διανύσματα γραμμής $v_{fr} \in R^B$ του V περιέχουν τις τιμές μιας παραμέτρου για όλα τα αχρωμάτιστα ή χρωματισμένα από ένα χώρο σήματα. Χρησιμοποιώντας τα διανύσματα χαρακτηριστικών των σημάτων ενός είδους $g \in [1, G]$ με $G = 4$, δηλαδή τα $v_r^{(b)}$ για $b \in [1 + \frac{(g-1) \cdot B}{G}, \frac{g \cdot B}{G}]$ και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, προκύπτει ο αντίστοιχος χώρος χαρακτηριστικών $V^g \in R^{F \times (R+1) \cdot B/G}$ για ένα είδος σημάτων, που περιέχει τα αντίστοιχα διανύσματα γραμμής $v_{fr}^g \in R^{B/G}$.



Σχήμα 2. Σχηματισμός των χώρων χαρακτηριστικών παραμέτρων

Η επίδραση του χρωματισμού στις τιμές των παραμέτρων εξετάστηκε μέσω του στατιστικού ελέγχου t κατά ζεύγη, ο οποίος ελέγχει τη μέση τιμή των διαφορών των παραμέτρων κατά ζευγάρια (πριν και μετά τον χρωματισμό). Για το λόγο αυτό σχηματίστηκαν τα διανύσματα διαφορών $d_{fr} = v_{fr} - v_{f0}$ και $d_{fr}^g = v_{fr}^g - v_{f0}^g$ για $r \in [1, R]$. Ακραίες τιμές από τα d_{fr}, d_{fr}^g αφαιρέθηκαν ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις του ελέγχου και προέκυψαν τα $d'_{fr} \in R^{100}$ και $d'_{fr}^g \in R^{25}$. Στα d'_{fr} και d'_{fr}^g διενεργήθηκε ο έλεγχος αφ' ενός για το σύνολο των σημάτων και αφ' ετέρου ανά είδος σήματος. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε η μηδενική υπόθεση πως η μέση τιμή της διαφοράς των τιμών μιας παραμέτρου f ανάμεσα στα αχρωμάτιστα και χρωματισμένα σήματα από ένα χώρο r είναι ίση

με μηδέν, το οποίο ισοδυναμεί με την υπόθεση πως ο χρωματισμός δεν μεταβάλλει την μέση τιμή της παραμέτρου:

$$H_{f_r}^o: \mu_{f_r} = 0 \quad \text{και} \quad H_{f_r, g}^o: \mu_{f_r}^g = 0$$

όπου μ_{f_r} , $\mu_{f_r}^g$ οι μέσες τιμές των διανυσμάτων d'_{f_r} , $d'_{f_r}^g$. Για τα d'_{f_r} , $d'_{f_r}^g$, υπολογίστηκαν τα t -στατιστικά, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$t_{f_r} = \frac{\mu_{f_r} \cdot \sqrt{100}}{s_{f_r}} \quad (1) \quad \text{και} \quad t_{f_r}^g = \frac{\mu_{f_r}^g \cdot \sqrt{25}}{s_{f_r}^g} \quad (2)$$

Το επίπεδο για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης ορίστηκε ως 5%.

2. Αποτελέσματα

2.1 Στατιστικά σημαντικές χαρακτηριστικές παράμετροι

Ορίστηκαν 2 είδη στατιστικά σημαντικών παραμέτρων: (α) οι επιμέρους σημαντικές παράμετροι ανά είδος ηχητικού σήματος και (β) οι καθολικά σημαντικές παράμετροι, οι οποίες προκύπτουν ως σημαντικές ανεξαρτήτως είδους σήματος. Συγκεκριμένα, ως επιμέρους σημαντικές παράμετροι ανά είδος σήματος αξιολογήθηκαν οι παράμετροι που για ένα συγκεκριμένο είδος σήματος εμφανίζονται ως στατιστικά σημαντικές για όλους τους κλειστούς χώρους, με εξαίρεση το πολύ έναν. Από τις επιμέρους σημαντικές παραμέτρους προέκυψαν οι καθολικά σημαντικές παράμετροι, αυτές δηλαδή που αξιολογήθηκαν ως στατιστικά σημαντικές για όλα τα είδη σημάτων ξεχωριστά ενώ ταυτόχρονα, από την σύγκριση επί του συνόλου των σημάτων, προέκυψαν ως στατιστικά σημαντικές για όλους τους κλειστούς χώρους, με εξαίρεση το πολύ έναν. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις καθολικά σημαντικές παραμέτρους (από εδώ και στο εξής θα αναφέρονται απλώς ως σημαντικές παράμετροι), οι οποίες βρέθηκαν να είναι [10]:

- οι στατιστικές φασματικές παράμετροι (κέντρο βάρους, διασπορά, τυπική απόκλιση, κύρτωση, εντροπία, ομαλότητα)
- οι συντελεστές MFCC 1, 2, 3 και 8

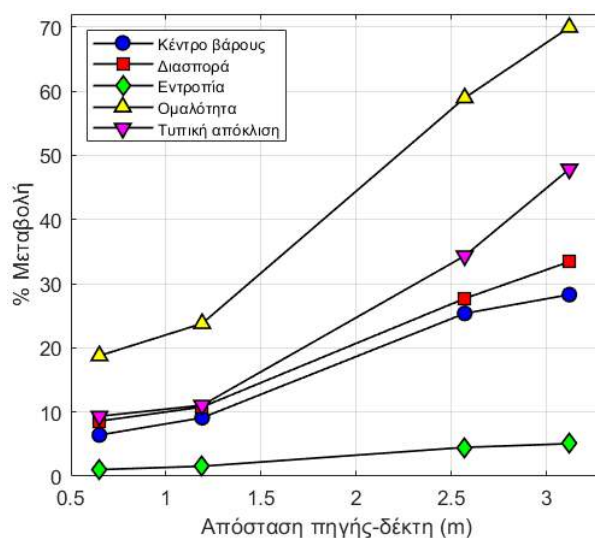
Οι σχέσεις που δίνουν τις εν λόγω παραμέτρους παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

2.2 Ο ρόλος της απόστασης πηγής - δέκτη

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την επίδραση του χρωματισμού πάνω στις τιμές των σημαντικών παραμέτρων συναρτήσει της απόστασης πηγής-δέκτη κατά την αναπαραγωγή του ηχητικού σήματος εντός ενός κλειστού χώρου (αίθουσα συνεδριάσεων). Από το Σχ.3 γίνεται σαφές πως οι φασματικές παράμετροι κέντρο βάρους, διασπορά, τυπική απόκλιση, εντροπία και ομαλότητα, εμφανίζουν υψηλή συσχέτιση με την απόσταση πηγής-δέκτη. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε για την φασματική κύρτωση και τους συντελεστές MFCC, παρ' όλο που εμφανίζουν υψηλή στατιστική σημαντικότητα.

Σημειώνεται πως στο Σχ.3 φαίνεται για λόγους παρουσίασης η μεταβολή των παραμέτρων κατά απόλυτη τιμή. Για τις παραμέτρους κέντρο βάρους, διασπορά, εντροπία και ομαλότητα, η μεταβολή προκύπτει από μείωση των τιμών στα χρωματισμένα σήματα ενώ για την τυπική απόκλιση προκύπτει από αύξηση. Η

απομάκρυνση πηγής-δέκτη έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση και πύκνωση των ανακλάσεων στο πρώιμο κομμάτι της κρουστικής απόκρισης και, ως εκ τούτου, την ενίσχυση του φαινομένου του χρωματισμού. Η αύξηση των κορυφών και κοιλάδων στις χαμηλές συχνότητες του φάσματος μειώνει την φασματική ομαλότητα και μετατοπίζει το φασματικό κέντρο βάρους προς τα αριστερά, ενώ η συγκέντρωση φασματικής ενέργειας γύρω από τις κορυφές οδηγεί σε μείωση της φασματικής εντροπίας και της διασποράς. Αντιθέτως, οι κορυφές και κοιλάδες αυξάνουν την ανομοιομορφία του φασματικού πλάτους με αποτέλεσμα η φασματική τυπική απόκλιση να αυξάνεται (για εκτενή ανάλυση τέτοιων συσχετίσεων, βλ. [11]).



Σχήμα 3. Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης τιμής των φασματικών παραμέτρων για διαφορετικές αποστάσεις πηγής-δέκτη στον χώρο «αίθουσα συνεδριάσεων»

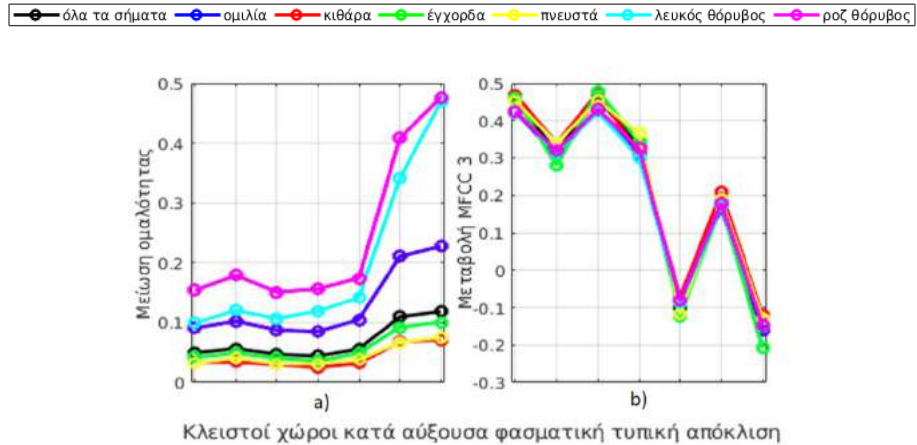
2.3 Ο ρόλος του είδους των ηχητικών σημάτων

Για τους διάφορους κλειστούς χώρους εξετάστηκε η εξάρτηση των στατιστικά σημαντικών παραμέτρων από το είδος του σήματος. Προκύπτει πως οι φασματικές παράμετροι, πλην της τυπικής απόκλισης, εμφανίζουν συσχέτιση με το είδος του σήματος. Όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχ.4α, η φασματική ομαλότητα εμφανίζει μεγαλύτερη μείωση για τα σήματα λευκού και ροζ θορύβου ενώ ακολουθούν, τα σήματα ομιλίας. Αντιθέτως, για τους συντελεστές MFCC δεν προέκυψε συσχέτιση με το είδος του κομματιού, όπως φαίνεται στο Σχ.4.

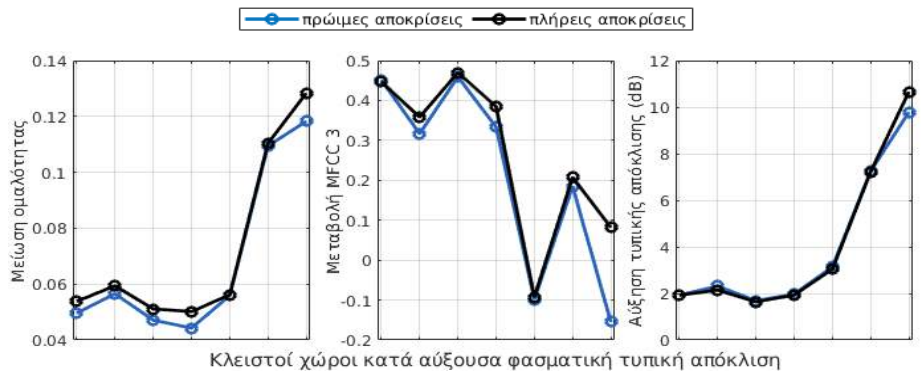
2.4 Ακουστικός χρωματισμός και αντήχηση

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της επίδρασης α) της πρώιμης απόκρισης (100ms) και β) της πλήρους απόκρισης των δωματίων στη μέση τιμή των στατιστικά σημαντικών παραμέτρων. Από την ανάλυση προκύπτει πως οι μεταβολές των παραμέτρων οφείλονται κατά κύριο λόγο στις πρώιμες ανακλάσεις, και όχι στο πεδίο

αντήχησης, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχ.5 για τους συντελεστές φασματικής ομαλότητας, MFCC3 και φασματικής τυπική απόκλιση του σήματος.



Σχήμα 4. Μεταβολή της μέσης τιμής α) της φασματικής ομαλότητας και β) του συντελεστή MFCC 3 ανά είδος σημάτων



Σχήμα 5. Μεταβολή φασματικής ομαλότητας, MFCC 3 και φασματικής τυπικής απόκλισης σε χρωματισμένα σήματα και σήματα με αντηχήσεις

3. Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση του ακουστικού χρωματισμού σε ηχητικά σήματα όπως προκύπτει από την αναπαραγωγή τους σε κλειστούς χώρους. Αυτό έγινε μέσα από τη σύγκριση αχρωμάτιστων και χρωματισμένων σημάτων ως προς χαρακτηριστικές παραμέτρους που περιγράφουν το χρώμα των ηχητικών σημάτων. Οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο πάνω στο σύνολο των ηχητικών δεδομένων που συγκεντρώθηκε όσο και για τα κάθε κατηγορία σημάτων ξεχωριστά.

Από τη μελέτη προέκυψαν οι χαρακτηριστικές παράμετροι που αφορούν στο φαινόμενο του ακουστικού χρωματισμού ανά κατηγορία σήματος (για τέσσερις κατηγορίες σημάτων) καθώς και οι αντίστοιχες παράμετροι ανεξαρτήτως είδους σήματος (καθολικά σημαντικές παράμετροι). Ως καθολικά σημαντικές παράμετροι αξιολογήθηκαν οι στατιστικές φασματικές παράμετροι και οι συντελεστές MFCC. Βρέθηκε πως οι στατιστικές φασματικές παράμετροι στην πλειοψηφία τους εμφανίζουν συσχέτιση με την απόσταση πηγής-δέκτη καθώς και με την κατηγορία του ηχητικού σήματος, σε αντίθεση με τους συντελεστές MFCC οι οποίοι δεν εμφάνισαν συσχέτιση σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Τέλος, συγκρίθηκε για τις καθολικά σημαντικές παραμέτρους η επίδραση του χρωματισμού σε σχέση με την επίδραση του πεδίου αντήχησης, όπου διαπιστώθηκε η επικράτηση του φαινομένου του χρωματισμού.

Ευχαριστίες

Ο κ. Κωνσταντίνος Καλέρης ευχαριστεί την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την υποστήριξη αυτής της ερευνητικής εργασίας

4. Παραπομπές

- [1] P. Rubak, "Coloration in Room Impulse Responses", Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004, 8-10 June 2004, Mariehamn, Åland, pp. 1-14
- [2] E. Georganti, N. Dillier, J. Mourjopoulos, "Measuring Perception of Coloration due to Early Reflections in Binaural Impulse Response", 7th Forum Acusticum, 7-12 Sept. 2014, Krakow, Poland
- [3] B. Atal et al., "Perception of coloration in filtered gaussian noise-short-time spectral analysis by the ear", Proceedings 4th ICA, Copenhagen 1962.
- [4] A.M. Salomons, "Coloration and Binaural Decoloration of Sound due to Reflections", Ph.D. Thesis, TU Delft, 1995
- [5] D. A. Berkley. "Normal listeners in typical Rooms - Reverberation Perception, Simulation, and Reduction", Acoustical factors affecting hearing aid performance. Pp. 3 -24, G.A.Studebaker, Hochberg (eis.), University Park Press, Baltimore, 1980.
- [6] X. Meynial, O. Vouichard, "Objective Measure of Sound Colouration in Rooms", Acta Acustica united with Acustica, 85, 1, 1999, pp. 101-107 (7)
- [7] K. Meesawat, D. Hammershøi, "An Investigation on the Transition from Early Reflections to a Reverberation Tail in a BRIR", Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan, July 2-5, 2002
- [8] Bang & Olufsen, "Music for archimedes", CD B&O 101, 1992
- [9] O. Lartillot, P. Toiviainen, "A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction from Audio", International Conference on Digital Audio Effects, Bordeaux, 2007.
- [10] Γ. Χριστόπουλος, "Στατιστική ανάλυση του ακουστικού χρωματισμού σε ηχητικά σήματα", Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούλιος 2018.
- [11] E. Georganti, "Modelling, analysis, and processing of room responses and reverberant signals", PhD Thesis, University of Patras, Sept. 2013.

[12] E. Georganti, J. Mourjopoulos, F. Jacobsen, “Analysis of room transfer function and reverberant signal statistics”, *Journal of the Acoustical Society of America* 123 (5), 3761

[13] Ρ. Κωτσάκης, “Εφαρμογή Αλγορίθμων Μηχανικής Εκμάθησης για Εξόρυξη και Κατηγοριοποίηση Πληροφοριών Περιεχομένου στα Οπτικοακουστικά Μέσα”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Φεβρουάριος 2015.

Φασματικό κέντρο βάρους:
$$\mu_1 = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} f(k) |X(k)|}{\sum_{k=1}^{N/2} |X(k)|}$$

όπου N ο αριθμός των σημείων του FFT και $f(k)$ και $|X(k)|$ η συχνότητα και το πλάτος του σήματος στο k -οστό σημείο του FFT.

Φασματική διασπορά:
$$\mu_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N/2} (f(k) - \mu_1)^2 |X(k)|}{\sum_{k=1}^{N/2} |X(k)|}}$$

Φασματική κύρτωση:
$$\mu_3 = \frac{1}{\mu_2^3} \frac{\sum_{k=1}^{N/2} (f(k) - \mu_1)^3 |X(k)|}{\sum_{k=1}^{N/2} |X(k)|}$$

Φασματική ομαλότητα:
$$\Phi.O. = \frac{N}{2} \frac{\sqrt{\prod_{k=1}^{N/2} P(k)}}{\sum_{k=1}^{N/2} P(k)}$$

όπου $P(k)$ η ισχύς του σήματος στο k -οστό σημείο του FFT.

Φασματική εντροπία:
$$H(X) = - \sum_{k=1}^{N/2} p(k) \log_2 p(k)$$

όπου $p(k) = \frac{P(k)}{\sum_{k=1}^{N/2} P(k)}$.

Φασματική τυπική απόκλιση:
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\frac{N}{2} - 1} \sum_{k=1}^{N/2} (X(k) - \bar{X}(k))^2}$$

όπου $\bar{X}(k) = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2} X(k)$ και $X(k)$ το πλάτος του σήματος σε dB στο k -οστό σημείο του FFT.

Συντελεστές MFCC:
$$C_j = \sum_{i=1}^M X_i \cos \left(j \left(i - \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{M} \right)$$

όπου $j = 1, 2, \dots, J$ οι συντελεστές MFCC που υπολογίζονται, M ο αριθμός των τριγωνικών φίλτρων που εφαρμόζονται στο φασματογράφημα του σήματος για να προκύψει το φάσμα κλίμακας Mel και X_i η λογαριθμικά συμπιεσμένη ενέργεια στην έξοδο του i -οστού φίλτρου.

Χάρτες εντοπισμού ηχητικού ειδώλου για στερεοφωνική αναπαραγωγή σε δωμάτια

Γαβριήλ Καμάρης
Υπ. Διδάκτωρ / Ομάδα τεχνολογίας
ήχου και ακουστικής, Τμήμα
ηλ.μηχανικών & τεχνολογίας
υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών
grkamaris@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής/ Ομάδα τεχνολογίας ήχου
και ακουστικής, Τμήμα
ηλ.μηχανικών & τεχνολογίας
υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών
mourjor@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος χαρτογράφησης της ακρίβειας αναπαραγωγής του ηχητικού ειδώλου σε στερεοφωνική διάταξη αναπαραγωγής ήχου. Η διερεύνηση γίνεται σε διαφορετικά δωμάτια με διαφορετικά σετ ηχείων. Βασιζόμενοι σε προηγούμενες μεθόδους που έχουν αναπτύξει οι συγγραφείς, οι χάρτες ενοποιούν τα αποτελέσματα από μία μέθοδο προσδιορισμού της ακρίβειας εντοπισμού του ηχητικού ειδώλου και μίας μεθόδου προσδιορισμού της επιφάνειας ιδανικής ακρόασης. Η μέθοδος βασίζεται στην εκτίμηση της γωνίας άφιξης όλων των πιθανών θέσεων ηχητικού ειδώλου που αναπαράγονται από το ηχοσύστημα, χρησιμοποιώντας ένα αντιληπτικό μοντέλο. Επιπλέον στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνει πρόσθετους χάρτες για καλύτερη κατανόηση του ακουστικού πεδίου στο εκάστοτε σενάριο διερεύνησης. Η μέθοδος αυτή έχει σκοπό την αντικειμενική εκτίμηση της ποιότητας αναπαραγωγής σε δωμάτια.

Stereo Image localization maps for loudspeaker reproduction in rooms

ABSTRACT

A novel approach is proposed for maps illustrating the accuracy of image source position reproduced by stereo systems in various scenarios of listening rooms / loudspeakers. Based on previous work by the authors, the maps unify results derived from an image localization classifier and the sweet spot area metric estimating the direction of arrival angles (DOA) of all potential image source positions reproduced by the system via a perceptual model. The statistical analysis of these maps indicates the skewness and kurtosis of the DOA classification error and hence the consistency and robustness of the image definition along the plane of listener positions. Results utilize such parameter mappings to objectively illustrate the robustness of this qualitative aspect of audio reproduction in rooms.

Εισαγωγή

Εξετάζοντας την εξαιρετικά πολύπλοκη αλληλεπίδραση των ηχείων με τους χώρους αναπαραγωγής του ήχου και τις αντιληπτικές διεργασίες των ακροατών [1] οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει και παρουσιάσει μία μέθοδο αξιολόγησης διαφορετικών ηχοσυστημάτων σε σχέση με την ακρίβεια αναπαραγωγής του ηχητικού ειδώλου, η οποία βασίζεται σε κατηγοριοποίηση αμφιωτικών παραμέτρων [2],[3]. Η μέθοδος μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα αναπαραγωγής στερεοφωνικού ειδώλου των διαφορετικών ηχοσυστημάτων σε δωμάτια με διαφορετική αντήχηση [4] και παράγει χάρτες πρόγνωσης [5] για δύο σημαντικές παραμέτρους της χωρικής αναπαραγωγής ήχου: την ακρίβεια αναπαραγωγής του εικονικού ειδώλου και της περιοχής ιδανική ακρόασης. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει κρουστικές αποκρίσεις που είτε έχουν μετρηθεί είτε έχουν υπολογιστεί από προσομοιώσεις.

1. Μέθοδος

1.1 Πειραματική διάταξη

Η διάταξη αναπαραγωγής που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από ένα στερεοφωνικό σύστημα ηχείων τοποθετημένα είτε σε ανηχώικο χώρο είτε και σε δωμάτια με αντήχηση μέσα από διαδικασία που υλοποιήθηκε με προσομοιώσεις. Τα ηχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση 2m μεταξύ τους και σε ύψος 1.2m από το δάπεδο στραμμένα κατά 30^ο προς τη θέση ιδανικής ακρόασης. Οι πιθανές θέσεις ακρόασης που εξετάζονται, καλύπτουν ένα τετράγωνο πλέγμα (Εικ. 1.4α) σε απόσταση 0.5m μπροστά από τα ηχεία, ακμή πλέγματος $w_{grid} = l_{grid} = 2m$ και βήμα από θέση ακρόασης σε θέση ακρόασης $x_{step} = y_{step} = 0.1m$. Για την προσομοίωση της κατευθυντικότητας των ηχείων έγινε χρήση δεδομένων από αρχεία τύπου CLF ($h_L(t)$ and $h_R(t)$) ενώ για τις κρουστικές αποκρίσεις των χώρων δημιουργήθηκαν λεπτομερή μοντέλα στον H/Y [2]. Για κάθε διαφορετικό σενάριο δωματίου-ηχείων δημιουργήθηκαν 13 διαφορετικές θέσεις ηχητικού ειδώλου με βήμα 5^ο. Τα ηχητικά είδωλα δημιουργήθηκαν με τον νόμο των ημιτόνων (συντελεστές a_L και a_R στις Σχέσεις (1.1)). Για όλες τις θέσεις του πλέγματος υπολογίστηκαν οι αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις (BRIRs) ώστε να εξομοιωθούν τα σήματα $y_L(t)$ και $y_R(t)$ που αναπαράγονται από το δεξί και το αριστερό ηχείο [4] (σχέσεις 1.1 και Εικ. 1.1). Για κάθε θέση ηχητικού ειδώλου και για κάθε πιθανή θέση ακροατή εξετάστηκε η γωνία άφιξης του ηχητικού ειδώλου.

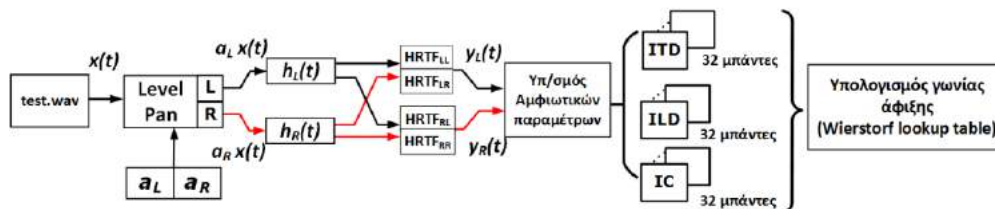
$$y_L(t) = \{ (a_L x(t) * h_L(t)) * HRTF_{LL} + (a_R x(t) * h_R(t)) * HRTF_{LR} \} \quad (1.1\alpha)$$

$$y_R(t) = \{ (a_L x(t) * h_L(t)) * HRTF_{RL} + (a_R x(t) * h_R(t)) * HRTF_{RR} \} \quad (1.1\beta)$$

όπου $y_L(t)$ και $y_R(t)$ τα σήματα που αναπαράγονται από τα ηχεία, a_L και a_R οι συντελεστές κέρδους για την τοποθέτηση του ηχητικού ειδώλου στη στερεοφωνική εικόνα, $h_L(t)$ και $h_R(t)$ είναι οι αποκρίσεις των ηχείων και του χώρου και $HRTF_{XX}$ αντιπροσωπεύουν τις σχετιζόμενες με το κεφάλι συναρτήσεις μεταφοράς.

Το σήμα εισόδου $x(t)$ αποτελούνταν από ριπές λευκού θορύβου και τα τελικά αμφιωτικά σήματα τροφοδοτήθηκαν στο μοντέλο του ακουστικού συστήματος για να υπολογιστούν οι αμφιωτικές παράμετροι ITD, ILD και IC και από αυτές η

«αντιληπτή» γωνία άφιξης των σημάτων όπως υπολογίζεται από κατάλληλο μοντέλο [8].



Εικόνα 1.1 διάγραμμα προσομοίωσης για τον υπολογισμό των αμφιωτικών παραμέτρων.

1.2 Προσομοιώσεις χώρων

Η παρούσα έρευνα εξετάζει και καταγράφει τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει η ακρίβεια εντοπισμού του ηχητικού ειδώλου κατά την αναπαραγωγή ακόμα και διαφορετικού ηχητικού υλικού, η οποία οφείλεται στις διαφορές τις ακουστικής του χώρου, τις ανακλάσεις και των χαρακτηριστικών των ηχείων [2,3]. Τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Όπως έχει αναφερθεί το σενάριο T0 θεωρείται το ιδανικό σενάριο ακρόασης και λαμβάνεται ως το σενάριο αναφοράς. Για την αξιολόγηση οι της επίδρασης των ανακλάσεων στην ακρίβεια πρόσληψης του ηχητικού ειδώλου, κατόπι συγκρίνουμε ένα ιδανικό παραλληλεπίπεδο δωμάτιο ακρόασης τύπου shoebox (σενάριο T1) με ένα αντίστοιχων διαστάσεων πραγματικό δωμάτιο. Και τα 2 αυτά δωμάτια είναι τυπικά οικιακών χώρων ακρόασης και είναι συμβατά με τις οδηγίες ITU ως προς τις διαστάσεις και τον χρόνο αντήχησης. Να σημειωθεί ότι το πραγματικό δωμάτιο παρουσιάζει σχετική ασυμμετρία με μία κολώνα που υπάρχει στη μέση του μήκους του και η οποία είναι καλυμμένη με απορροφητικά υλικά, όπως και ότι περιλαμβάνει κάποια έπιπλα τα οποία συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο [3]. Για το ιδανικό σενάριο T0 χρησιμοποιήθηκαν παντοκατευθυντικές πηγές ενώ στα υπόλοιπα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν ηχεία δύο δρόμων του εμπορίου με χαρακτηριστικά πεδίου εκπομπής βάση αρχείων τύπου CLF [3,6].

Πίνακας 1.1 Τα διαφορετικά σενάρια δωματίου-ηχείων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

	Συνθήκες ακουστικής	Πηγή
T0	Ανηχοϊκό	ιδανική παντοκατευθυντική
T1	ITU παραλληλεπίπεδο (RT=0.25s)	εμπορικά ηχεία
T2	ITU δωμάτιο ακρόασης Παν. Πατρών (RT=0.35s)	εμπορικά ηχεία

1.3 Ανάλυση στερεοφωνικής αναπαραγωγής

1.3.1 Θεωρητική γωνία άφιξης

Οι πιθανές θέσεις ακρόασης και οι θέσεις των ηχείων ορίζονται παραμετρικά ώστε να μπορεί εύκολα ο χρήστης να αλλάζει τη γεωμετρική διάταξη του συστήματος. Από αυτές τις παραμέτρους σχηματίζονται οι πίνακες που περιέχουν τις θεωρητικές και τις «αντιληπτές» γωνίες άφιξης του ηχητικού ειδώλου για κάθε θέση (n_x, n_y) του πλέγματος με τις πιθανές θέσεις ακρόασης και για κάθε θέση του ηχητικού ειδώλου $(x_{img}(n))$. Ο αριθμός των πιθανών θέσεων ακρόασης ($x_{points} * y_{points}$) υπολογίζεται διαιρώντας το μήκος του πλέγματος διά την απόσταση από θέση σε θέση Σχέση 1.2α, 1.2β και Εικ. 1.4α.

$$x_{points} = 1 + w_{grid}/x_{step} \quad (1.2\alpha)$$

$$y_{points} = 1 + l_{grid}/y_{step} \quad (1.2\beta)$$

όπου το w_{grid}, l_{grid} είναι το πλάτος και το μήκος του πλέγματος αντίστοιχα και το x_{step}, y_{step} είναι η απόσταση των θέσεων κατά πλάτος και κατά μήκος Εικ.1.4α. Για τα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα εργασία έχουμε $w_{grid} = l_{grid} = 2m$ και $x_{step} = y_{step} = 0.1 m$. Η μετατόπιση του ηχητικού ειδώλου στον άξονα μεταξύ των ηχείων υπολογίζεται από τη Σχέση 1.3:

$$X_{img} = \sum_{n=1}^{13} (x_{lsp} * (\tan \varphi_{img}(n) / \tan 30)) \quad (1.3)$$

όπου $\varphi_{img}(n)$ μεταβάλλεται με βήμα 5^0 με αποτέλεσμα να σχηματίζει $n = 13$ διαφορετικές θέσης ηχητικού ειδώλου, το διάνυσμα X_{img} περιέχει όλες της τιμές του $x_{img}(n)$.

Για κάθε διαφορετική θέση ηχητικού ειδώλου, ένας διπλός βρόχος επανάληψης υπολογίζει τις σχετικές καρτεσιανές συντεταγμένες x_{rel}, y_{LP} για κάθε πιθανή θέση ακρόασης σύμφωνα με τη σχέση 1.4:

$$\begin{aligned} X_{LP} &= \sum_{n=1}^{13} \sum_{n_x=1}^{x_{points}} (n_x - 1) * x_{step} - w_{grid} \\ X_{rel} &= \sum_{n=1}^{13} X_{LP} - X_{img} \\ Y_{LP} &= \sum_{n=1}^{13} \sum_{n_y=1}^{y_{points}} (n_y - 1) * y_{step} = y_{grid} \end{aligned} \quad (1.4)$$

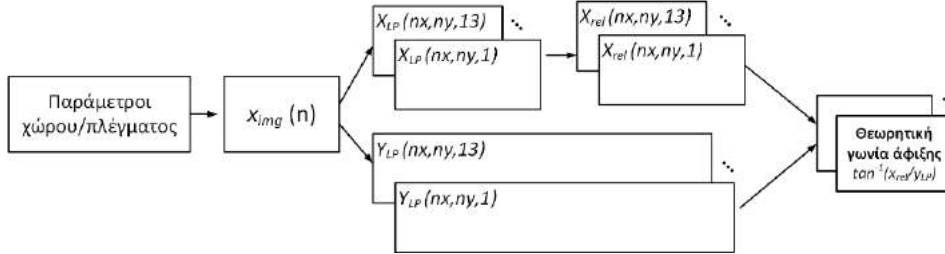
όπου n_x, n_y δηλώνουν την στήλη και την γραμμή της πιθανής θέσης ακρόασης. Οι διαστάσεις των πινάκων X_{rel} και Y_{LP} είναι τελικά $(x_{points}, y_{points}, n)$, και για τη συγκεκριμένη εφαρμογή αυτές είναι (21,21,13).

Η θεωρητική γωνία άφιξης τελικά υπολογίζεται από την αντίστροφη εφαπτομένη:

$$\theta_{int} = \sum_{n_y=1}^{y_{points}} \sum_{n_x=1}^{x_{points}} \tan^{-1} \frac{x_{rel}(n_x, n_y)}{y_{LP}(n_x, n_y)} \quad (1.5)$$

Οι παράμετροι του πλέγματος και των ηχείων φαίνονται στην Εικ 1.4α.

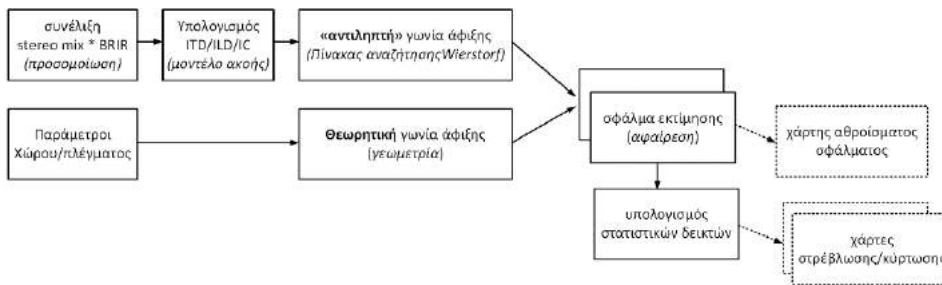
Μία τυπική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που αφορούν τον υπολογισμό της θεωρητικής γωνίας άφιξης φαίνονται στην Εικ. 1.4β. Το μπλοκ διάγραμμα του αλγορίθμου για τον υπολογισμό της θεωρητικής γωνίας άφιξης παρουσιάζεται στην Εικ.1.2



Εικόνα 1.2 Μπλοκ διάγραμμα υπολογισμού της θεωρητικής γωνίας άφιξης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 13 φορές, μία για κάθε θέση ηχητικού ειδώλου.

1.3.2 «αντιληπτή» γωνία άφιξης

Παράλληλα με την προηγούμενη διαδικασία για κάθε διαφορετική θέση ηχητικού ειδώλου οι αμφιοτικές κρουστικές αποκρίσεις των δωματίων συνέλισσονται με τα σήματα διέγερσης (Σχέσεις 1.1 και Εικ 1.1). Αυτά τα αμφιοτικά σήματα αποτελούν την είσοδο στο μοντέλο του συστήματος ακοής του Dietz [8] το οποίο υπολογίζει τις «αντιληπτές» παραμέτρους ITD, ILD και IC. Έπειτα με τη χρήση του πίνακα αναζήτησης του Wierstorf [9] υπολογίζεται η «αντιληπτή» γωνία άφιξης ($\vartheta_{perc}(X_{points}, Y_{points}, n)$) και αποθηκεύεται στον πίνακα θ_{perc} (Εικ. 1.3). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται επίσης σε ένα σχεδιάγραμμα με βέλη κατεύθυνσης Εικ. 1.4γ.



Εικόνα 1.3 διάγραμμα του αλγορίθμου ανάλυσης της θεωρητικής και της «αντιληπτής» γωνίας άφιξης.

1.3.3 εκτίμηση σφάλματος εντοπισμού γωνίας άφιξης

Το σφάλμα εντοπισμού της γωνίας άφιξης (ϑ_{div}) υπολογίζεται με αφαίρεση τις «αντιληπτής» γωνίας άφιξης από την θεωρητική γωνία άφιξης για κάθε θέση του πλέγματος και για κάθε διαφορετική θέση του ηχητικού ειδώλου Σχέση 1.6:

$$\theta_{div} = |\theta_{int} - \theta_{perc}| \tag{1.6}$$

ο πίνακας που περιέχει αυτό το σφάλμα «φιλτράρεται» από ένα κατώφλι μέγιστης επιτρεπόμενης απόκλισης $\vartheta_{crit} = 5^{\circ}$. Κάθε θέση του πλέγματος με μεγαλύτερη απόκλιση θεωρείται ακατάλληλη και απορρίπτεται, Σχέση 1.7:

$$\theta_{TH} = \begin{cases} \theta_{div}, & \vartheta_{div} \leq 5 \\ 0, & \vartheta_{div} > 5 \end{cases} \tag{1.7}$$

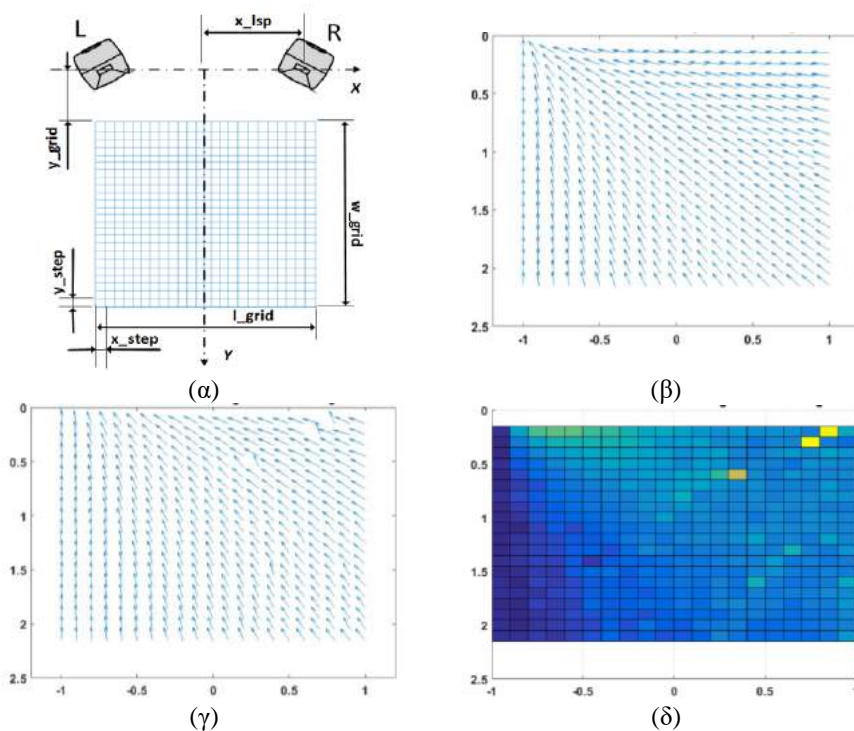
Οπότε σχηματίζεται ένας νέος πίνακας που περιέχει μόνο τις αποδεκτές τιμές για το σφάλμα εντοπισμού και σχηματίζονται 13 διαφορετικοί χάρτες σφάλματος, ένας για κάθε διαφορετική θέση του ηχητικού ειδώλου.

Η στρέβλωση (Σχέση 1.9) και η κύρτωση (Σχέση 1.10) για κάθε θέση του πλέγματος σε σχέση με της διαφορετικές θέσεις του ηχητικού ειδώλου υπολογίζονται από τον πίνακα και σχηματίζουν δύο επιπλέον χάρτες για κάθε διαφορετικό σενάριο χώρου-ηχείων (Tx) που εξετάζεται. Τέλος το συνολικό σφάλμα από τους 13 διαφορετικούς χάρτες σφάλματος συνοψίζεται σε έναν χάρτη που απεικονίζει το άθροισμα του σφάλματος σε κάθε θέση του πλέγματος (Εικ 1.3).

$$S = \sum_{n_y=1}^{y_{points}} \sum_{n_x=1}^{x_{points}} \frac{\frac{1}{13} \sum_{n=1}^{13} (\vartheta_{div} - \overline{\vartheta_{div}})^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{13} \sum_{n=1}^{13} (\vartheta_{div} - \overline{\vartheta_{div}})^2} \right)^3} \quad (1.9)$$

$$K = \sum_{n_y=1}^{y_{points}} \sum_{n_x=1}^{x_{points}} \frac{\frac{1}{13} \sum_{n=1}^{13} (\vartheta_{div} - \overline{\vartheta_{div}})^4}{\left(\frac{1}{13} \sum_{n=1}^{13} (\vartheta_{div} - \overline{\vartheta_{div}})^2 \right)^2} \quad (1.10)$$

όπου $\vartheta_{div}(n_x, n_y, n)$ είναι η τιμή σφάλματος για κάθε n θέση ηχητικής πηγής και $\overline{\vartheta_{div}}(n_x, n_y)$ είναι το μέσο σφάλμα για κάθε διαφορετική θέση ηχητικής πηγής.



Εικόνα 1.4 (α) οι παράμετροι του πλέγματος, (β) Παράδειγμα του διαγράμματος με τα βέλη κατεύθυνσης για την θεωρητική γωνία άφιξης και (γ) για την «αντιληπτή» γωνία άφιξης και (δ) χάρτης σφάλματος εκτίμησης για την ηχητική πηγή στις -30° .

2. Αποτελέσματα

Το σενάριο T0 με ανηχοϊκό δωμάτιο και παντοκατευθυντικές πηγές, θεωρείται το ιδανικό σενάριο αναπαραγωγής και χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η απόδοση της αναπαραγωγής που έχει προβλεφθεί από τον προτεινόμενο αλγόριθμο φαίνεται να ακολουθεί τα αναμενόμενα. Ο χάρτης του αθροίσματος το σφάλματος δείχνει ότι οι καλύτερες θέσεις ακρόασης βρίσκονται πάνω στον κεντρικό άξονα με μία μικρή διεύρυνση στο πίσω μέρος του πλέγματος, όπου οι τιμές της στρέβλωσης είναι επίσης κοντά στο 0 και η κύρτωση πολύ χαμηλή. Ειδικά για το ιδανικό σενάριο T0 (Εικ. 2.1) που εξετάζουμε (Εικ. 2.1α) εδώ είναι φανερό ότι οι καλύτερες θέσεις είναι γύρω από την ιδανική θέση ακρόασης ([2],[3]) και οι χειρότερες θέσεις είναι στην μπροστινή σειρά κοντά στα ηχεία.

Τα αποτελέσματα για το σενάριο T1 όπου εξετάζεται το συμμετρικό παραλληλόγραμμο δωμάτιο ακρόασης (Εικ. 2.2) υποδεικνύουν μία συμμετρική αλλά στενότερη περιοχή συγκριτικά με το σενάριο T0 αλλά πιο απλωμένη όσον αφορά την στρέβλωση και την κύρτωση (Εικ. 2.2β και 2.2γ).

Η ασυμμετρία στο δωμάτιο του σεναρίου T2 επηρεάζει έντονα την στρέβλωση και την κύρτωση (Εικ 2.3) ανεξάρτητα από την θέση της ηχητικής πηγής. Η ασυμμετρία αυτή αποτυπώνεται και στο χάρτη του συνολικού σφάλματος το οποίο είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το συμμετρικό δωμάτιο του T1.

Σε αυτό το σημείο είναι επίσης χρήσιμο να συγκρίνουμε τους προτεινόμενους δείκτες με πιο κλασικούς δείκτες όπως το ιδανικό σημείο ακρόασης που παράγεται από παρόμοια διαδικασία. Οι συγγραφείς, σε προηγούμενες εργασίες τους [2,3] έχουν εξετάσει την περιοχή ιδανικής ακρόασης με τον δείκτη SSA (Sweet Spot Area) με μονάδες μέτρησης τα cm². Όπως φαίνεται στην Εικ. 2.4 η περιοχή ιδανικής ακρόασης είναι πολύ στενή στην ιδανική περίπτωση T0 (Εικ 2.4α) και εξαπλώνεται εμφανώς στην περίπτωση T1 όπου προστίθενται οι ανακλάσεις αλλά παραμένει η συμμετρία (Εικ. 2.4β). Όπως φαίνεται στην Εικ. 2.4γ ο δείκτης SSA σχεδόν υποδιπλασιάζεται καθώς περνάμε από το συμμετρικό δωμάτιο του T1 σε σχέση με το δωμάτιο ακρόασης στο Πανεπιστήμιο Πατρών (T2) που παρουσιάζει παρόμοιο χρόνο αντήχησης αλλά διαφορετικές πρώιμες ανακλάσεις (Εικ 2.4γ). Επίσης η μορφή του συνολικού σφάλματος παρουσιάζει αρκετή ασυμμετρία πράγμα που δηλώνει μία μικρή περιοχή αξιοπιστίας αναπαραγωγής στο πίσω μέρος του πλέγματος.

3. Συζήτηση

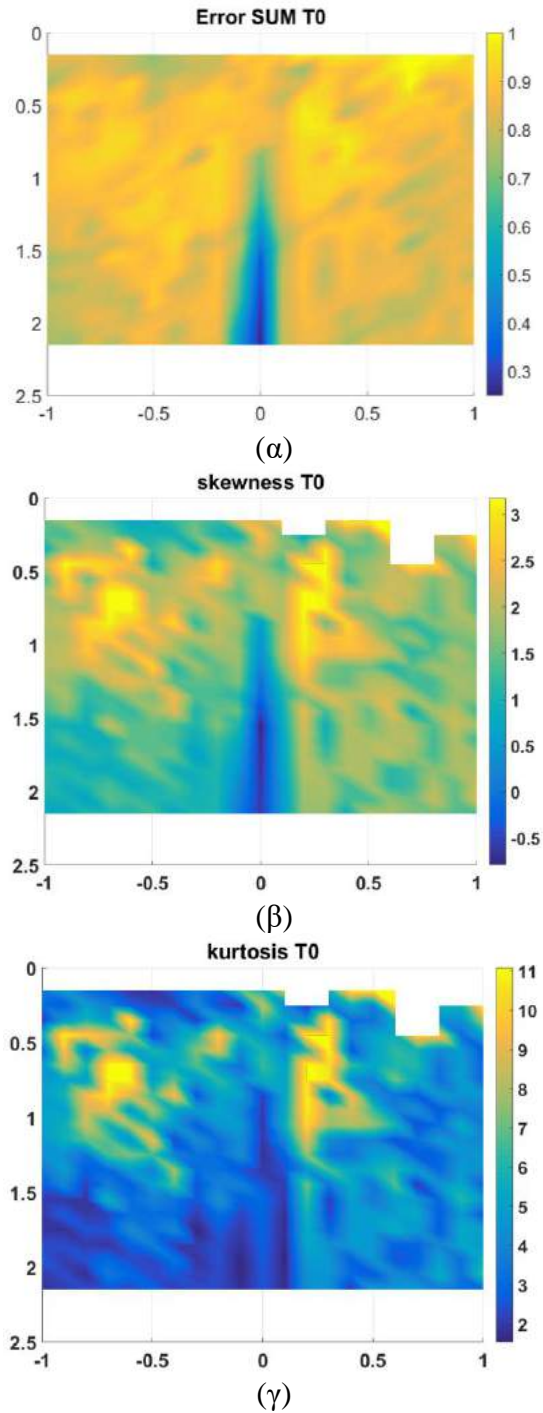
Η ιδέα χρήσης ενός μοντέλου ακοής για την αξιολόγηση σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ του συστήματος αναπαραγωγής ήχου και της ακουστικής του χώρου αναπαραγωγής εξετάζεται εδώ αναλύοντας την πρόβλεψη του σφάλματος εντοπισμού της ηχητικής πηγής για όλες τις πιθανές θέσεις της ηχητικής πηγής που παράγονται από τα ηχεία. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια νέα προσέγγιση με χρήση στατιστικής ανάλυσης για την παραγωγή καθολικών χαρτών που απεικονίζουν απευθείας χωρικά και ποσοτικά την ακρίβεια και αξιοπιστία εντοπισμού του ηχητικού ειδώλου. Επεκτείνει την προηγούμενη μέθοδο που πρότειναν οι συγγραφείς για ανάλυση της περιοχής ιδανικής ακρόασης [2,3] η οποία εξέταζε την αξιοπιστία της στερεοφωνικής αναπαραγωγής μόνο για την κεντρική θέση του ηχητικού ειδώλου. Αυτά τα πρώτα αποτελέσματα μαζί με την ευελιξία της μεθόδου προμηνύουν την ικανότητα της μεθόδου να απεικονίσει ακόμα και μικρές διαφοροποιήσεις στη

γεωμετρία ή στα χαρακτηριστικά των ηχείων πολύ δύσκολο να εξεταστούν με αντικειμενικό τρόπο.

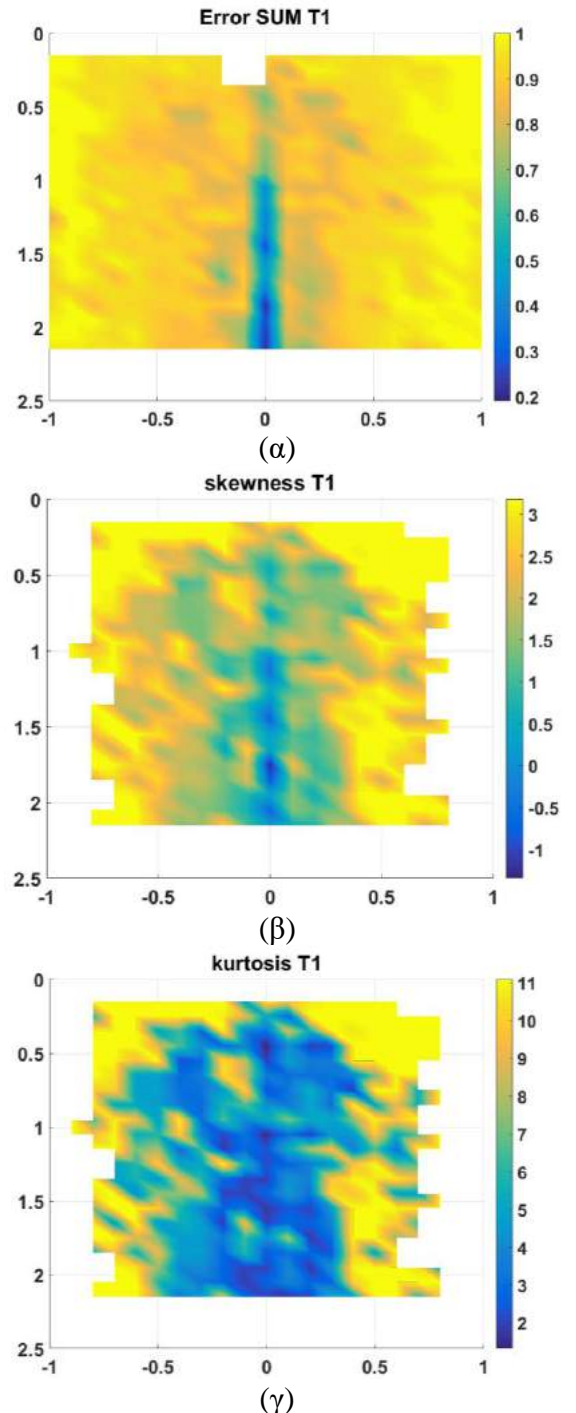
Τέλος, υπάρχουν κάποια σημεία που πρέπει να εξεταστούν περαιτέρω στο μέλλον. Παρά το ότι η αξιοπιστία του μοντέλου ακοής έχει πρόσφατα παρουσιαστεί [9] η καταλληλότητά του πρέπει να εξετασθεί μέσω μετρήσεων κρουστικών αποκρίσεων πάνω στο πλέγμα που εξετάζεται και στους πραγματικούς χώρους. Επίσης πρέπει να διεξαχθούν υποκειμενικά τεστ για την αξιολόγηση της μεθόδου.

4. Αναφορές

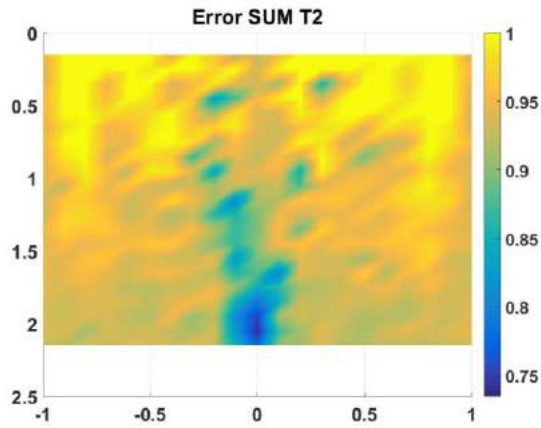
- [1] Toole, F. E. *Sound reproduction: Loudspeakers and rooms*. Taylor & Francis, 2008.
- [2] Kamaris, G., Karlos, S., Fazakis, N., Terpinas, S., & Mourjopoulos, J., "Binaural Auditory Feature Classification for Stereo Image Evaluation in Listening Rooms." *140th Audio Engineering Society Convention*, 2016.
- [3] Kamaris, G., Karlos, S., Terpinas S., Koutsaidis D. & Mourjopoulos, J., "Audio system spatial image evaluation via binaural feature classification" *142th Audio Engineering Society Convention*, 2017.
- [4] CATT-Acoustic v9.0c – www.catt.se
- [5] Harma A., Lokki T., Pulkki V. "Drawing quality maps of the sweet spot and its surroundings in multichannel reproduction and coding." *AES 21st Conference.*, 2002.
- [6] Common Loudspeaker Format www.clfgroup.org
- [7] Dietz M., Ewert S.D., Hohmann V., "Auditory model based direction estimation of concurrent speakers from binaural signals," *Speech Commun.*, vol. 53, no. 5, pp. 592–605, 2011.
- [8] Wierstorf H., Spors S., "Predicting localization accuracy for stereophonic downmixes in Wave Field Synthesis," *Forum Acusticum*, pp. 1–6, 2014.
- [9] J-H Flessner, R. Huber, S. Ewert, "Assessment and Prediction of Binaural Aspects of Audio Quality", *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 65, No. 11, November 2017.



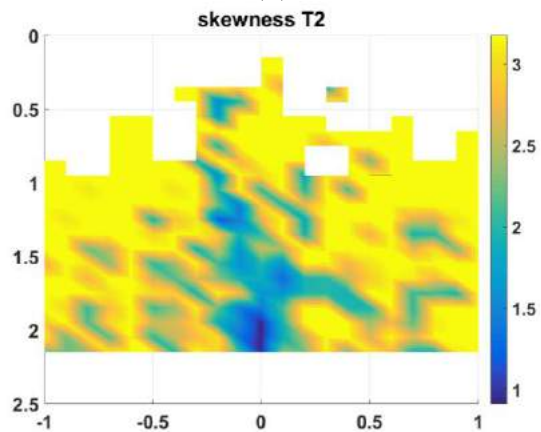
Εικόνα 2.1: Οι χάρτες για το ιδανικό σενάριο T0 (α) άθροισμα σφάλματος (β) στρέβλωση και (γ) κύρτωση



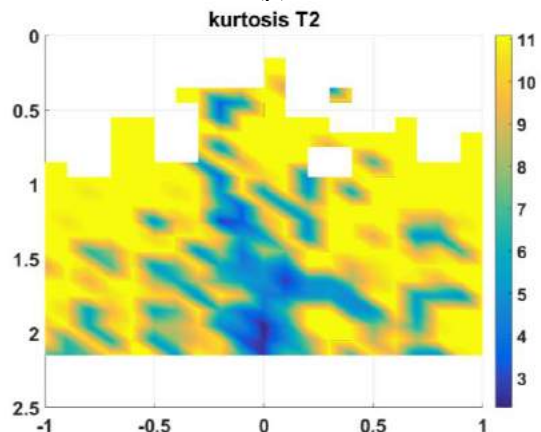
Εικόνα 2.2: Οι χάρτες για το σενάριο T1 (α) άθροισμα σφάλματος (β) στρέβλωση και (γ) κύρτωση



(α)

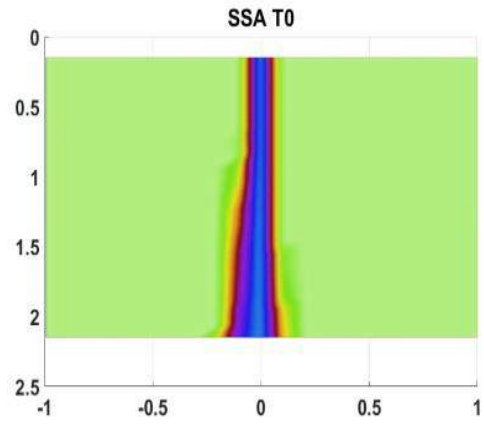


(β)

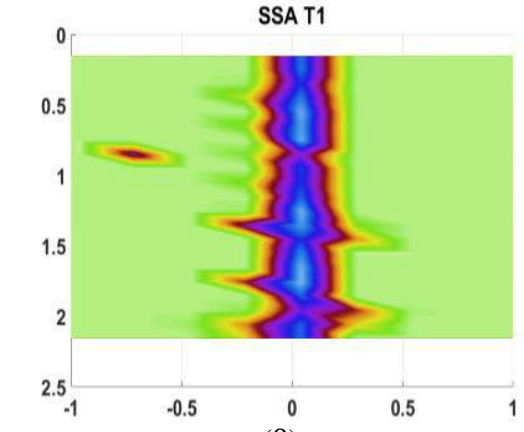


(γ)

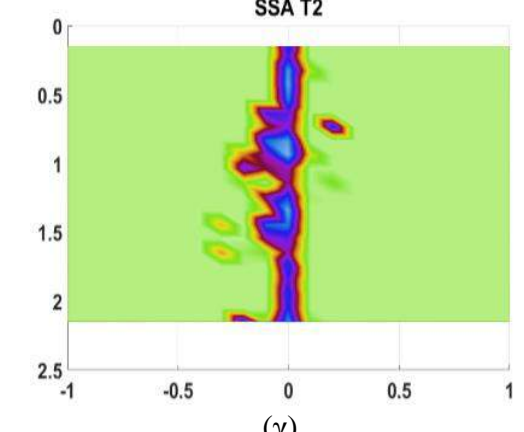
Εικόνα 2.3: Οι χάρτες για το σενάριο T2 (α) άθροισμα σφάλματος (β) στρέβλωση και (γ) κύρτωση



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2.4: Οι χάρτες για την περιοχή ιδανικής ακρόασης (SSA) [3]

**Διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ ακουστικών
προκλητών δυναμικών και ηχητικής στάθμης διέγερσης
με τη χρήση νευρωνικών δικτύων**

Ιορδάνης Θωίδης
Διπ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ
ithoidis@auth.gr

Λάζαρος Βρύσης
Διπ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ
lvrysis@auth.gr

Χρήστος Σεβαστιάδης
Δρ. Μηχ., ΕΔΙΠ ΑΠΘ
csevast@auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου
Δρ. Μηχ., Καθηγητής
ΑΠΘ
pap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ακουστικά προκλητά δυναμικά (ΑΠΔ) αποτελούν τη νευροηλεκτρική απόκριση του νευρικού συστήματος σε ηχητικά ερεθίσματα, αντικατοπτρίζοντας τη λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του. Τα στοιχεία των ΑΠΔ παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα σχετικά με τη μορφολογία τους, ενώ η συσχέτιση τους με τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά των διεγέρσεων αποτελεί το αντικείμενο μελέτης σε αρκετές πρόσφατες έρευνες. Στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάζεται η ανάλυση των ακουστικών προκλητών δυναμικών εγκεφαλικού στελέχους και των μέσων ακουστικών προκλητών δυναμικών 7 ατόμων με φυσιολογική ακοή ως απόκριση σε διεγέρσεις τονικών παλμοριπών. Χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά δίκτυα επιτυγχάνεται η ταξινόμηση των σημάτων σε κατηγορικές κλίμακες ηχητικής στάθμης διέγερσης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και τη δοκιμή του μοντέλου ταξινόμησης αντλήθηκαν από μέρος της έρευνας των Silva & Epstein (2010). Τα αποτελέσματα έδειξαν ακρίβεια με ποσοστό 85.2%, ενώ προτείνεται η περαιτέρω αξιολόγηση της παρούσας μεθοδολογίας σε δεδομένα μεγαλύτερης κλίμακας.

Investigating the relationship between auditory evoked potentials and tone-Burst stimulus intensity with neural networks

ABSTRACT

Early components of the auditory evoked potentials (AEP) reflect the neural processing of acoustic stimuli in the brainstem and the sub-cortical regions. Relating AEP patterns to their stimulus characteristics is a notoriously difficult task, due to the variability of their morphology. In this study, tone-Burst evoked auditory brainstem and middle-latency responses from 7 normal hearing subjects were used to develop a neural network model for the classification of AEPs depending on stimulus intensities. The raw AEP data was obtained from the study of Silva and Epstein (2010). Overall, results from this preliminary study indicate an accuracy of 85.2%, suggesting that the methodology developed should be further tested on larger data sets.

Εισαγωγή

Τα ακουστικά προκλητά δυναμικά (ΑΠΔ) αποτελούν τη νευροηλεκτρική απόκριση του ακουστικού νευρικού συστήματος σε ηχητικά ερεθίσματα, αντικατοπτρίζοντας τη λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του [1, 2]. Η καταγραφή τους αποτελεί μια μη-επεμβατική μέθοδο αντικειμενικής μελέτης του μηχανισμού της ακοής και χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για τη ανάλυση και τη μοντελοποίηση του, ενώ στην κλινική εφαρμογή αποτελεί αντικειμενική μέθοδο διάγνωσης παθολογιών της ακοής [3].

Τα ΑΠΔ κατηγοριοποιούνται με βάση το χρόνο καθυστέρησης από τη στιγμή που εμφανίζεται ένα ηχητικό ερέθισμα. Η απόκριση εγκεφαλικού στελέχους (ABR) αποτελεί το στοιχείο των ΑΠΔ που εμφανίζεται εντός των 10-ms από την εμφάνιση της διέγερσης και αντικατοπτρίζει τη νευροφυσιολογική διαδικασία που λαμβάνει χώρα στον εγκέφαλο και δεν επηρεάζεται από γνωστικές λειτουργίες, λειτουργίες ελλειμματικής προσοχής ή επιδράσεις φαρμακευτικών ουσιών [4]. Η αναπαράσταση των ΑΠΔ στο διάστημα από 12 έως 50-ms αποτελεί τα μέσα ακουστικά προκλητά δυναμικά (AMLR), συγκεκριμένα στοιχεία των οποίων υποδηλώνουν την άφιξη της πληροφορίας στον ακουστικό φλοιό και την εκκίνηση της επεξεργασίας τους.

Τα στοιχεία των ΑΠΔ παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα σχετικά με τη μορφολογία τους, ενώ η συσχέτιση τους με τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά των διεγέρσεων και η αντιστοίχιση τους με τα αποτελέσματα ψυχοακουστικών δοκιμών αποτελεί το αντικείμενο μελέτης σε αρκετές πρόσφατες έρευνες [5, 6]. Για παράδειγμα, οι Korczak et al. [7] μελέτησαν τις ιδιότητες των κυματομορφών ABR και AMLR ως συνάρτηση της ηχητικής στάθμης διέγερσης εκτιμώντας βασικές ιδιότητες στον χρόνο εμφάνισης των χαρακτηριστικών κυμάτων. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην αυτόματη αναγνώριση και το χαρακτηρισμό των όψεων της κυματομορφής ABR, με σκοπό τη χρήση του ως διαγνωστικό εργαλείο ακοομετρικής εξέτασης [8, 9].

Η ανάγκη αξιοποίησης αποτελεσματικότερων μεθόδων στην ανάλυση σύνθετων συστημάτων υπάρχει σε πολλούς τομείς της επεξεργασίας σήματος και σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών και της επιστήμης δεδομένων τα τελευταία χρόνια έχει αναδείξει τα νευρωνικά δίκτυα ως μια από τις επικρατέστερες τεχνικές ανάλυσης και κατηγοριοποίησης δεδομένων. Σε ότι αφορά τα βιοϊατρικά σήματα, τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων δέχονται τα δεδομένα ως πηγαία σήματα από την καταγραφή ενός ή περισσότερων ηλεκτροδίων ή εναλλακτικά ως έναν αριθμό από χαρακτηριστικές παραμέτρους για κάθε δείγμα. Η εξαγωγή χαρακτηριστικών παραμέτρων είναι μια τεχνική ώστε να περιγραφούν οι χρήσιμες ιδιότητες του ηλεκτροεγκεφαλογραμμήματος (HEΓ) [10]. Τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται με σκοπό να απομονωθεί η πληροφορία που περιέχεται στα σήματα HEΓ και σχετίζεται με τη ζητούμενη εγκεφαλική λειτουργία, ενώ παράλληλα απορρίπτεται σημαντικό μέρος του θορύβου καταγραφής και του θορύβου από εξωγενείς πηγές ή άλλα τμήματα του εγκεφάλου.

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να αναγνωρίσει τα πρότυπα που εμφανίζονται στη μορφολογία των αποκρίσεων ΑΠΔ (ABR και AMLR) και να ταξινομήσει τα δεδομένα σε κατηγορικές κλίμακες ηχητικής στάθμης διέγερσης. Τα σήματα κατηγοριοποιούνται με τη χρήση ενός μοντέλου νευρωνικού δικτύου, μετά από τα στάδια προ-επεξεργασίας και εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων.

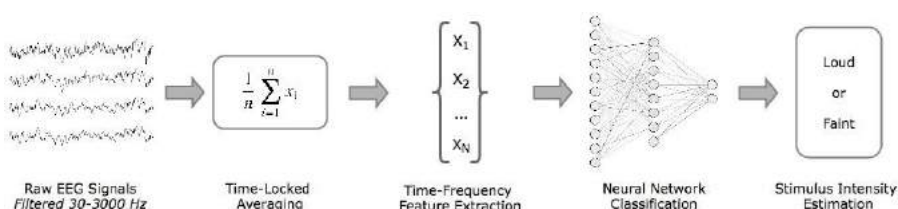
1. Μεθοδολογία

1.1 Σύνολο δεδομένων

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την καταγραφή ΗΕΓ σημάτων από $U = 7$ συμμετέχοντες με φυσιολογική ακοή (ουδοί ακουστότητας ≤ 15 dB HL). Τα δεδομένα αντλήθηκαν από εργασία των Michael J. Epstein και Ikaro Silva [11, 12], η οποία μελέτησε τη σχέση των φυσιολογικών αποκρίσεων του ακουστικού συστήματος (ΑΠΔ και ωτοακουστικές εκπομπές) με την αύξηση της ακουστότητας.

Η διαδικασία καταγραφής των ΑΠΔ που ακολουθείται είναι όμοια με τη διαδικασία αντικειμενικής εξέτασης ουδού ακουστότητας σε κλινικό επίπεδο. Η καταγραφή των σημάτων γίνεται μέσω τριών ηλεκτροδίων (REF: μέτωπο, ACT: ομόπλευρο μαστοειδές, και GND: αντίπλευρο μαστοειδές). Τα σήματα ενισχύονται με λόγο 50,000:1 από την συσκευή GRASS QP511 Quad AC Amplifier (Grass Technologies, West Warwick, RI), ενώ η περιττή πληροφορία απορρίπτεται με την εφαρμογή ενός ζωνοπερατού φίλτρου στην περιοχή των 30-3000 Hz. Η ψηφιοποίηση των σημάτων γίνεται σε συχνότητα δειγματοληψίας τα 48 kHz και ανάλυση 24-bits.

Οι διεγέρσεις αποτελούνται από τονικές παλμοριπές συχνότητας 1-kHz και διάρκειας 4-ms, στους οποίους εφαρμόζεται γκαουσιανό παράθυρο (Gaussian tone-Burst). Ο ρυθμός παρουσίασης των διεγέρσεων ήταν 24 Hz. Για την παρούσα ανάλυση επιλέχθηκαν 148 εγγραφές διάρκειας 41.7-ms (2002 δειγμάτων). Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν δύο τύπους ΑΠΔ που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην αξιολόγηση της ακεραιότητας του ακουστικού νευρικού συστήματος [13] και την υψηλού επιπέδου επεξεργασία στον πρωτοταγή ακουστικό φλοιό [14]: την απόκριση εγκεφαλικού στελέχους (ABR), για το διάστημα των 10-ms από την εμφάνιση της διέγερσης, και τα μεσαία προκλητά δυναμικά (AMLR) στο επόμενο διάστημα.



Σχήμα 1. Μεθοδολογία ταξινόμησης των σημάτων ΑΠΔ.

1.2 Προ-επεξεργασία

Οι αποκρίσεις του ακουστικού νευρικού συστήματος αποτελούν κατά βάση ασθενή ηλεκτρικά δυναμικά και σε μεγάλο βαθμό αποκρύπτονται από την υπόλοιπη εγκεφαλική δραστηριότητα. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να γίνει προ-επεξεργασία των λαμβανόμενων σημάτων, ώστε να συμπιεστεί ο θόρυβος υποβάθρου και να βελτιωθεί ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) πριν εξαχθούν οι χαρακτηριστικές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για τις διαδικασίες ταξινόμησης.

Αρχικά, τα χρονικά-κλειδωμένα σήματα ως προς το ερέθισμα από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις αθροίζονται σύμφωνα με την απλή και ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδο προ-επεξεργασίας (Signal Averaging) (Εξ. 2.1). Επίσης, κάθε σήμα αξιολογείται ως προς την πιστότητα του με την εφαρμογή ενός ορίου απόρριψης σήματος στα 50 uV, για την απόρριψη των παρασιτικών σημάτων.

$$V_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^n S_{i,k} \quad (1.1)$$

Τέλος, η μελέτη της μορφολογίας των ΑΠΔ στην παρούσα εργασία προϋποθέτει την αποφυγή της συσχέτισης τους με το πλάτος των σημάτων που καταγράφηκαν. Έτσι, στο τελικό στάδιο προ-επεξεργασίας εφαρμόζεται κανονικοποίηση (normalization) των σημάτων (Εξ. 1.2) ώστε η κατηγοριοποίηση των αποκρίσεων των ABR και AMLR να εξαρτηθεί από τη μορφολογία των ΑΠΔ και να αποφευχθεί πιθανή συσχέτιση με πλάτος των σημάτων.

$$S_n = \frac{s}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |s_i|^2}{N}}} \quad (1.2)$$

1.3 Εξαγωγή Χαρακτηριστικών Παραμέτρων

Για την απόρριψη του όγκου πληροφορίας που δεν προσφέρει δυνατότητες ταξινόμησης και τον προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών ιδιοτήτων των σημάτων, υπολογίζεται για κάθε σήμα ένας αριθμός από χαρακτηριστικές παραμέτρους (features). Έως τώρα έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος για την εξαγωγή χαρακτηριστικών παραμέτρων ανάλογα με τον τομέα στον οποίο εντάσσονται. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν χαρακτηριστικά που έχουν αποδειχτεί αποδοτικά στην ανάλυση βιοϊατρικών σημάτων, καθώς και κάποια που προέρχονται από τους τομείς ανάλυσης ηχητικού περιεχομένου και δύναται να συνεισφέρουν στην κατηγοριοποίηση των αποκρίσεων του ακουστικού νευρικού συστήματος.

Ένας ιδιαίτερα αποτελεσματικός τρόπος για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων είναι η ανάλυση των σημάτων στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Τα χρονικά χαρακτηριστικά (Temporal Features) υπολογίζονται απευθείας από την κυματομορφή του σήματος, δηλαδή στο πεδίο του χρόνου, ενώ τα φασματικά χαρακτηριστικά (Spectral Features) υπολογίζονται με βάση τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (στην πράξη ο FFT) για κάθε σήμα πριν την εξαγωγή των χαρακτηριστικών. Για τον εντοπισμό των ιδιαιτεροτήτων στα σήματα ΑΠΔ του συνόλου δεδομένων επιστρατεύονται χρονικά χαρακτηριστικά όπως ο ρυθμός μηδενικής διέλευσης (zero-crossing rate), η χρονική κυρτότητα και ασυμμετρία της κατανομής, καθώς επίσης και φασματικά χαρακτηριστικά όπως η φασματική κλίση (slope), η φασματική διασπορά (spread) και η φασματική αντίθεση (contrast) στις διάφορες ζώνες συχνότητας. Από τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων προκύπτει ένα διάνυσμα (Feature Vector) που αντιστοιχεί σε κάθε σήμα και

χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση των ΑΠΔ σχετικά με την ηχητική στάθμη διέγερσης.

1.4 Ταξινόμηση

Οι απαραίτητες υλοποιήσεις για την εκτίμηση της διακριτικής ικανότητας των χαρακτηριστικών παραμέτρων έγιναν με τη βοήθεια της εφαρμογής λογισμικού RapidMiner Studio [15]. Για την επιλογή των κυριότερων χαρακτηριστικών, λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα βάσει τριών διαφορετικών μεθόδων κατάταξης. Σε πρώτο στάδιο, αξιολογήθηκε η σημαντικότητα κάθε χαρακτηριστικής παραμέτρου, βάσει της συσχέτισης της με τη στάθμη του τόνου διέγερσης, κάνοντας χρήση της μετρικής του Κέρδους Πληροφορίας (Information Gain). Σε δεύτερο στάδιο, η κατάταξη των χαρακτηριστικών έγινε ορίζοντας ως βάρη τους συντελεστές ενός υπερεπιπέδου (hyperplane), όπως υπολογίζεται από μια Μηχανή Διανυσματικής Στήριξης (SVM). Τέλος, ακολουθήθηκε μια εξελικτική διαδικασία βελτιστοποίησης ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών παραμέτρων, καταλήγοντας στα πιο εξέχοντα, με τη βοήθεια γενετικού αλγορίθμου.

Η κατηγοριοποίηση των σημάτων έγινε με βάση τη στάθμη των τόνων διέγερσης στις κατηγορικές κλίμακες Loud = {70-100} dB SPL και Soft = {35-60} dB SPL. Η διεξαγωγή των πειραμάτων ταξινόμησης περιλάμβανε την εκπαίδευση και τη δοκιμή ενός μοντέλου νευρωνικού δικτύου, ικανό να προσαρμοστεί στα γενικά πρότυπα της μορφολογίας των σημάτων ΑΠΔ. Υλοποιήθηκε με βάση τα παραπάνω ένα δίκτυο Perceptron ενός κρυφού επιπέδου, με αριθμό κρυφών νευρώνων ίσο με το ημί-άθροισμα νευρώνων εισόδου και εξόδου, και αριθμό βαρών περίπου το 1/10 του αριθμού των δειγμάτων. Επιπρόσθετα, ακολουθώντας συνήθεις κανόνες διαχωρισμού του συνόλου στα επιμέρους εκπαίδευσης και δοκιμής, αξίζει να αναφερθεί πως σε όλες τις δοκιμές ακολουθήθηκε η στρατηγική της 3-πλης διασταυρωμένης επικύρωσης (3-fold cross validation).

2. Αποτελέσματα

Πίνακας 1. Διακριτική ικανότητα χρονικών και φασματικών χαρακτηριστικών παραμέτρων.

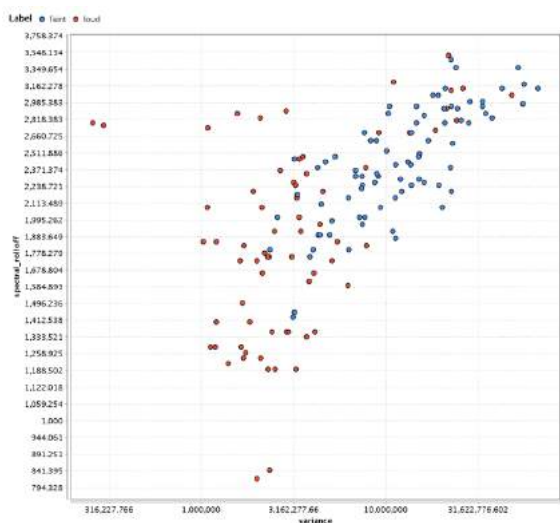
Feature	Weights
Variance	1
Spectral Rolloff	0.826
Bin Power Ratio	0.824
Spectral Bandwidth	0.654
Contrast (120-240 Hz)	0.610
Skewness	0.589
Spectral Flatness	0.557
Zero-crossing rate	0.442
Spectral Centroid	0.204
Spectral Spread	0.187

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι 10 κορυφαίες χαρακτηριστικές παράμετροι, όπως προέκυψαν έπειτα από εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, ώστε να εκτιμηθεί η διακριτική ικανότητα των χαρακτηριστικών παραμέτρων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ακρίβεια με ποσοστό 85.2%. Η αξιολόγηση του μοντέλου ταξινόμησης παρουσιάζεται στον πίνακα σύγκρισης (Πίνακας 2). Υπολογίζονται επίσης οι μετρικές επίδοσης του μοντέλου: αξιοπιστία (Precision) και ανάκληση (Recall). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ο διαχωρισμός του συνόλου δεδομένων κάνοντας ταυτόχρονη χρήση των δύο πιο αποδοτικών χαρακτηριστικών παραμέτρων: Variance και Spectral Rolloff. Συγκεκριμένα, στο δειγματικό χώρο φαίνεται ο μερικός διαχωρισμός των δύο κλάσεων, γεγονός που μαρτυρά τη αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών στην κατηγοριοποίηση των σημάτων. Η απόδοση του μοντέλου βελτιώνεται σημαντικά με τη χρήση των υπολοίπων χαρακτηριστικών και την αύξηση της διάστασης του διανυσματικού χώρου.

Πίνακας 2. Πίνακας σύγκρισης

	True Soft	True Loud	Class Precision
Pred. Soft	66	8	89.2%
Pred. Loud	14	60	81.1%
Class Recall	82.5%	88.2%	



Σχήμα 2. Κατανομή του συνόλου δεδομένων με βάση τις χαρακτηριστικές παραμέτρους Variance και Spectral Rolloff

3. Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναγνωρίσει τα πρότυπα που εμφανίζονται στις αποκρίσεις ΑΠΔ (ABR και AMLR) και να κατηγοριοποιήσει τα δεδομένα ανάλογα με τη στάθμη διέγερσης χρησιμοποιώντας τεχνητά νευρωνικά

δίκτυα, σε μια προσπάθεια ανάλυσης της μορφολογίας των σημάτων ΑΠΔ. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η ανάλυση των χαρακτηριστικών παραμέτρων και η πρόβλεψη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της ηχητικής διέγερσης από την ηλεκτροφυσιολογική απόκριση του ακουστικού συστήματος είναι εφικτή και μάλιστα με ακρίβεια.

Η παρούσα μελέτη προτίθεται να συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού ακοής, καθώς και την επέκταση των εργαλείων και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται σε ερευνητικό επίπεδο για την ανάλυση και την μοντελοποίηση του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος.

4. Αναφορές

- [1] J. W. Hall III, *eHandbook of auditory evoked responses: Principles, procedures & protocols*, Kindle Direct Publishing (2015).
- [2] R.F. Burkard, M. Don & J. J. Eggermont. *The auditory brainstem response, in Auditory Evoked Potentials. Basic Principles and Clinical Application*, 1st ed., ch. 11, sec. 1, pp. 229–230, Lippincott Williams and Wilkins, Baltimore (2007).
- [3] D. Poeppel, T. Overath, A.N. Popper & R.R. Fay. *The Human Auditory Cortex (Springer Handbook of Auditory Research)*, New York (2012).
- [4] K. E. Misulis. *Spehlmann's Evoked Potential Prime*. London (1994).
- [5] D. M. Rasetshwane, A. C. Trevino, J. N. Gombert, L. Liebig-Trehearn, J. G. Kopun, W. Jesteadt, ... & M. P. Gorga «Categorical loudness scaling and equal-loudness contours in listeners with normal hearing and hearing loss». *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4), 1899-1913. (2015).
- [6] C. Borgmann, B. Roß, R. Draganova, & C. Pantev. «Human auditory middle latency responses: influence of stimulus type and intensity». *Hearing research*, 158(1-2), 57-64. (2001).
- [7] P. A. Korczak, L. P. Sherlock, M. L. Hawley & C. Formby. «Relations among Auditory Brainstem and Middle Latency Response Measures, Categorical Loudness Judgments, and Their Associated Physical Intensities». In *Seminars in hearing*. 38(1), pp. 94-114. (2017).
- [8] A. P. Bradley & W. J. Wilson «Automated analysis of the auditory brainstem response using derivative estimation wavelets». *Audiology and Neurotology*, 10(1), 6-21. (2005).
- [9] E. Vannier, O. Adam, J. Motsch «Objective detection of brainstem auditory evoked potentials with a priori information from higher presentation levels». *Artif Intell Med*; 25:283–301. (2002).
- [10] A. Bashashati, M. Fatourechhi, R. K. Ward & G. E. Birch. «A survey of signal processing algorithms in brain–computer interfaces based on electrical brain signals». *Journal of Neural engineering*, 4(2), R32. (2007).
- [11] I. Silva & M. Epstein. «Estimating loudness growth from tone-burst evoked responses». *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(6), 3629-3642. (2010).
- [12] A. Golberger, L. Amaral, L. Glass, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, R. G. Mark, ... & H. E. Stenley. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Component of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*, 101(23), e215-e220 [Circulation Electronic Pages; <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>]. (2000).

[13] F. Musiek & S. Nagle. «The Middle Latency Response: A Review of Findings in Various Central Nervous System Lesions». *Journal of the American Academy of Audiology*. (2018).

[14] S. C. Purdy, A. S. Kelly & M. G. Davies. «Auditory brainstem response, middle latency response, and late cortical evoked potentials in children with learning disabilities». *Journal of the American Academy of Audiology*, 13(7), 367-382. (2002).

[15] RapidMiner - #1 Open source predictive analytics platform", [online] Available: <https://rapidminer.com/>.

A Comprehensive Review of the Factors Affecting Inter-Subject Interaural Time Difference (ITD) Variability

Areti Andreopoulou

Laboratory of Music Acoustics and Technology (LabMAT),
National and Kapodistrian University of Athens, Greece

a.andreopoulou@music.uoa.gr

ABSTRACT

This paper aims at presenting a comprehensive review of the factors affecting HRTF variability, by examining their combined and individual impact on the Interaural Time Difference. The analysis was based on data from the LISTEN, SADIE, and ClubFritz publicly available databases. According to the results, most of these factors caused perceptible ITD variations at least on a subset of the tested azimuth positions, fact which emphasizes the delicate nature of the acoustic HRTF acquisition procedure.

Συνολική Θεώρηση των Παραγόντων που Επηρεάζουν τη Μεταξύ Ατόμων Μεταβλητότητα των Διωτικών Διαφορών Χρόνου (ITD)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν άρθρο προσφέρει μια συνολική θεώρηση των παραγόντων που ευθύνονται για τις μεταβολές που παρατηρούνται μεταξύ διαφορετικών HRTFs, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις Διωτικές Διαφορές Χρόνου (ITDs). Η ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα των βάσεων LISTEN, SADIE και ClubFritz. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι περισσότεροι από τους παράγοντες που αξιολογήθηκαν οδήγησαν σε μεταβολές των ITDs που γίνονται αντιληπτές από τον χρήστη, τουλάχιστον για ένα υποσύνολο των αζιμούθιων γωνιών που εξετάστηκαν, αναδεικνύοντας έτσι την ευμετάβλητη φύση των ακουστικών μετρήσεων HRTFs.

Introduction

Binaural synthesis is based on the use of spatialization cues on monophonic audio streams. Such cues are highly personalized, since they are created by the interaction of sound with an individual's torso, head, and outer ears. They are captured in the Head-Related Transfer Functions (HRTFs), which describe the transformation of sound from a source location to a listener's ears in the free-field.

Under the assumption of linearity and time-invariance, HRTFs can be captured through acoustic measurements. Even though the means for the acoustical HRTF acquisition has existed for several decades, a standardized widely-accepted measurement methodology still remains to be established. Various facilities collect HRTF data based on specifications determined by their individual needs. The lack of consistency in the acquisition process results in HRTF sets of varying spatial resolutions, filter lengths, and sampling rates, originating from databases recorded with different hardware, equipment setups, and measurement protocols. The quantitative impact of such variations on the data has been examined in repeatability studies, which can be divided into intra- and inter-database comparisons.

Intra-database repeatability studies compare multiple instances of HRTF data from the same participants, usually collected in the same measuring space using the same measurement setup and protocol. They can be based on measurements from dummy heads [1, 2] or human participants [3, 4], and examine the combined or individual impact of factors such as the acoustic interference (reflections) from the equipment, the placement of the binaural microphones, participant alignment and/or their accidental movement during measurement, and the use of near-the-head objects (hair, hats, glasses) on the collected data.

Inter-database repeatability studies compare data from the same [5–7] or same-brand binaural dummy head microphones [8], measured in various locations. Such collections expand the above-mentioned pool of possible factors affecting HRTF repeatability to include the effect of measurement space, measurement setup, and protocol. While the results of such studies are of high scientific value, their analysis is heavily impacted by the incompatibility in spatial resolution and processing of the collected data. Often, the need for HRTF post-processing and standardization steps, which may affect the collected data as well, is inevitable [6].

1. Factors affecting HRTF variability

Most factors associated with HRTF variations can be grouped under the following categories. Variations pertinent to:

- *Anthropometry*: HRTFs describe the transformation of sound from a source location to a listener's ears. Differences in people's anthropometry are the primary cause of HRTF variation, and the reason why HRTF data is highly personalized [9].
- *The acoustic measurement space*: HRTFs can be measured in anechoic, semi-anechoic, sound-treated, or any other spaces. While different pre-processing methods such as diffuse-field equalization, and data truncation in the time domain are widely employed as means of room-factor elimination, research has shown that the utilized space can still impact the collected data [5–7].
- *The acoustic measurement setup and protocol*: HRTF databases can be measured from a single [10, 11] or multiple loudspeakers [12, 13] in various configurations. The use of multiple loudspeakers can significantly reduce measurement duration, but requires precise hardware calibration and a complex equalization process. Additional means for reducing capturing time without compromising on spatial resolution is to substitute the direct measurement protocol with more advance techniques, such as the

Measurement via Reciprocity Method [14], the Multiple Exponential Sweep Method (MESM) [15], or the Continuous Measurement Method [16].

- *Binaural microphone fitting*: HRTFs are measured with miniature binaural microphones fitted in various positions in a participant's ears from the entrance to the ear canal to the eardrum, with the blocked meatus method being the least prone to variations [17]. It has been shown that the spectral content of HRTF data can vary by as much as 20 dB for frequencies above 10 kHz, due to changes in binaural microphone placement [1].
- *Participant alignment and posture*: Correct and consistent participant alignment with the measurement setup is crucial for the collection of accurate HRTF data. Nevertheless, in practice, the by-products of participant misalignment are often represented as increased left/right asymmetries in the captured monaural and binaural cues [6]. In addition, HRTFs from human participants cannot be assumed to be free of errors related to accidental movements during the measurement procedure, which may lead to non-linear data distortions [3]. Finally, the choice of posture is of importance as it can impact the spatial resolution of the collected data. HRTFs collected on seated participants cannot easily extend below -40° in elevation, due to the obstruction of the individual's knees and legs. HRTFs collected on standing participants can reach lower elevations, but are more prone to issues related to alignment and accidental participant movement.
- *Participant clothing & near-the-head objects*: Since direction-dependent spatialization cues are created by the interactions of sound with a listener's upper body, head and ears, participant clothing, hair, and accessory items, such as hats and glasses, can influence the high frequency content of the collected data. A systematic investigation of this factor is presented in [2].
- *Data processing*: Several signal processing steps are necessary to extract HRTFs from recorded data, such as deconvolution with the excitation signal, equalization of the equipment characteristics, data truncation etc. The choice of processes used is important as it can impact the resulting HRTF data [6].
- *HRTF post-processing and analysis*: According to research, HRTF variations can be magnified or masked by the algorithms selected for post-processing and analyzing the data. Such choices include but are not limited to the use of any form of data manipulation, such as HRTF smoothing [18], or to the selected means of spatialization cue estimation [19].

2. The study

2.1 Aim

The fidelity of binaural audio content has been shown to be related to the quality of spatialization cues. While it has been established that the use of non-personally measured HRTF data can lead to considerable degradation of the user's spatial experience [9], researchers are still establishing the extent to which several factors pertinent to the capture, pre- and post-processing, and analysis of HRTF data (see Section 1), can impact the perceived spatial accuracy of a given HRTF. This paper

presents an overview of the magnitude of variations introduced in HRTF data by several of the aforementioned factors. For brevity, this work will focus on variations in Interaural Time Difference (ITD).

Considering the limited frequency and spatial resolution of the human auditory system, the perceptual relevance of any observed variations in binaural or monaural cues should always be considered. Differences below the documented thresholds of Just Noticeable Differences (JNDs) are not expected to lead to any perceived changes in spatialization, and can therefore be ignored as perceptually irrelevant. In this work, reported variations in ITD will be cross-referenced with established JND values and relevant results from the literature.

2.2 Data corpora and standardization

Three publicly available HRTF collections were used for this analysis: LISTEN [10], SADIE II [11], and ClubFritz [6]. All 3 are publicly available and follow the SOFA standard [20]. The first two are databases of acoustically measured data on humans, while the latter is a collection of HRTFs measured on the same Neumann KU-100 dummy head in various facilities from around the world. To enable direct comparisons between data, HRTFs were diffuse-field equalized, low-pass filtered at 18 kHz and sample-rate converted to 44.1 kHz. To eliminate level differences between datasets, left, right, and overall root mean square (RMS) values were computed across all data. The median, RMS of each database was used as the reference level, and all datasets were gain adjusted to that common value.

3. Evaluation of ITD variability

The ITD is a fundamental cue for sound localization. It is direction-dependent, with its size varying due to differences in listeners' head-sizes (width, depth, height) and ear offsets. In binaural rendering a miss-matched ITD could lead to increased spatial distortion, if the introduced offset is larger than the established JND values for sound lateralization. Several studies have demonstrated the median plane JND to vary between 2 μ s and 62 μ s depending on the type of stimuli, level, and experimental protocol. JNDs increase with azimuth angle, reaching a maximum around the interaural axis, with values ranging between 70 μ s and more than 200 μ s. For azimuth angles between 0° and 120° the measured median JND values range between 26 μ s and 85 μ s [21, 22]. Any observed ITD deviations beyond these levels should be expected to lead to audible spatial distortion.

Figures 3.1 A & B show comparative plots of the inter-subject horizontal plane ITD variability across all HRTFs in the SADIE and LISTEN databases, estimated using the threshold method. Within each database HRTFs were recorded in the same space using the same experimental setup, protocol, and data processing. Hence, the observed variations have to be attributed to differences in the individual's anthropometry, and their correct and consistent alignment with the measurement setup. As can be seen, inter-subject variations can be as high as $\approx 300 \mu$ s.

Variations are substantially reduced, but still remain above JND thresholds, when subject anthropometry and binaural microphone fitting are kept consistent, while all remaining factors vary. The effect of such conditions can be observed in Figures 3.1 C, which plots the horizontal plane ITD variability in the ClubFritz database,

estimated using the threshold method. The observed variations range between $\approx 30 \mu\text{s}$ and $\approx 100 \mu\text{s}$ for azimuths around the median plane, and reach as high as $\approx 235 \mu\text{s}$ for points around the interaural axis.

When the measurement space is also removed from the equation, ITD variability is further reduced. Figures 3.1 D & E are subsets of the ClubFritz database containing HRTFs collected at the same institution over the course of 10 years and one week, respectively. In the first case, variations reach a maximum of $\approx 110 \mu\text{s}$, and can be due to changes in processing and the measurement equipment. In the latter case, ITD differences are minimal, never exceeding $25 \mu\text{s}$, and can probably be attributed to the misalignment of the dummy head with the measuring equipment.

Finally, it has been demonstrated that the results of many common ITD estimation methods vary significantly, exceeding the known JND thresholds [21]. As can be seen in Figure 3.1 F such variations exceeded $150 \mu\text{s}$ for a single HRTF dataset. The composite of all above observations is summarized in Figure 3.2, which plots the maximum horizontal plane ITD variations of each data collection.

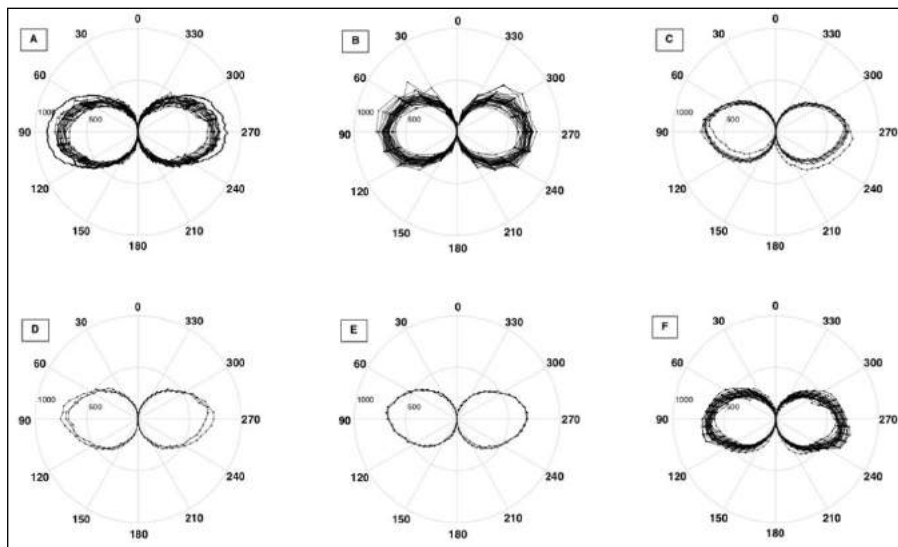


Figure 3.1 Variability over the estimated horizontal plane ITDs of: A) SADIE, B) LISTEN, C) ClubFritz, D) 3 ClubFritz datasets (same institution) measured over 10 years, E) 3 ClubFritz datasets (same institution), and F) different estimation methods, presented in μsecs .

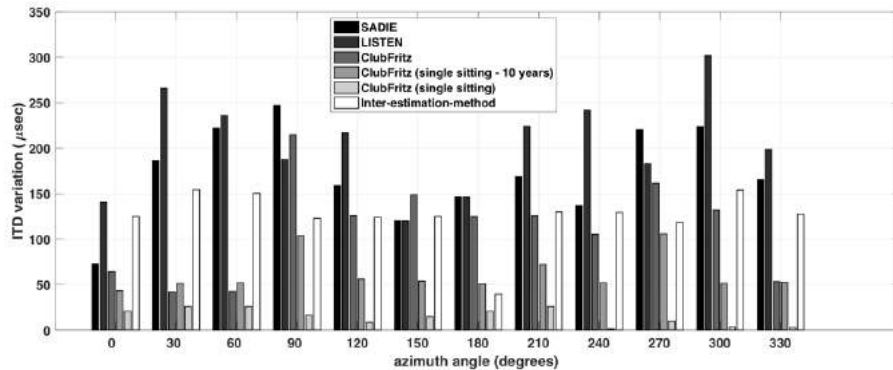


Figure 3.2 Maximum horizontal plane ITD variations in A) SADIE, B) LISTEN, C) ClubFritz, D) 3 ClubFritz datasets (same institution) measured over 10 years, E) 3 ClubFritz datasets, and F) different estimation methods, presented in μsecs .

4. Conclusions

This paper presented an overview of the factors affecting HRTF variability, with an emphasis on ITD. It was demonstrated that even in the most controlled HRTF measurement conditions, when a dummy head was repeatedly measured in a single facility over a few days, the resulting ITD variations of $\approx 25 \mu\text{s}$ were higher than the reported JND values for certain azimuth angles and, hence, noticeable. In addition, ITD variations caused by the measurement space, setup, and protocol should be considered troubling, as they were consistently larger than the corresponding JND values, reaching $\approx 235 \mu\text{s}$, and being more prominent than what one would expect for repeated measurements on a single subject. Inter-method variations in ITD calculation were also found to exceed the known JND thresholds, possibly introducing perceptible spatial distortion, in cases of HRTF processing and/or individualization.

5. References

- [1] K. Riederer, "Repeatability analysis of head-related transfer function measurements," in *105th Aud. Eng. Soc. Conv* (1998).
- [2] G. Wersényi and A. Illényi, "Differences in Dummy-head HRTFs caused by the Acoustical Environment Near the Head," *Electr. J. Technical Acoust.*, **1**, (2005).
- [3] K. Riederer and P. Va, "Effect of Head Movements on Measured Head-Related Transfer Functions," in *18th Intern. Congress on Acoustics ICA* (2004).
- [4] A. Andreopoulou, A. Roginska, and H. Mohanraj, "Analysis of the Spectral Variations in Repeated Head-Related Transfer Function Measurements," in *International Conference in Auditory Displays (ICAD)*, pp. 213–218 (2013).
- [5] B. Katz and D. Begault, "Round Robin Comparison of HRTF Measurement Systems: Preliminary Results," in *19th International Congress on Acoustics (ICA2007)*, pp. 1–6 (2007).
- [6] A. Andreopoulou, D. Begault, and B. Katz, "Inter-Laboratory Round Robin HRTF Measurement Comparison," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, **9**(5), pp. 895–906 (2015).

- [7] R. Barumerli, M. Geronazzo, and F. Avanzini, “Round Robin Comparison of Inter-Laboratory HRTF Measurements – Assessment with an auditory model for elevation .,” in *CIEEE 4th VR Workshop on Sonic Interactions for Virtual Environments (SIVE18)*, pp. 1–5 (2018).
- [8] X. Zhong, X. Xu, and B. Xie, “Auditory Consistency of Head-Related Transfer Functions of Kemar From Different Databases,” in *23rd International Congress on Sound and Vibration*, pp. 1–7 (2016).
- [9] D. Begault, *3-D sound for virtual reality and multimedia*. AP Professional, (1994).
- [10] O. Warusfel. (2003) Listen HRTF database. [Online]. Available: <http://recherche.ircam.fr/equipements/salles/listen/> [Last visited: 21/09/2018].
- [11] G. Kearney and T. Doyle, “An HRTF database for virtual loudspeaker rendering,” in *139th Convention of the Audio Engineering Society*, pp. 1–10 (2015).
- [12] P. Majdak, M. J. Goupell, and B. Laback, “3-D localization of virtual sound sources: Effects of visual environment, pointing method, and training,” *Atten. Percept. Psychophys.*, **72**(2), pp. 445–469 (2010).
- [13] R. Bomhardt, M. de la Fuente Klein, and J. Fels, “A high-resolution head-related transfer function and three-dimensional ear model database,” in *172nd Meeting of the Acoust. Soc. Am.*, **29**, pp. 1–11 (2016).
- [14] D. N. Zotkin, R. Duraiswami, E. Grassi, and N. a Gumerov, “Fast head-related transfer function measurement via reciprocity,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **120**(4), pp. 2202–2215 (2006).
- [15] P. Majdak, P. Balazs, and B. Laback, “Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions,” *J. Audio Eng. Soc.*, **55**(7–8), pp. 623–636 (2007).
- [16] K. Fukudome, T. Suetsugu, T. Ueshin, R. Idegami, and K. Takeya, “The fast measurement of head related impulse responses for all azimuthal directions using the continuous measurement method with a servo-swiveled chair,” *Appl. Acoust.*, **68**(8), pp. 864–884 (2007).
- [17] D. Hammersho/i and H. Mo/ller, “Sound transmission to and within the human ear canal,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**(1), pp. 408–427 (1996).
- [18] A. Andreopoulou and B. F. G. Katz, “Comparing the effect of HRTF processing techniques on perceptual quality ratings,” in *144th Aud. Eng. Soc. Conv.*, pp. 1–8 (2018).
- [19] B. F. G. Katz and M. Noisternig, “A comparative study of interaural time delay estimation methods,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **135**(6), pp. 3530–3540 (2014).
- [20] P. Majdak, Y. Iwaya, and T. Carpentier, “Spatially Oriented Format for Acoustics: A Data Exchange Format Representing Head-Related Transfer Functions,” in *134th Aud. Eng. Soc. Conv.*, (2013).
- [22] A. Andreopoulou and B. F. G. Katz, “Identification of perceptually relevant methods of inter-aural time difference estimation,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **142**(2), pp. 588–598 (2017).
- [23] R. Bomhardt, I. C. Patiño Mejía, A. Zell, and J. Fels, “Required measurement accuracy of head dimensions for modeling the interaural time difference,” *J. Audio Eng. Soc.*, **66**(3), pp. 114–126 (2018).

Μέθοδος μετατροπής στερεοφωνικών ηχητικών σημάτων δύο καναλιών για πολυκαναλική αναπαραγωγή

Δημήτρης Κουτσαΐδης, Γαβριήλ Καμάρης και Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Τεχνολογίας Υπολογιστών,

Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500, Ρίο, Πάτρα.

dkoutsaidis@gmail.com, gpkamaris@upatras.gr, mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μία χαμηλής πολυπλοκότητας μέθοδος μετατροπής στερεοφωνικών ηχητικών σημάτων δύο καναλιών σε πολλαπλά κανάλια για αναπαραγωγή σε πολυκαναλική διάταξη ηχείων. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα σύνθετο στερεοφωνικό μοντέλο από το οποίο γίνεται εκτίμηση των θέσεων και των συντελεστών μετατόπισης των πηγών του σήματος στο οριζόντιο επίπεδο. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση του στερεοφωνικού σήματος και την ανασύνθεση του σε πολυκαναλικό, για surround αναπαραγωγή. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιολογείται μέσω ενός υποκειμενικού ψυχοακουστικού πειράματος.

Λέξεις Κλειδιά: *up-mixing, surround reproduction, primary ambient extraction (PAE), spatial audio.*

A method for up-mixing two channel stereo audio signals for surround sound reproduction

ABSTRACT

In this paper a low-complexity method for up-mixing two channel stereo signals for surround sound reproduction is presented. Based on a common stereo signal model, the panning coefficients and azimuth positions of the sources in the stereo mix are estimated. This information is then being used for the stereo signal decomposition and the re-synthesis to a multichannel signal for surround reproduction. The proposed method is evaluated through a subjective listening test.

Key words: *up-mixing, surround reproduction, primary ambient extraction (PAE), spatial audio.*

Εισαγωγή

Η κλασική στερεοφωνική τυποποίηση παρόλο που αποτελεί ικανοποιητική και ευρύτατα διαδεδομένη διάταξη ακρόασης, εμφανίζει σημαντικούς περιορισμούς σε σχέση με τη ρεαλιστική απόδοση των ηχητικών πηγών [1]. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της τυποποίησης αυτής είναι η αδυναμία της να δημιουργεί μία ρεαλιστική χωρική εμπύθιση ακροατή (*listener envelopment*), καθώς υπάρχουν ηχεία μόνο μπροστά από τον ακροατή κι όχι χωρικά, γύρω από αυτόν. Συνεπώς, μία πολυκαναλική *surround* διάταξη ακρόασης είναι επιθυμητή και αν το υλικό ακρόασης είναι στερεοφωνικό, απαιτείται σύστημα το οποίο να μπορεί να μετατρέψει τις αρχικές μίξεις δύο καναλιών, σε πολυκαναλικές. Η διαδικασία αυτή δημιουργίας επιπρόσθετων καναλιών από υλικό προέλευσης με λιγότερα κανάλια από τα διαθέσιμα ηχεία, ονομάζεται “*up-mixing*”.

Η μίξη των στερεοφωνικών ηχογραφήσεων βελτιστοποιείται για τη συγκεκριμένη διάταξη ακρόασης η οποία αποτελείται από ένα ζευγάρι συμμετρικά τοποθετημένων ηχείων μπροστά από τον ακροατή ενώ για μία πολυκαναλική διάταξη ακρόασης, απαιτείται διαφορετική μίξη των ηχητικών σημάτων. Σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι ξεκάθαρο τι σήμα ή σήματα θα πρέπει να σταλούν στα επιπρόσθετα αυτά κανάλια. Προκειμένου να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί ένα σύστημα το οποίο να αναθέτει σήματα στα επιπρόσθετα κανάλια τα οποία όμως να προέρχονται από τα αρχικά 2 κανάλια της στερεοφωνικής μίξης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη: ο αριθμός και η θέση των ηχείων στην πολυκαναλική διάταξη αναπαραγωγής, ο επιθυμητός βαθμός διατήρησης της θέσης των ειδώλων των πηγών από την αρχική στερεοφωνική μίξη καθώς και ο βαθμός ενίσχυσης των χωρικών συνιστωσών του στερεοφωνικού σήματος.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση μίας νέας μεθόδου “*up-mixing*” και η υποκειμενική αξιολόγηση αυτής μέσω της διεξαγωγής ενός ψυχοακουστικού πειράματος. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει ως στόχο την ενίσχυση της αίσθησης του χώρου και της εμπύθισης της ακρόασης κατά την πολυκαναλική *surround* αναπαραγωγή, διατηρώντας την αρχική στερεοφωνική μίξη με την μικρότερη δυνατή παραμόρφωση στις αρχικές θέσεις των ειδώλων των πηγών.

1. Περιγραφή Μεθόδου

Η διαδικασία του *up-mixing*, απαιτεί τη δημιουργία σημάτων που να προέρχονται μεν από τα αρχικά 2 κανάλια, αλλά θα τροφοδοτήσουν τα επιπλέον περιφερειακά κανάλια της *surround* διάταξης αναπαραγωγής. Έτσι, έχοντας σαν στόχο την ενίσχυση της αίσθησης του χώρου στην τελική *surround* μίξη, θα ήταν χρήσιμο να εξαχθεί από την στερεοφωνική μίξη σήμα που να σχετίζεται με την αντίληψη της αίσθησης του χώρου.

Οι σύγχρονες μέθοδοι ανάλυσης του στερεοφωνικού σήματος οδηγούν σε δεδομένα τα οποία περιέχουν μία στοιχειώδη συνιστώσα που παρέχει πληροφορία για τις θέσεις των ειδώλων που γίνονται αντιληπτές από τον ακροατή στο στερεοφωνικό οριζόντιο επίπεδο και μία χωρική συνιστώσα που παρέχει πληροφορία για την αίσθηση της διάχυσης αυτών των πηγών και των ανακλάσεων τους στο χώρο σύνθεσης του στερεοφωνικού σήματος [3].

Με βάση μία τέτοια ανάλυση, η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε:

1. αποσύνθεση του στερεοφωνικού σήματος σε αυτές τις δύο συνιστώσες

2. ανασύνθεση της στοιχειώδους συνιστώσας, με βάση την εκάστοτε πολυκαναλική διάταξη ηχείων
3. ομοιόμορφη ανακατανομή της χωρικής συνιστώσας σε όλα τα περιφερειακά κανάλια της εκάστοτε πολυκαναλικής διάταξης ηχείων, αξιοποιώντας διάφορες τεχνικές αποσυσχέτισης, για την ενίσχυση της αίσθησης του χώρου κατά τη *surround* αναπαραγωγή

Στην συγκεκριμένη εργασία έχει υλοποιηθεί μία χαμηλής πολυπλοκότητας μέθοδος [2] [3] για εφαρμογή σε 5.1 *surround* διάταξη ηχείων. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης της συγκεκριμένης μεθόδου.

1.1 Αποσύνθεση Στερεοφωνικού Σήματος

1.1.1 Εξαγωγή Στοιχειώδους και Χωρικής Συνιστώσας [3]

Τα στερεοφωνικά σήματα σε 2 κανάλια $x_L[n]$ και $x_R[n]$, περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.1) και (1.2) στο πεδίο του χρόνου και το καθένα σήμα αποτελείται από το στοιχειώδες σήμα $p[n]$ και από το χωρικό σήμα $amb[n]$, όπου n τα δείγματα του ψηφιακού ηχητικού σήματος. Το στοιχειώδες σήμα $p[n]$ μιζάζεται μεταξύ του αριστερού και του δεξιού καναλιού, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές $a_L[n]$ και $a_R[n]$, αντίστοιχα, οι οποίοι περιγράφουν την θέση των πηγών στο στερεοφωνικό επίπεδο (*panning coefficients*). Το χωρικό σήμα του κάθε καναλιού προκύπτει συνελίσνοντας τις κρουστικές αποκρίσεις αποσυσχέτισης, $h_L[n]$ και $h_R[n]$, με το χωρικό σήμα $amb[n]$.

$$x_L[n] = a_L[n] \cdot p[n] + h_L[n] * amb[n] \quad (1.1)$$

$$x_R[n] = a_R[n] \cdot p[n] + h_R[n] * amb[n] \quad (1.2)$$

Το παραπάνω μοντέλο στο πεδίο του χρόνου μπορεί να μετασχημαστεί στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας τον βραχύχρονο μετασχηματισμό *Fourier (STFT)*, όπως στις εξισώσεις (1.3) και (1.4), όπου b και f είναι οι συχνοτικοί δείκτες (*bins*) και οι χρονικοί δείκτες (*frames*), αντίστοιχα.

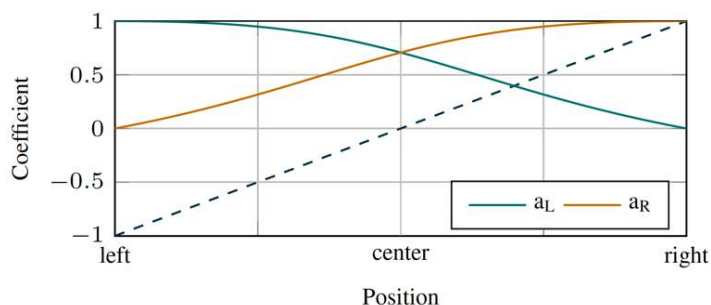
$$X_L(b, f) = a_L(b, f) \cdot P(b, f) + H_L(b, f) \cdot Amb(b, f) \quad (1.3)$$

$$X_R(b, f) = a_R(b, f) \cdot P(b, f) + H_R(b, f) \cdot Amb(b, f) \quad (1.4)$$

Για την παραπάνω αποσύνθεση απαιτείται η εκτίμηση για τους συντελεστές $a_L[n]$ και $a_R[n]$. Όπως είναι γνωστό, κατά τη διαδικασία της παραδοσιακής στερεοφωνικής μίξης [3] οι συντελεστές αυτοί έχουν πραγματικές τιμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 και έτσι επηρεάζουν μόνο το σχετικό πλάτος του αριστερού και δεξιού καναλιού χωρίς να εισάγουν διαφορά φάσης μεταξύ τους. Οποιαδήποτε μετατόπιση φάσης μεταξύ του αριστερού και του δεξιού καναλιού προκαλείται αποκλειστικά από το πρόσθετο χωρικό σήμα *Amb*. Ωστόσο, για τυπικές μίξεις, το πλάτος του χωρικού σήματος *Amb* είναι πολύ μικρότερο από το πλάτος του στοιχειώδους σήματος *P*. Αυτό σημαίνει, λοιπόν, ότι το αριστερό και το δεξί κανάλι είναι επαρκώς προσεγγισμένα από το σταθμισμένο πλάτος του στοιχειώδους σήματος *P*, ενώ η φάση μπορεί να αγνοηθεί, δηλαδή:

$$|X_L(b, f)| \approx a_L(b, f) \cdot |P(b, f)| \quad (1.5)$$

$$|X_R(b, f)| \approx a_R(b, f) \cdot |P(b, f)| \quad (1.6)$$



Σχήμα 1.16 Τυπικές τιμές συντελεστών a_L και a_R κατά τη στερεοφωνική μίξη [3]

Η αναδιάταξη και η επίλυση των εξισώσεων (1.5) και (1.6), δείχνει ότι οι συντελεστές μπορούν να εκτιμηθούν από τις εξισώσεις (1.8) και (1.9). Βασική συνθήκη είναι το άθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών $a_L[n]$ και $a_R[n]$ να κανονικοποιείται στη μονάδα (εξίσωση (1.7)), προκειμένου να επιτευχθεί μια σταθερή ισχύς και ένταση ανεξάρτητα από την θέση των ειδώλων στη μίξη, δηλαδή:

$$a_L^2 + a_R^2 = 1 \quad (1.7)$$

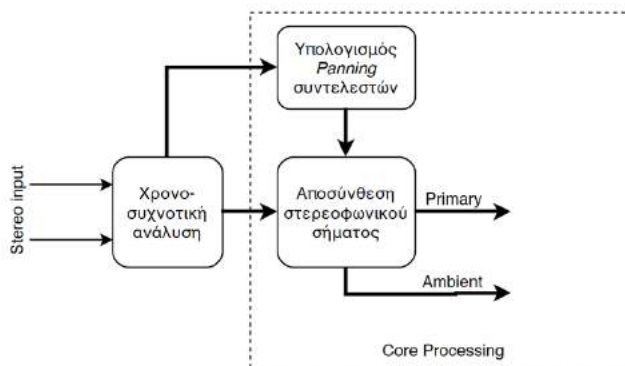
$$a_L(b, f) = \frac{|X_L(b, f)|}{\sqrt{|X_L(b, f)|^2 + |X_R(b, f)|^2}} \quad (1.8)$$

$$a_R(b, f) = \frac{|X_R(b, f)|}{\sqrt{|X_L(b, f)|^2 + |X_R(b, f)|^2}} \quad (1.9)$$

Επιπρόσθετα, επιλύοντας τις αρχικές εξισώσεις (1.3) και (1.4), μπορεί να υπολογισθεί το στοιχειώδες και το χωρικό σήμα, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (1.10) και (1.11). Συνολικά, η παραπάνω αλγοριθμική διαδικασία εξαγωγής της στοιχειώδους και της χωρικής συνιστώσας του αρχικού στερεοφωνικού σήματος, φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα στο Σχήμα 1.2.

$$P(b, f) = \frac{X_L(b, f) \cdot H_R(b, f) - X_R(b, f) \cdot H_L(b, f)}{a_L(b, f) \cdot H_R(b, f) - a_R(b, f) \cdot H_L(b, f)} \quad (1.10)$$

$$Amb(b, f) = \frac{a_L(b, f) \cdot X_R(b, f) - a_R(b, f) \cdot X_L(b, f)}{a_L(b, f) \cdot H_R(b, f) - a_R(b, f) \cdot H_L(b, f)} \quad (1.11)$$



Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου εξαγωγής συνιστωσών στερεοφωνικού σήματος

1.1.2 Μετατροπή Στοιχειώδους Συνιστώσας σε Τρία Κανάλια.

Έχοντας εξάγει από το αρχικό στερεοφωνικό σήμα τη στοιχειώδη συνιστώσα $P(b, f)$, οι στοιχειώδεις συνιστώσες $P_L(b, f)$ και $P_R(b, f)$, για το αριστερό και δεξί κανάλι αντίστοιχα, προκύπτουν από τις εξισώσεις (1.12) και (1.13) χρησιμοποιώντας τους συντελεστές $a_L(b, f)$ και $a_R(b, f)$, δηλαδή:

$$P_L(b, f) = a_L(b, f) \cdot P(b, f) \tag{1.12}$$

$$P_R(b, f) = a_R(b, f) \cdot P(b, f) \tag{1.13}$$

Το στοιχειώδες στερεοφωνικό σήμα πρέπει τώρα να ανατεθεί σε τρία κανάλια, το αριστερό $L(b, f)$, το δεξί $R(b, f)$ και το κεντρικό $C(b, f)$, όπως περιγράφει ο Vickers [4]. Αρχικά, εξάγεται η κοινή πληροφορία του αριστερού και του δεξιού καναλιού του στερεοφωνικού σήματος που αντιστοιχεί στο κεντρικό κανάλι $C(b, f)$, ενώ τα υπολειπόμενα σήματα που θα προκύψουν είναι το αμιγώς αριστερό $L(b, f)$ και δεξί $R(b, f)$ κανάλι, θεωρώντας το παραδοσιακό στερεοφωνικό μοντέλο το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις (1.14) και (1.15):

$$P_L(b, f) = L(b, f) + \sqrt{0.5} \cdot C(b, f) \tag{1.14}$$

$$P_R(b, f) = R(b, f) + \sqrt{0.5} \cdot C(b, f) \tag{1.15}$$

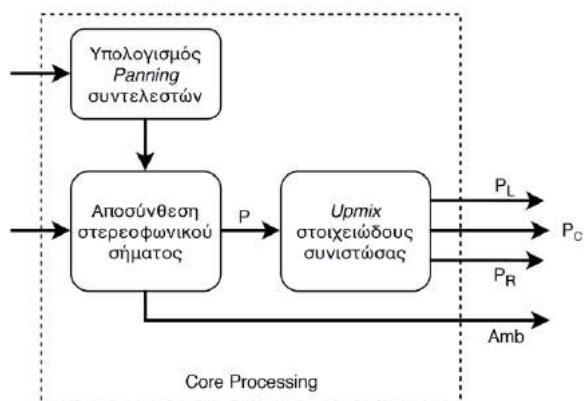
Έτσι, μέσω της εξίσωσης (1.17), υπολογίζεται το μέτρο του σήματος του κεντρικού καναλιού μέσω της εξίσωσης (1.16):

$$|C(b, f)| = \sqrt{0.5} \cdot (|P_L(b, f) + P_R(b, f)| - |P_L(b, f) - P_R(b, f)|) \tag{1.16}$$

$$C(b, f) = \frac{(P_L(b, f) + P_R(b, f)) \cdot |C(b, f)|}{|P_L(b, f) + P_R(b, f)| + \epsilon} \tag{1.17}$$

Προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν διαίρεση με μηδενικό αριθμό κατά τον υπολογισμό του σήματος $C(b, f)$ του κεντρικού καναλιού (εξίσωση (1.17)), προστίθεται στον παρονομαστή ένα πολύ μικρό και θετικό αριθμό, το “ ϵ ”.

Τελικά, μέσω των εξισώσεων (1.14) και (1.15) υπολογίζονται και τα σήματα που αντιστοιχούν στο αμιγώς αριστερό $L(b, f)$ και δεξί $R(b, f)$ κανάλι. Συνολικά, η παραπάνω αλγοριθμική διαδικασία μετατροπής του στοιχειώδους στερεοφωνικού σήματος δύο καναλιών σε τρία κανάλια, φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα στο Σχήμα 1.3.



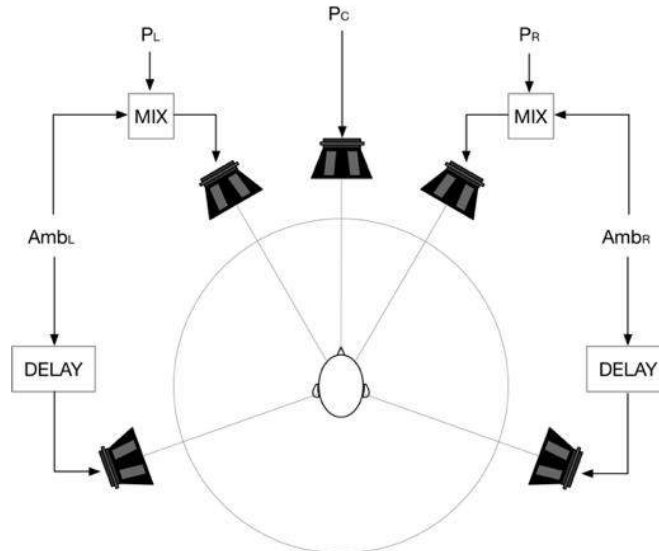
Σχήμα 1.3 Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου μετατροπής στοιχειώδους σήματος σε τρία κανάλια

1.2 Ανασύνθεση Πολυκαναλικού Σήματος

Η διάταξη των καναλιών τα οποία έχουν προκύψει από την διαδικασία αποσύνθεσης του αρχικού στερεοφωνικού σήματος, η οποία αντιστοιχίζεται στα διάφορα κανάλια της πολυκαναλικής *surround* διάταξης ακρόασης, φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Οι στοιχειώδεις συνιστώσες του αρχικού στερεοφωνικού σήματος είναι αυτή που αντιστοιχεί στο αμιγώς αριστερό $L(b, f)$, στο αμιγώς δεξί $R(b, f)$ και στο κεντρικό $C(b, f)$ κανάλι του τελικού πολυκαναλικού σήματος ενώ η χωρική συνιστώσα του αρχικού στερεοφωνικού σήματος $Amb(b, f)$ είναι αυτή που αντιστοιχεί στα περιφερειακά κανάλια του τελικού πολυκαναλικού σήματος.

Το αριστερό και δεξί χωρικό σήμα, $Amb_L(b, f)$ και $Amb_R(b, f)$, παρόλο που έχουν ίδια προέλευση, λόγω των διαφορετικών διαδρομών και ανακλάσεων στον αρχικό χώρο σύνθεσης θα πρέπει να είναι σε κάποιο βαθμό ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Προκειμένου, να αποσυσχετιστεί η χωρική συνιστώσα, $Amb(b, f)$, για να τροφοδοτηθεί στα αριστερά και δεξιά περιφερειακά κανάλια του τελικού πολυκαναλικού σήματος, χρησιμοποιούνται οι αποκρίσεις H_L και H_R [3] των εξισώσεων (1.20) και (1.21). Επομένως, τα αριστερά και δεξιά χωρικά σήματα μπορούν να εκφραστούν ως φιλτραρισμένες εκδοχές του μοναδικού χωρικού σήματος, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις (1.18) και (1.19), αντίστοιχα, στο πεδίο της συχνότητας. Η ανακατασκευή του σήματος στο πεδίο του χρόνου γίνεται με την διαδικασία της σύνθεσης μέσω της επικάλυψης και άθροισης (*Over-Lap & Add, OLA*) των διαδοχικών επικαλυπτόμενων παραθύρων που έχουν προκύψει από

τον αντίστροφο μετασχηματισμό *Fourier* και προκύπτουν τα πέντε σήματα, $p_L[n]$, $p_C[n]$, $p_R[n]$, $Amb_L[n]$ και $Amb_R[n]$ στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 1.4 Διάταξη σύνθεσης πολυκαναλικής ακρόασης

$$Amb_L(b, f) = H_L \cdot Amb(b, f) \tag{1.18}$$

$$Amb_R(b, f) = H_R \cdot Amb(b, f) \tag{1.19}$$

$$H_L = 1 \cdot e^{0 \cdot j} \tag{1.20}$$

$$H_R = 1 \cdot e^{0.6 \cdot \pi \cdot j} \tag{1.21}$$

Για συμπληρωματική αποσυσχέτιση των πίσω περιφεριακών χωρικών σημάτων από τα αντίστοιχα μπροστινά, εισάγεται μία χρονική καθυστέρηση (*delay*) κατά “*d*” δείγματα, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (1.22). Μετά από δοκιμές ακρόασης εκτιμήθηκε ότι καθυστέρηση 15ms είναι κατάλληλη.

$$y[n] = x[n - d], \quad n \geq 0 \tag{1.22}$$

2. Υποκειμενική Αξιολόγηση Αλγορίθμου

2.1 Περιγραφή Ψυχοακουστικού Πειράματος

Για την υποκειμενική αξιολόγηση του αλγορίθμου που έχει υλοποιηθεί, διεξήχθη ψυχοακουστικό πείραμα στο οποίο συμμετείχαν 12 ακροατές οι οποίοι κλήθηκαν να βαθμολογήσουν μια σειρά πολυκαναλικών σημάτων μουσικής. Όλοι οι ακροατές που επιλέχθηκαν ασχολούνται με κλάδους της ακουστικής και μουσικής διαθέτοντας, έτσι, μια εμπειρία και ικανότητα στην ακρόαση και αναγνώριση λεπτομερειών σε ηχητικά σήματα. Για τις ανάγκες διεξαγωγής του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το *open-source* λογισμικό “*webMUSHRA*” [5] βασισμένο στο *web audio API*.

Το ψυχοακουστικό πείραμα ήταν τύπου “MUSHRA” [6]. Οι ακροατές έπρεπε να αξιολογήσουν και να βαθμολογήσουν πολυκαναλικά σήματα μουσικής τα οποία έχουν προκύψει από στερεοφωνικές ηχογραφήσεις δύο καναλιών και στην συνέχεια έχουν μετατραπεί σε πολυκαναλικά χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που έχει υλοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Σκοπός του πειράματος είναι η υποκειμενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου που έχει υλοποιηθεί και τα πλεονεκτήματά του συγκριτικά με τα αρχικά στερεοφωνικά σήματα. Επίσης, τα αποτελέσματα του αλγορίθμου που έχει υλοποιηθεί συγκρίνονται με αυτά που παρέχονται από αρχική υλοποίηση του αλγορίθμου στον σχετικό σύνδεσμο [7]. Με αυτόν τον τρόπο αξιολογήθηκε η παρούσα υλοποίηση του αλγορίθμου σχετικά με την αρχική υλοποίηση που μελετήθηκε [2] [3].

Οι ακροατές βαθμολόγησαν την ποιότητα τριών μουσικών κομματιών σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αναπαραγωγής:

1. την αρχική στερεοφωνική μίξη δύο καναλιών
2. την πολυκαναλική μίξη η οποία έχει προκύψει χρησιμοποιώντας την υλοποίηση του αλγορίθμου της παρούσας εργασίας
3. την πολυκαναλική μίξη η οποία παρέχεται από την αρχική υλοποίηση του αλγορίθμου [2] [3].

Οι ακροατές κλήθηκαν να βαθμολογήσουν τα ηχητικά σήματα με βάσει τέσσερα χαρακτηριστικά τα οποία σχετίζονται με την ακρόαση πολυκαναλικών ηχητικών σημάτων [6]. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

1. εμπύθιση ακροατή (*listener envelopment*)
2. γενική παραμόρφωση σήματος (*signal related artifacts*)
3. ακρίβεια στις θέσεις των ειδώλων στο χώρο (*localization accuracy*)
4. αντιληπτή ηχηρότητα (*perceived loudness*)

Για κάθε ένα από τα τέσσερα χαρακτηριστικά, το πείραμα περιλάμβανε μία δοκιμαστική βαθμολόγηση προκειμένου οι ακροατές να εξοικειωθούν με αυτά και να μπορέσουν στην συνέχεια να τα αναγνωρίσουν και να βαθμολογήσουν με την καλύτερη δυνατή απόδοση. Ο αριθμός των σημάτων που δημιουργήθηκαν ήταν 9 (2 αλγόριθμοι επεξεργασίας και η στερεοφωνική έκδοση για τρία σήματα μουσικής). Οι ακροατές βαθμολόγησαν 3 σήματα μουσικής στις 3 εκδοχές τους από τέσσερις φορές, μία για κάθε χαρακτηριστικό που περιγράφηκε παραπάνω. Συνολικά έγιναν 12 βαθμολογήσεις σε μία κλίμακα που κυμαίνεται από 0 (η χειρότερη βαθμολογία) έως 100 (η καλύτερη βαθμολογία).

Οι ακρόασεις έγιναν μέσω ενός πολυκαναλικού συστήματος 5.1 αποτελούμενο από ηχεία δύο δρόμων με μεγάφωνο χαμηλών συχνοτήτων διαμέτρου 4” και κάρτα ήχου την RME Fireface 800. Η απόσταση των κεντρικών ηχείων μεταξύ τους είναι 2 μέτρα. Ο χώρος αναπαραγωγής ήταν το στούντιο της ομάδας ήχου και ακουστικής του τμήματος Η.Μ. & Τ.Υ. στην Πάτρα. Το δωμάτιο είναι συμβατό δωμάτιο ακρόασης κατά ITU και έχει διαστάσεις περίπου 4x7x2.9m, έχει χρόνο αντήχησης $RT=0.35s$ και είναι άρτια ηχομονωμένο από το εξωτερικό περιβάλλον.

Τέλος, μέσω της στατιστικής ανάλυσης με χρήση ANOVA ελέγχθηκε αν τα παραπάνω κριτήρια είναι στατιστικά σημαντικά στα αποτελέσματά μας ή όχι. Ο στατιστικός έλεγχος έδειξε ότι η σύγκριση των τριών διαφορετικών εκδοχών των μουσικών κομματιών που βαθμολόγησαν οι ακροατές έχει νόημα να εξεταστεί με βάση τέσσερα διαφορετικά χαρακτηριστικά και ότι τα χαρακτηριστικά αυτά είναι στατιστικά σημαντικά για την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

2.2 Αποτελέσματα Ψυχοακουστικού Πειράματος

Ο αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας έχει το μεγαλύτερο μέσο όρο βαθμολογιών για το χαρακτηριστικό που περιγράφει την εμβύθιση του ακροατή, καθώς χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο κέρδος για την χωρική συνιστώσα των πίσω καναλιών της πολυκαναλικής μίξης, συνεπώς αυξάνοντας την αίσθηση του χώρου στον ακροατή.

Όσον αφορά το χαρακτηριστικό που περιγράφει την γενική παραμόρφωση που αντιλαμβάνεται ο ακροατής στα σήματα μουσικής, ο αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας βαθμολογήθηκε χειρότερα από τις δύο άλλες εκδοχές. Κάτι τέτοιο μπορεί να θεωρηθεί λογικό λόγω της αυξημένης έντασης της χωρικής συνιστώσας και συνεπώς του θορύβου που προκύπτει από την όλη επεξεργασία.

Επίσης, παρατηρείται ότι και οι δύο αλγόριθμοι *urmix* έχουν αρκετά καλή ακρίβεια στην αποτύπωση των θέσεων των ειδώλων των πηγών στο οριζόντιο επίπεδο, σε σχέση με αυτές του αρχικού στερεοφωνικού σήματος ενώ ο αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας βαθμολογήθηκε χειρότερα. Κάτι τέτοιο προκύπτει λόγω του αυξημένου κέρδους της στοιχειώδους συνιστώσας για το μπροστά αριστερό και δεξί κανάλι κατά +3dB σε σχέση με το κεντρικό κανάλι και συνεπώς τη μετακίνηση των ειδώλων.

Τέλος, ο αλγόριθμος της εργασίας αυτής έχει την υψηλότερη βαθμολογία όσον αφορά την αντιληπτή ηχηρότητα των μουσικών κομματιών. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο μιας και χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο κέρδος για την χωρική συνιστώσα των πίσω καναλιών.

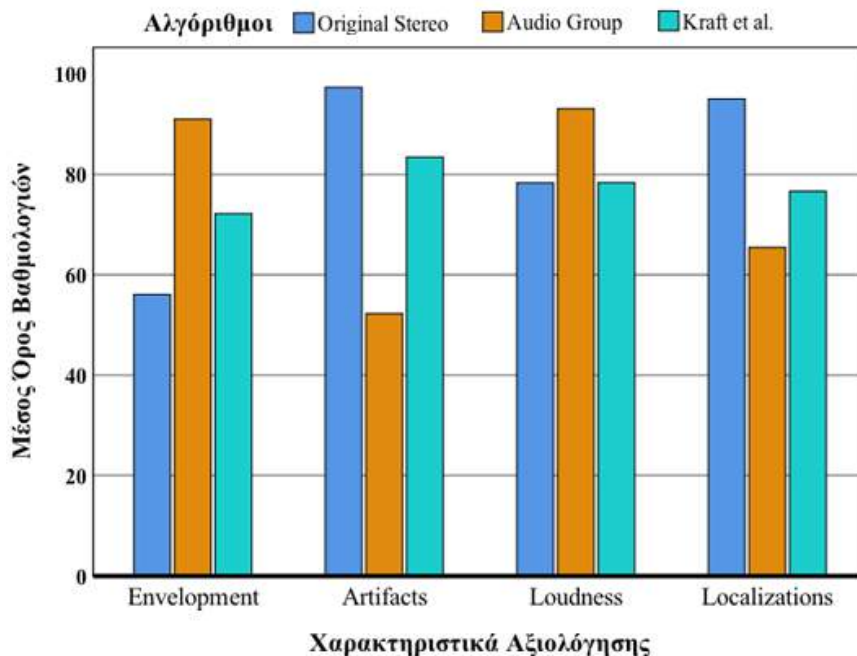
Συνολικά, όλα τα παραπάνω αποτελέσματα για τους μέσους όρους των βαθμολογιών δίνονται στο Σχήμα 2.1.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία νέα μέθοδος μετατροπής στερεοφωνικών σημάτων δύο καναλιών σε περισσότερα κανάλια για πολυκαναλική *surround* αναπαραγωγή. Για την αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, διεξήχθη ένα ψυχοακουστικό πείραμα στο οποίο συμμετείχε ένα πλήθος ακροατών, οι οποίοι κλήθηκαν να βαθμολογήσουν με βάση τέσσερα αντιληπτικά χαρακτηριστικά ποιότητας του σήματος που προέκυψε.

Από την εργασία προκύπτει η δυνατότητα αποσύνθεσης ενός στερεοφωνικού σήματος σε δύο συνιστώσες, την στοιχειώδη και την χωρική, χρησιμοποιώντας μία εκτίμηση των θέσεων των ειδώλων στην στερεοφωνική μίξη καθώς και των συναρτήσεων αποσυσχέτισης που συνδέουν το αριστερό με το δεξί κανάλι. Έτσι είναι δυνατόν να ανασυντεθούν οι παραπάνω συνιστώσες σε περισσότερα κανάλια για αναπαραγωγή σε πολυκαναλική *surround* διάταξη ακρόασης.

Τα αποτελέσματα του ψυχοακουστικού πειράματος έδειξαν ότι ο αλγόριθμος της συγκεκριμένης εργασίας έχει αρκετά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αυξημένη αίσθηση του χώρου που προκαλεί στον ακροατή καθώς και της συνολικής ηχηρότητας που αντιλαμβάνεται αυτός από την συνολική *surround* ακρόαση αν και οι παραμορφώσεις που προκύπτουν λόγω επεξεργασίας γίνονται αντιληπτές, σε αποδεκτά όμως επίπεδα.



Σχήμα 2.1 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ψυχοακουστικού πειράματος

4. Αναφορές

- [1] F. E. Toole *Sound reproduction: Loudspeakers and rooms* Taylor & Francis, (2008)
- [2] S. Kraft και U. Zölzer «Low-Complexity stereo signal decomposition and source separation for application in stereo to 3D upmixing» Audio Engineering Society 140th Convention (2016)
- [3] S. Kraft και U. Zölzer «Stereo Signal Separation and Upmixing by Mid-Side Decomposition in the Frequency Domain» Proc. of the 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (2015)
- [4] E. Vickers «Frequency-Domain Two- to Three-Channel Upmix for Center Channel Derivation and Speech Enhancement» Audio Engineering Society 127th Convention (2009)
- [5] M. Schoeffler «webMUSHRA - A Comprehensive Framework for Web-based Listening Tests» Journal of Open Research Software 6(1), pp 8 (2018)
- [6] S. Bech και N. Zacharov *Perceptual Audio Evaluation - Theory, Method and Application* John Wiley & Sons Ltd (2006)
- [7] S. Kraft και U. Zölzer «Upmix from Stereo to Multi-Channel Formats», <https://www.hsu-hh.de/ant/en/upmix-from-stereo-to-multi-channel-formats>

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 10: Κτιριακή Ακουστική I

Χώροι αναπαράστασης στον Βόλο : διερεύνηση της ακουστικής συμπεριφοράς και παρεμβάσεις βελτίωσης.

Πέτρος Φλαμπούρης
Αρχιτέκτων Μηχανικός MSc
petrosflampouris@gmail.com

Νίκος Μπάρκας
Καθηγητής TAM-ΔΠΘ
nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πεδίο της έρευνας είναι η πόλη του Βόλου, που δεν διαθέτει μία κεντρική σκηνή, αλλά μόνο μικρού μεγέθους, δημόσια πολιτιστικά κτίρια, διάσπαρτα στον αστικό ιστό. Η παρούσα επιχειρεί να συνοψίσει την μεθοδολογία και τα κριτήρια αξιολόγησης των υφιστάμενων χώρων αναπαράστασης στην πόλη. Παράλληλα προχωρά στη διερεύνηση και αξιολόγηση (μελέτη case-study) της αίθουσας στην παλιά Ηλεκτρική Εταιρεία με στόχο την πρόταση ενός συνόλου επιλύσεων αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού, στην ευρύτερη κατεύθυνση κατάστροφης μιας μεθοδολογία παρεμβάσεων σε αίθουσες και σκηνικές διατάξεις αντίστοιχης τυπολογίας.

Community performance spaces in Volos: Investigating and evaluating acoustic qualities and suggesting acoustical interventions

ABSTRACT

The area of research is the city of Volos. A city lacking in a main theatrical stage, but with several community performance stages of smaller scale scattered in the urban fabric. The present paper attempts to summarize the methodology and criteria for assessing existing performance halls in the city. At the same time, it investigates and evaluates the case-study of the old Electric Company hall with the aim of proposing a set of architectural and acoustical design solutions for the space, further resulting in a design and methodology interventional strategy that can be applied to similar halls and stages of the corresponding typology.

Εισαγωγή

Η προτεινόμενη ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης έρευνας που εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Master Thesis [1] στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων του Πανεπιστημίου Strathclyde της Γλασκώβης (2016-17) κι επιχειρεί να διερευνήσει την επάρκεια του Βόλου σε δημόσιους χώρους αναπαράστασης, σε συνδυασμό με την αξιολόγηση της λειτουργικής ευελιξίας και της ακουστικής συμπεριφοράς των υφιστάμενων χώρων για την εξυπηρέτηση ενός σύνθετου φάσματος πολιτιστικών λειτουργιών. Παράλληλα η ανακοίνωσή επιθυμεί να συμβάλει στην κατάσρωση μιας μεθοδολογίας ακουστικών επεμβάσεων με σκοπό την αποσαφήνιση των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών που αφορούν το σχεδιασμό χώρων πολιτισμού αντίστοιχης τυπολογίας. Κατά τη διεξαγωγή της έρευνας μελετήθηκαν οι γενικοί παράμετροι σχεδιασμού χώρων ακουστικών απαιτήσεων, όπως οι θεατρικές διατάξεις, το λειτουργικό πρόγραμμα και η χωρητικότητα, η προσπέλαση, η ηχοπροστασία, ο οπτικός-ακουστικός σχεδιασμός και η ακουστική διόρθωση [2] [3]. Ιδιαίτερα όσον αφορά την κατανομή των υλικών (ανακλαστικών/απορροφητικών) και τις κατασκευαστικές διατάξεις των εσωτερικών επενδύσεων, έγινε προσπάθεια να προσεγγιστούν από την αρχιτεκτονική σκοπιά [4], συνδυάζοντας το ακουστικό με το αισθητικό αποτέλεσμα.

Η κατάσρωση της αρχικής έρευνας περιλάμβανε την επιλογή των κριτηρίων για τον ποιοτικό έλεγχο των ακουστικών και λειτουργικών υποδομών σε έξι (6) επιλεγμένους χώρους του Βόλου. Σε πρώτη προσέγγιση οργανώθηκε μια δειγματοληπτική έρευνα με ερωτηματολόγια, τα οποία διακινήθηκαν ανάμεσα σε συντελεστές τοπικών πολιτιστικών δράσεων και θεατές/ακροατές. Η αποδελτίωση τους εμφάνισε μια προβληματική έως ελλιπή ακουστική άνεση και κατ' επέκταση ανέδειξε την αναγκαιότητα βελτίωσης της ακουστικής και των σκηνικών υποδομών της πόλης. Σε δεύτερη προσέγγιση αξιολογήθηκαν οι έξι (6) χώροι του δείγματος με βάση τα εξής χαρακτηριστικά [5]:

- η τυπολογία σε συνδυασμό με το λειτουργικό πρόγραμμα
- η μορφή / διάταξη του χώρου αναπαράστασης (αξιολόγηση της οπτικής άνεσης)
- η χωρητικότητα (αναλογία της ωφέλιμης επιφάνειας και του όγκου ανά θεατή)
- η προσβασιμότητα πυρασφάλεια (διαστάσεις, πλήθος θυρών και διαδρόμων)
- ο Η/Μ εξοπλισμός (επάρκεια χώρων για μηχανοστάσιο, οδεύσεις κλιματισμού / εξαερισμού, τεχνική υποστήριξη σκηνής, αποθήκευση εξοπλισμού κλπ)
- η ηχομονωτική επάρκεια του κελύφους
- οι βέλτιστες τιμές της αντήχησης (για δεδομένο όγκο κι επιλεγμένες λειτουργίες), η κατανομή και το είδος των ακουστικών επενδύσεων.

Σύμφωνα με τη παραπάνω αξιολόγηση προέκυψε μια εκτίμηση για το κατά περίπτωση εφικτό, λειτουργικό πρόγραμμα και τη βέλτιστη ακουστική λειτουργία του υπό εξέταση χώρου. Στη συνέχεια διερευνήθηκαν διάφορα σενάρια χρήσης, με επεμβάσεις που θα περιλαμβάνουν [5][6] :

- α) την διάδοση του άμεσου ήχου (οπτική χάραξη)
- β) την ενίσχυση του άμεσου ήχου με έγκαιρες ανακλάσεις (χάραξη ανακλαστικών οροφής και τοίχου)
- γ) την αποτροπή ύστερων ανακλάσεων (περιοχές διάχυσης / απορρόφησης)
- δ) τον έλεγχο της αντήχησης (προσδιορισμός των εσωτερικών επενδύσεων ή / και μεταβλητές επενδύσεις διασπαρμένες σε ανακλαστικές /απορροφητικές ζώνες).

1. Το πεδίο της έρευνας

Πεδίο της έρευνας είναι η πόλη του Βόλου (125.000 κάτοικοι), που παρά το μέγεθός της δεν διαθέτει κάποια κεντρική σκηνή, ούτε μια σύγχρονη στέγη για αναπαραστατικές τέχνες, παρά μόνο μικρού μεγέθους δημόσια κτίρια, διάσπαρτα στον αστικό ιστό, που θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν ορισμένου τύπου πολιτιστικά δρώμενα. Σχετικά οι έξι (6) χώροι αναπαράστασης της έρευνά μας είναι:



Σχήμα 1. *Error! No sequence specified.* Η διασπορά των χώρων του δείγματος στην πόλη του Βόλου
1. Δημοτικό Θέατρο, 2. Αχίλλειο, 3. Μεταξουργείο, 4. Πολιτιστικό Ν. Ιωνίας, 5. Μουσικό Σχολείο και 6. Παλιά Ηλεκτρική

-το Δημοτικό Θέατρο Βόλου, σχετικά σύγχρονη κατασκευή από σκυρόδεμα, δυτικά του κέντρου (περίοδος κατασκευής 1972-1989, αρχιτέκτων Π. Τσολάκης). Φιλοξένησε θεατρικές και μουσικές παραστάσεις (1000 θέσεις), αλλά βρίσκεται σε αχρηστία (από το 2008), εξαιτίας κυρίως στατικών προβλημάτων [7],

-το «Αχίλλειο» παλιό κινηματοθέατρο από σκυρόδεμα, στο παραλιακό μέτωπο της πόλης (1925 αρχιτέκτων Κ. Αργύρης). Επαναλειτουργεί (από το 1998) και φιλοξενεί (250 θέσεις) κινηματογραφικές προβολές και μικρής κλίμακας, θεατρικές παραστάσεις [8],

-το Μεταξουργείο, παλιό υφαντουργείο (1924-1955, των αδελφών Εκμετζόγλου), κατασκευασμένο από φέρουσα τοιχοποιία στη Νέα Ιωνία. Από το 1995 ένα τμήμα του στεγάζει αίθουσα με μικρή σκηνή και με δυνατότητα κινηματογραφικών προβολών (140 θέσεις), χωρίς ακουστικές προδιαγραφές,

Συγκρίσεις χρήσεων και καταλληλότητας						
	Δημοτικό Θέατρο Βόλου	Αχίλλειο	Μεταξουργείο	Πολιτιστικό Κέντρο Νέας Ιωνίας	Αίθουσα Μουσικού Σχολείου	Παλιά Ηλεκτρική
μουσική	-	X-	-	+	X-	X+
θέατρο	-	X+	X-	+	-	X+
προβολές	-	+	X+	-	X-	-
συνέδριο	-	-	X+	-	-	-
εκδηλώσεις	-	-	X-	X+	X-	X-

καταλληλότητα: επαρκής (+), σχετικά επαρκής (X+), σχετικά ανεπαρκής (X-), ανεπαρκής (-)

Πίνακας 1.1 Η αξιολόγηση του δείγματος σύμφωνα με τα κριτήρια της έρευνας [1].

Καταλληλότητα	αίθουσα/σκηνή	θέσεις / χωρητικότητα	Ακουστική υποδομή	Ακουστική συμπεριφορά	βοηθητικοί χώροι	Αναγκαιότητα ακουστικής επέμβασης
1	Δημοτικό Θέατρο Βόλου	1000	μ.δ.	μ.δ.	μ.δ.	μ.δ.
2	Αχίλλειο	250	ΝΑΙ	X+	X+	ΝΑΙ
3	Μεταξουργείο	140	ΌΧΙ	X-	-	ΝΑΙ
4	Πολιτιστικό Κέντρο Νέας Ιωνίας	360	ΝΑΙ	X+	X+	ΌΧΙ
5	Μουσικό Σχολείο	200	ΌΧΙ	-	X+	ΝΑΙ
6	Παλιά Ηλεκτρική	180	ΌΧΙ	X-	X+	ΝΑΙ

καταλληλότητα: επαρκής (+), σχετικά επαρκής (X+), σχετικά ανεπαρκής (X-), ανεπαρκής (-)

Πίνακας 1.2 Τα βασικά χαρακτηριστικά των χώρων του δείγματος [1].

-το Πολιτιστικό Κέντρο Νέας Ιωνίας (κατασκευή 1992-2004), σύγχρονο κτίριο από σκυρόδεμα (400 θέσεις). Φιλοξενεί μουσικές και θεατρικές παραστάσεις, είναι σε καλή κατάσταση και διαθέτει ακουστική μελέτη,

-η αίθουσα συναυλιών του Μουσικού Σχολείου (2004, 200 θέσεις). Κατασκευάστηκε χωρίς ακουστική μελέτη και χωρίς κατάλληλες εσωτερικές επενδύσεις,

-η Παλιά Ηλεκτρική, το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας (από το 1930), από πέτρα και οπλισμένο σκυρόδεμα. Ανακαινίστηκε (2001) ως σύγχρονη αίθουσα αναπαραστάσεων (180 θέσεις), χωρίς ακουστικές προδιαγραφές.

Από την περιγραφή των επιλεγμένων σκηνών του δείγματος φαίνεται πως μόνο το Πολιτιστικό Κέντρο Ν. Ιωνίας, καλύπτει τα παραπάνω κριτήρια αξιολόγησης. Το «Αχίλλειο» πληροί ορισμένα, χωρίς να μπορεί να καλύψει τις λειτουργικές απαιτήσεις ενός χώρου πολλαπλών χρήσεων. Σχετικά επαρκείς ακουστικά (με βάση τους υπολογισμούς του χρόνου αντήχησης), μπορούν να χαρακτηριστούν οι αίθουσες της Παλιάς Ηλεκτρικής και του Μεταξουργείου. Τέλος ανεπαρκής αποδεικνύεται η αίθουσα του Μουσικού Σχολείου Βόλου [5]. Στους Πίνακες 1.1 και 1.2 απεικονίζεται συνοπτικά η αξιολόγηση του δείγματος και τα επιμέρους αρχιτεκτονικά, λειτουργικά και ακουστικά προβλήματα τους. Σύμφωνα με αυτή την αξιολόγηση, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη για βελτιστοποίηση των πολιτιστικών χώρων της πόλης.

2. Η αίθουσα της Παλιάς Ηλεκτρικής Εταιρείας

Ως ενδεικτική ανάλυση (μελέτη case study) επιλέξαμε να παρουσιάσουμε την αίθουσα της Παλιάς Ηλεκτρικής Εταιρείας, της οποίας ο όγκος δείχνει πρόσφορος (καλές αναλογίες όγκου ανά χρήστη, με ανοικτή / κλειστή σκηνή) για τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας και διακεκριμένων ακουστικών ρυθμίσεων για λόγο / μουσική. Ο χώρος διαθέτει επαρκές ύψος για βαθμιδωτή χάραξη των καθισμάτων και ικανές επιφάνειες για τις επιβεβλημένες ηχοαπορροφητικές επενδύσεις.

Η Παλιά Ηλεκτρική (1930) είναι ένα σύμπλεγμα από πετρόκτιστους βιομηχανικούς χώρους και χαμηλές κατασκευές. Η αίθουσα του θεάτρου, στο δυτικό τμήμα του συγκροτήματος, είναι μονόχωρη, διπλού ύψους, από πέτρινη τοιχοποιία ενισχυμένη με σκυρόδεμα, με δοκούς / κολόνες από χυτοσίδηρο και δίρριχτη στέγη ενισχυμένη με μεταλλικούς δοκούς. Τα μεταλλικά παράθυρα καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα της πρόσοψης. Εσωτερικά, το δάπεδο επιστρώθηκε με τιμεντοκονία, ενώ στην οροφή είναι εμφανή τα μεταλλικά στοιχεία και ο Η/Μ εξοπλισμός.

Σε γενικές γραμμές, παρόμοιες με τις προτεινόμενες ακουστικές παρεμβάσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε χώρο αντίστοιχης λειτουργίας και τυπολογίας.

Συνοπτικά, τα σενάρια που μελετήθηκαν για την ανακαίνιση της αίθουσας είναι :

-1ο, για λόγο (1245 m³), σε περιορισμένο όγκο, με χρήση απλών υλικών (κυρίως ξυλεπενδύσεις) για απορρόφηση και ανάκλαση,

-2ο, για λόγο (1610 m³), σε περιορισμένο όγκο, με εμφανή τη δίρριχτη στέγη και τον Η/Μ εξοπλισμό,

-3ο για μεταβλητή αντήχηση (1610 m³), σε περιορισμένο όγκο, με εμφανή τη στέγη και μεταβλητή αντήχηση,

-4ο για μουσική (2245 m³), σε ανεπτυγμένο όγκο, με ψευδοροφή και αναρτημένους ανακλαστές οροφής, χωρίς προσκήνιο.

-5ο για μουσική (2710 m³), σε πλήρη όγκο, με ψευδοροφή και αναρτημένους ανακλαστές οροφής, με εκτεταμένες ηχοαπορροφητικές επενδύσεις,

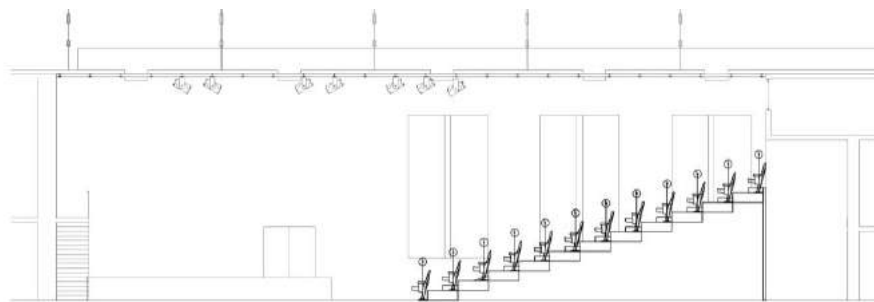
-6ο για μεταβλητή αντήχηση (2245 m³), σε ανεπτυγμένο όγκο, με αναρτημένους ανακλαστές, χωρίς προσκήνιο.

Όπως αποδείχθηκε υπολογιστικά, ορισμένα από τα παραπάνω σενάρια δεν εξασφαλίζουν τις κατάλληλες αναλογίες όγκου / ωφέλιμης επιφάνειας ανά θεατή : [10]

-το 2ο σενάριο υπερβαίνει την βέλτιστη αναλογία όγκου για λόγο,

-το 3ο και το 5ο σενάριο υπερβαίνουν επίσης την βέλτιστη αναλογία όγκου για μουσική, μολονότι η ακουστική διόρθωση τους θα μπορούσε να εξασφαλίσει τον κατάλληλο χρόνο αντήχησης,

-το 4ο και το 6ο σενάριο διαθέτουν μεγάλο όγκο, αλλά η ακουστική διόρθωση τους θα μπορούσε να προσεγγίσει την βέλτιστη αναλογία ανά θεατή και την επιβεβλημένη αντήχηση για ένα πολύ-λειτουργικό χώρο.

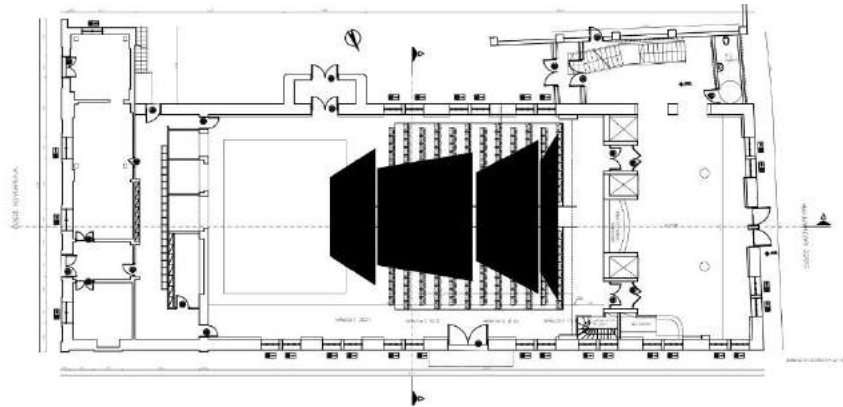


Σχήμα 2.1 Νέα ψαθωτή χάραξη καθισμάτων, με ύψος σκηνικής εξέδρας 60εκ. και κλίση 16 μοιρών [1]

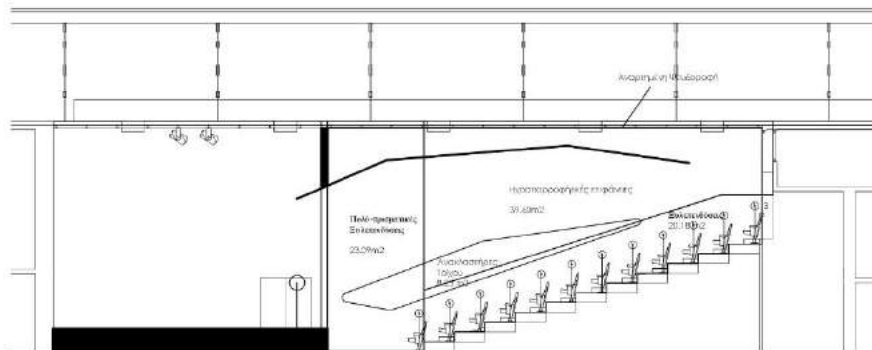
Τελικά, το παραπάνω 1ο σενάριο επιτυγχάνει την επίλυση του συνόλου των απαιτήσεων (όγκου, αντήχησης, διατάξεων) για λειτουργίες λόγου. Αναλυτικά, μελετήθηκαν οι εξής αρχιτεκτονικές / ακουστικές επεμβάσεις [1]:

-εφαρμογή μιας νέας, ψαθωτής διάταξης των καθισμάτων, για την επίλυση της οπτικής χάραξης και την εξασφάλιση του άμεσου ήχου (ύψος σκηνικής εξέδρας 60 εκ. κλίση 16 μοιρών για το βαθμιδωτό των κερκίδων).

-χάραξη ανακλαστήρων οροφής και τοίχου (132 και 16.5μ² αντίστοιχα) για την ενίσχυση του άμεσου ήχου με έγκαιρες ηχο-ανακλάσεις (πετάσματα από φύλλα συμπαγούς γυψοσανίδας στην οροφή και από διάτρητη ξυλεπένδυση στους τοίχους επιφ. βάρους >30Kg) (σχήματα 2.2 και 2.3)



Σχήμα 2.2 Η αίθουσα της Παλιάς Ηλεκτρικής σε άνοψη :
το προτεινόμενο ανάπτυγμα των ανακλαστήρων οροφής [1]



Σχήμα 2.3 Η αίθουσα της Παλιάς Ηλεκτρικής σε αξονική τομή :
το προτεινόμενο ανάπτυγμα των ανακλαστήρων τοίχου [1]

-κατανομή επαρκών διαχυτικών και ηχο-απορροφητικών διατάξεων για την αποτροπή καθυστερημένων ηχο-ανακλάσεων (διαχυτές από πολύ-πρισματικές συνολικής επιφάνειας 203.5μ², στους πλευρικούς τοίχους κοντά στη σκηνή και στις αρχικές σειρές των θεατών, ηχο-απορροφητικές επενδύσεις συνολικά 198 μ² από διάτρητες ξυλεπενδύσεις ή γυψοσανίδες, με εσωτερικό υλικό πλήρωσης ΕΟΠΛ ορυκτοβάμβακα στον πίσω τοίχο, στους πίσω πλάγιους τοίχους και στην υπόλοιπη οροφή της αίθουσας)

-επίσης συν-υπολογίστηκαν καθίσματα με υφασμάτινη στόφα, ενώ για τις επιστρώσεις των δαπέδων προτάθηκαν ξύλινα πατώματα σε δοκίδες ή κολλητά σε σκυρόδεμα (35.3 και 90μ2 αντίστοιχα).

3. Συμπεράσματα

Η έρευνά μας αποσκοπεί στη βελτίωση των ακουστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των απαξιωμένων, δημόσιων πολιτιστικών χώρων του Βόλου. Λόγω της περιορισμένης έκτασης της παρούσας ανακοίνωσης επιλέξαμε να παραθέσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά μιας μελέτης αρχιτεκτονικής ακουστικής, με στόχο την αναβάθμιση κι ανακαίνιση μιας υφιστάμενης αίθουσας αναπαράστασης.

Σε ευρύτερο πλαίσιο, η έρευνα μας επιχειρεί την κατάστρωση μιας μεθοδολογίας αρχιτεκτονικών και ακουστικών επεμβάσεων, για τη λειτουργική κι ακουστική βελτίωση υφιστάμενων χώρων πολιτισμού κι αναπαράστασης, καθώς επίσης και την εκπόνηση ενός απλού κι εύχρηστου εργαλείου, για αρχιτέκτονες και συμβούλους ακουστικής, κατάλληλο για παρεμβάσεις σε χώρους αντίστοιχης τυπολογίας.

Ελπίζουμε ότι η εργασία μας θα συμβάλει στην ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών, αλλά κυρίως θα κατατοπίσει τους έχοντες την ευθύνη λειτουργίας των δημόσιων χώρων πολιτισμού (πρόσωπα, τεχνικές υπηρεσίες και φορείς), στην κατεύθυνση της υιοθέτησης των απαραίτητων κι επιβεβλημένων επεμβάσεων για την επίτευξη της ακουστικής άνεσης σε χώρους αναπαράστασης.

4. Αναφορές

[1] Flampouris, P. «*Investigating and evaluating acoustic qualities in community performance spaces and suggesting acoustical Interventions*», University of Strathclyde, Glasgow (2016)

[2] Izenour, G., Knudsen, V. and Newman, R. «*Theater design*» Yale University Press, NewHaven(1997)

[3] Μπάρκας, Ν. «Μέθοδοι αναπαραστάσεων της ακουστικής λειτουργίας θεατρικών και συναυλιακών χώρων» στο : *Η αναπαράσταση ως Όχημα Αρχιτεκτονικής Σκέψης*, έκδοση Futura, σελ. 426-433, Αθήνα (2006)

[4] Barron, M. «*Auditorium acoustics and architectural design*», Spon Press / Taylor & Francis, London (2010)

[5] Μπάρκας, Ν. «Οργάνωση χώρων πολιτιστικών δραστηριοτήτων σε ιστορικά κτίρια», στο *Ηπιες Επεμβάσεις και Προστασία Ιστορικών Κατασκευών*, έκδοση Ιανός σελ. 399 – 410, Θεσσαλονίκη (2000)

[6] Long, M., Levy, M. and Stern, R. «*Architectural Acoustics*», 1st ed. Elsevier, Burlington (2006)

[7] «Τα θεατρικά του Βόλου», εν *Βόλω* τ.2, σελ. 22-25 / 40-45 (2001)

[8] Εταιρία Θεσσαλικών Ερευνών «*Ο Βόλος και η περιοχή του στην ιστορική τους διαδρομή*», σελ. 326, Βόλος (2004).

[9] Templeton, D. «*Acoustics in the built environment*», Oxford Architectural Press, 2nd ed. (1997)

[10] Τσινίκας, Ν. «*Ακουστικός σχεδιασμός χώρων*» University Studio Pres, 2η έκδοση, Θεσσαλονίκη (2005)

Ακουστική διόρθωση σε συζευγμένους χώρους, μεγάλου όγκου : το στεγασμένο αίθριο στο νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης

Νίκος Μπάρκας
Καθηγητής Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση επιχειρεί να δείξει ότι η αποτελεσματική ακουστική διόρθωση ενός χώρου με συζευγμένους όγκους (μέσω της πρόβλεψης και της διασποράς ζωνών ηχοαπορρόφησης, χωρίς μεγάλη βλάβη των αρχιτεκτονικών προθέσεων) δύναται να επιτύχει στόχους δυσκολότερους από την αποτελεσματική καταστολή της αντήχησης στον εκτεταμένο και ποικιλόμορφο χώρο συγκέντρωσης και εξυπηρέτησης κοινού μιας δημόσιας υπηρεσίας. Σκοπός της ακουστικής διόρθωσης του αίθριου στο νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης ήταν ο ραγδαίος περιορισμός του χρόνου αντήχησης (από τα επίπεδα των 4 - 4,7 sec στις μέσες συχνότητες, στα ανεκτά όρια των 1 - 1,6 sec), που οφείλεται στη λειτουργία ενός ανοικτού και εκτεταμένου χώρου ο οποίος συντίθεται από συζευγμένους όγκους ποικίλων μεγεθών, μέσω ανοιγμάτων διαφορετικών διαστάσεων. Όμως στη συνέχεια, ο χώρος βρέθηκε να εξυπηρετεί (τυχαία και περιστασιακά) εκδηλώσεις είτε λόγου (με ηλεκτροακουστική ενίσχυση), είτε ζωντανής μουσικής, σε μια διάταξη συνάθροισης κοινού / καλλιτεχνών στο ισόγειο.

Acoustic correction in large coupled volumes: the roofed atrium at the new Town Hall of Thessaloniki

ABSTRACT

In this paper we attempt to prove that the effective acoustic design of a space with coupled rooms (through the prediction and dispersion of sound-absorbing zones, without diversifying the architect design) can achieve greater goals than the effective control of the reverberation in a large and variform area of gathering and public serving. The purpose of the acoustic correction of the atrium in the new Thessaloniki City Hall was the effective reduction of the reverberation time (from 4 - 4.7 sec at the average frequencies, to the tolerable limits of 1 - 1.6 sec) due to the functioning of an open and exposed space which is composed with various sizes coupled spaces with openings of different dimensions. Furthermore, occasionally the atrium also serves events of speech (with electro-acoustic support), or live music events, with gathering of artists and audience on the ground floor.

Εισαγωγή

Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο Cl. W. Sabine διατύπωσε την έννοια του χρόνου αντήχησης (TR), συναρτώντας την ηχητική ενέργεια του ακουστικού πεδίου σε μεταβατικό καθεστώς με τον όγκο (V) και την απορροφητική ικανότητα (A) των επιφανειών στο εσωτερικό και τα όρια ενός χώρου. Ωστόσο, οι αρχιτεκτονικά εκρίσιμες προϋποθέσεις για τον υπολογισμό της αντήχησης με τον τύπο Sabine [TR = 0,16 (V/a)] είναι η ομοιομορφία του ακουστικού πεδίου, οι τυχαίες (αντί επιλεκτικές) κατανομές των υλικών στα όρια του χώρου και γενικά η αποσύνδεση του υπολογισμένου χρόνου αντήχησης από το χωρικό ζεύγος πηγής / δέκτη, δηλαδή από τον διανυσματικό χαρακτήρα της συνάρτησης.[1]

Όταν στη διάρκεια του 20ου αιώνα η κυματική θεωρία ανέδειξε την πολυπλοκότητα των φυσικών φαινομένων της αντήχησης, οι εφικτές επιλύσεις ακριβείας περιοριστήκαν στις αρχιτεκτονικά απλοποιητικές υποθέσεις μιας λιτής γεωμετρικής μορφής και μιας περιορισμένης απορρόφησης στα τοιχώματα των ορίων. Αντίθετα, στις συνήθεις περιπτώσεις των σύνθετων γεωμετρικών μορφών και της ανομοιόμορφης κατανομής της ηχο-απορρόφησης, οι ακριβείς επιλύσεις καθίστανται υπολογιστικά δύσχρηστες. Διαδοχικές έρευνες, αρχικά με ηχητικές μετρήσεις σε μακέτες του χώρου και στη συνέχεια με υπολογισμούς σε ψηφιακές προσομοιώσεις του χώρου μέσω H/Y, επέτρεψαν την προσεγγιστική επίλυση των φαινομένων της αντήχησης, με τις αυστηρές, θεωρητικές παραδοχές των πεδίων διάχυσης : το ακουστικό πεδίο σε ένα τυχαίο σημείο της αίθουσας θεωρείται πως συντίθεται από ένα σύνολο επίπεδων κυμάτων, με τυχαίες διευθύνσεις, η αίθουσα διαθέτει μεγάλες διαστάσεις χωρίς συμμετρίες, τοιχώματα ομοιόμορφης, ασθενούς απορρόφησης και η ηχητική ενέργεια είναι ομοιόμορφα και ισότροπα κατανεμημένη, με σχετικά υψηλή ένταση και εκθετικά ομαλή απομείωση της έντασης. [1], [2]

Αρχιτεκτονικά, συζευγμένοι χώροι θεωρούνται οι ημι-ανεξάρτητες (αλλά και σαφώς συνδεδεμένες) μορφές που συλλειτουργούν κι επικοινωνούν διαμέσου σχετικά περιορισμένων ανοιγμάτων (δηλαδή διαμέσου ανοικτών τυμπάνων / επιφανειών διάκενου, με διαστάσεις μικρότερες της διατομή τους). Στην περίπτωση των συζευγμένων χώρων μεγάλου όγκου, σημαντικές ανατροπές των παραπάνω προϋποθέσεων (όπως η ανομοιόμορφη κατανομή των ανακλαστικών και απορροφητικών επενδύσεων, οι υπερβολικά υψηλοί συντελεστές απορρόφησης σε συγκεκριμένες ζώνες των ορίων και οι ανομοιόμορφες / ανισότροπες κατανομές των ηχητικών εντάσεων εξαιτίας διαδοχικών ή και ταυτόχρονων εκπομπών σε διάφορα σημεία του χώρου), ανατρέπουν ή θέτουν σε ισχυρή αμφισβήτηση τις τυπικές παραδοχές ενός πεδίου διάχυσης. [1], [2]

Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως αρχικά μελέτησε ο Eyring σε αίθουσες με ημίκλειστες περιοχές (εξώστες ή σκιασμένα τμήματα μιας πλατείας από εξώστες) η πρόβλεψη της αντήχησης είτε θα προκύψει με διορθωμένους συντελεστές απορρόφησης στο εσωτερικό του μικρότερου όγκου, είτε με εκτίμηση της απορροφητικής ικανότητας του «παράθυρου» επικοινωνίας των δύο όγκων (δηλαδή του διάκενου – ενδιάμεσου τυμπάνου) και με την παράλειψη του συζευγμένου χώρου στους υπολογισμούς της αντήχησης. [2]

1. Ο χώρος της έρευνας

Αφορμή για τον παραπάνω προβληματισμό έδωσε η μελέτη της ακουστικής διόρθωσης (2000 - 02) του στεγασμένου αίθριου στο νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης, στην οποία μελετήθηκε μια προσομοίωση συζευγμένων χώρων και υπολογίστηκε με μια διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων η κατανομή της ηχο-απορρόφησης στα όρια του χώρου. Πρόκειται για ένα στεγασμένο χώρο μεγάλου όγκου (περίπου 8.500 m³), συζευγμένο με άλλους όγκους ποικίλων μεγεθών, μέσω πολλαπλών ανοιγμάτων, διαφορετικών διαστάσεων και εμβαδού κατά περίπτωση, διαμπερούς κυκλοφορίας στο ισόγειο και περιμετρικής κυκλοφορίας σε τρία (3) διακεκριμένα επίπεδα.

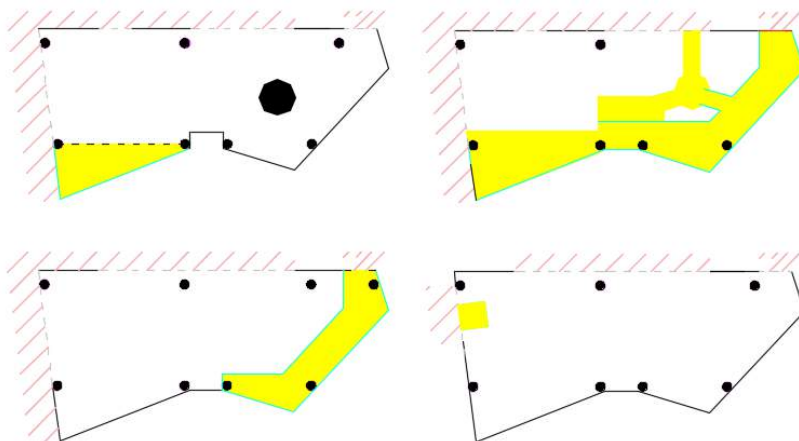
Ο χώρος της μελέτης καταλαμβάνει τη γωνιακή συμβολή των πτερύγων ενός κτιριακού συγκροτήματος και εκτείνεται κατακορύφως ανομοιόμορφα, σε συνολικό ύψος περίπου πέντε ως έξι (5-6) συμβατικών ορόφων (ισόγειο, ημι-ισόγειο, 4 όροφοι συν η κεκλιμένη στέγη του αίθριου). Αυτή η σύνθετη μορφή και λειτουργία του χώρου, που σε πρώτη προσέγγιση περιλάμβανε επενδύσεις από γυάλινα διαχωριστικά και εμφανές σκυρόδεμα, εξυπηρετεί με φυσικό φωτισμό ζώνες ανοικτών γραφείων που εντάσσονται μέσα στο αίθριο (αντί να μένουν απομακρυσμένα από το φωτισμό των προσόψεων) και μια εποπτική κυκλοφορία στις επιμέρους στάθμες του κτιρίου (δίνοντας στον μετακινούμενο μια σαφή αίσθηση όλου του κτιριακού αναπτύγματος).

Το νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης ολοκληρώθηκε 23 χρόνια μετά τη βράβευση μιας αρχικής μελέτης σε Πανελλήνιο Αρχιτεκτονικό Διαγωνισμό (1987). Η πρόταση εκείνη, ύστερα από μερική τροποποίηση (2000 - 02) σύμφωνα με την οποία το κτιριακό συγκρότημα χαμήλωσε κατά ένα όροφο, το αρχικό κτιριολογικό πρόγραμμα μειώθηκε κατά 3.500 τμ και έλαβε τα χαρακτηριστικά ενός «ευέλικτου στρατηγείου» που θα μπορούσε να συστέγασε διάσπαρτες δημοτικές υπηρεσίες προς τους πολίτες. Αναλυτικά, πρόκειται για κτίριο με 15.300 τ.μ. εμφανούς δόμησης, με υπόγειο περίπου 40.000 τμ και πάρκινγκ 850 θέσεων. Η κατασκευή (2005-10) και η λειτουργία του σηματοδοτεί μια ιστορική συγκυρία για την πόλη, σχεδόν έναν αιώνα από την απελευθέρωση της (1912) και περίπου ενάμιση αιώνα από την ίδρυση του Δήμου Θεσσαλονίκης (1869). [3], [4].

Το κτιριακό συγκρότημα ανεγέρθηκε στο πρώην στρατόπεδο Τσιρογιάννη, σε έναν από τους τελευταίους ελεύθερους, δημόσιους χώρους της πόλης (στο όριο εκκίνησης της νέας παραλίας, απέναντι από την παλιά Ηλεκτρική Εταιρεία), σε μια περιοχή που συσσωρεύονται διακεκριμένα τοπόσημα και υπαίθριοι αστικοί χώροι (ΔΕΘ και Γ'ΣΣ, πάρκο της ΧΑΝΘ και Θέατρο Κήπου, σύνδεση της παλιάς με τη νέα παραλία), ιστορικά μνημεία, αλλά και δείγματα της σύγχρονης αρχιτεκτονικής (ο Λευκός Πύργος, το Κτίριο της ΧΑΝΘ, το Στρατηγείο του Γ'ΣΣ, το Θέατρο της ΕΜΣ και το Βασιλικό Θέατρο, το Αρχαιολογικό και το Βυζαντινό Μουσείο). Αποτελείται από τρεις (3) κτιριακές μονάδες, που συντίθενται γύρω από ένα ανοικτό χώρο ελεύθερης πρόσβασης, με κυρίαρχο στοιχείο τη διαμόρφωση των εσωτερικών / εξωτερικών επιφανειών με εμφανές σκυρόδεμα, αλλά και τις επενδύσεις / επιστρώσεις από γυαλί, φυσική πέτρα, μάρμαρο και μεταλλικές περσίδες (κινητές ή ακίνητες).

Η κεντρική είσοδος - φουαγιέ του νέου Δημαρχείου προκύπτει από τη συμβολή της ψηλότερης κτιριακής πτέρυγας των γραφείων (το βόρειο, δομημένο όριο προς το Βυζαντινό Μουσείο), με μια διαγώνια χαμηλότερη πτέρυγα ανοικτών υπηρεσιών η οποία διατρέχει την κεντρική περιοχή του αδόμητου χώρου του. Αυτή η ευμεγέθης κτιριακή υποδοχή εξελίσσεται σε ένα πολύ-λειτουργικό στεγασμένο χώρο, με ιδιαί-

τερη ένταση και συμβολισμούς (διαφάνεια, ελεύθερη προσβασιμότητα, ανοικτοί χώροι εργασίας).



Σχήμα 1.1 Τα 4 διακριτά λειτουργικά επίπεδα του αίθριου: (άνω) αριστερά το ισόγειο και δεξιά ο 1ος όροφος, (κάτω) αριστερά ο 2ος όροφος και δεξιά ο 3ος όροφος

Πίνακας 1.1 Οι λειτουργίες των συζευγμένων χώρων στην περίμετρο του αίθριου

Χώρος	Ανοίγματα	Δ	B	A	N
A & B Ισ	πληροφορίες, οικονομικές υπηρεσίες, διάδρομοι κυκλοφορίας	+	+		
1 ^{ος} ορ	ληξιαρχείο, δημοτολόγια, περιμετρικοί χώροι αναμονής	+	+	+	+
2 ^{ος} ορ	περιμετρικοί χώροι αναμονής, δημοτολόγια, διάδρομοι κυκλοφορίας		+	+	+
3 ^{ος} ορ	περιμετρικοί χώροι αναμονής, διάδρομοι κυκλοφορίας		+	+	

Πρόκειται για ένα στεγασμένο αίθριο που περιβάλλεται από πολλαπλούς εσωτερικούς εξώστες, κλίμακες και ανοίγματα που εισχωρούν στο εσωτερικό του συγκροτήματος και καταλήγει (στο ύψος 3 - 4 συμβατικών ορόφων) σε μια έκκεντρα κεκλιμένη στέγη κατασκευασμένη από ορθογώνια επιστεγάσματα σκυροδέματος και υαλόφρακτα ανοίγματα (απομίμηση πέργκολας). Σύμφωνα με τους μελετητές, ο σχηματισμός του πολύ-ορόφου αίθριου εξασφαλίζει την πολυδιάσπαση των όγκων των επιμέρους ενοτήτων για να εξυπηρετήσει την διαβαθμισμένη πρόσβαση στους χώρους εργασίας κι εξυπηρέτησης του κοινού, ενώ για ορισμένους κριτικούς αξιολογητές καταλήγει να γίνει ένα πολύπλοκο, εσωστρεφές συγκρότημα που δίνει την εντύπωση ενός νημειακού μεγέθους, ογκωδέστερου του πραγματικού. [5], [6]

Οι ανοικτοί λειτουργικοί χώροι στο εσωτερικό του αίθριου (που φαίνονται στην σχήμα 1.1 με συμπαγή σκίαση) και οι συζευγμένοι χώροι με θορυβώδη λειτουργία σε

παράπλευρα ανοίγματα ανά πλευρά (που φαίνονται στο σχήμα 1.1. με διαγράμμιση) καταγράφονται με την ένδειξη «+» στον Πίνακα 1. 1 (όπου σημαίνονται οι πλευρές Δ : δυτική, Β : βόρεια, Α : ανατολική και Ν : νότια).

2. Μέθοδος επίλυσης και προτάσεις εφαρμογής

Σε εκτεταμένες ή πολυώροφες αίθουσες αναμονής, φουαγιέ, εσωτερικά αίθρια κλπ, όπου στόχος της ακουστικής διόρθωσης είναι η εξασφάλιση ικανοποιητικών - ανεκτών συνθηκών επικοινωνίας και εργασίας, οι θόρυβοι λειτουργίας περιλαμβάνουν κυρίως συζητήσεις / φωνές, μετακινήσεις, μουσική υπόκρουση ή ανακοινώσεις από συστήματα αναμετάδοσης. Όπως είναι γνωστό, για τον προσδιορισμό της βέλτιστης αντήχησης σε ένα χώρο, έχουν προταθεί διάφορα νομο-διαγράμματα ή γραμμικοί τύποι, που συσχετίζουν την προσδοκώμενη διάρκεια της αντήχησης (TR, σε σφαιρική τιμή και συχνοτική διακύμανση) με το διαθέσιμο όγκο και την αναμενόμενη λειτουργία [7], [8], [9] Για την ακουστική διόρθωση του συγκεκριμένου πολυώροφου αίθριου, υπολογίστηκαν οι παράπλευρες επιφάνειες, ο αναμενόμενος πληθυσμός (σύμφωνα με το αρχικό κτιριολογικό πρόγραμμα, πλήθος που στη συνέχεια ξεπεράστηκε λόγω επέκτασης των χώρων εξυπηρέτησης κοινού και σε άλλους προβόλους του αίθριου), οι συντιθέμενοι όγκοι ανά στάθμη κι ο ενιαίος όγκος, τα ανοίγματα των επιμέρους συζευγμένων όγκων σε κάθε κτιριακή στάθμη, καθώς και στον ενιαίο όγκο, με βάση τα διαθέσιμα αρχιτεκτονικά σχέδια στο αρχικό στάδιο της οριστικής μελέτης (Ιούνιος 2001).

Η μέθοδος υπολογισμού των επιμέρους συζευγμένων όγκων και του ενιαίου χώρου ακολούθησε μια διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων, θεωρώντας ότι, κατά περίπτωση, τα ανοικτά τύμπανα ανάμεσα στις στάθμες (σε επίπεδο δάπεδο ή οροφής κάθε στάθμης) και στα πλευρικά ανοίγματα κάθε στάθμης (στα «παράθυρα» επικοινωνίας με τους συζευγμένους χώρους) είναι διάκενα. Με αυτό τον τρόπο, η αντήχηση θεωρήθηκε ως αποτέλεσμα πολλών, ταυτόχρονα ενεργών και διασπαρμένων πηγών θορύβου. Παράλληλα η προσδοκώμενη περιστολή της αντήχησης ανά τμήμα καθ' ύψος όγκου προσδιόρισε την ποσότητα και την διασπορά των ηχο-απορροφητικών επενδύσεων σε κάθε στάθμη, αλλά και στον ενιαίο χώρο του αίθριου.

Πίνακας 2.1 Προσδιορισμός της βέλτιστης αντήχησης σφαιρικά και συχνοτικά

TR [500 Hz] = A	TR[125 Hz]	TR[250 Hz]	TR [1- 4 KHz]
0,075* {V ^{1/3} }	~125% * A	~110% * A	~ 90 / 100% * A

Για τον προσδιορισμό της επιθυμητής αντήχησης σφαιρικά και συχνοτικά, εφαρμόστηκε σε κάθε βήμα υπολογισμού, ο γαλλικός τύπος πρόγνωσης της αντήχησης, με βάση τον πίνακα 2.1 [7]. Σε πρώτη προσέγγιση, ένα εύρος τιμών +/- 5%, ορίστηκε ως ανεκτό, άνω και κάτω όριο διακύμανσης σύμφωνα με τις παραπάνω βέλτιστες συχνοτικές τιμές αντήχησης.

Όπως φαίνεται στο Πίνακα 2.2, η επιμέτρηση των όγκων και των επιφανειών του αίθριου, καθώς και ο υπολογισμός της αντήχησης ξεκίνησαν από τη στάθμη του Α & Β' ισογείου και επεκτάθηκαν σε διαδοχικές ενσωματώσεις κάθε υπερκείμενου ορόφου και της στέψης του αίθριου. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίστηκαν οι επιμέρους

ποσότητες των ηχο-απορροφητικών επενδύσεων σε κάθε στάθμη και στο σύνολο του όγκου, λαμβάνοντας υπόψη την αρχιτεκτονική απαίτηση για διατήρηση των υαλοστασίων και της πλειονότητας των επιφανειών από εμφανές σκυρόδεμα.

Πίνακας 2.2 Επιμετρήσεις και αποτελέσματα στα διαδοχικά βήματα υπολογισμού

	A & B ισ	Ισ + 1ος	Ισ+1ος+2ος ορ	ΣΥΝΟΛΟ
όγκος	2440	4520	6725	8365
σύνολο επιφανειών	1770	3020	4155	4795
περιμετρικά ανοίγματα	135	225	285	385
οριζόντια ανοίγματα	305	755	1130	0
ηχο-απορροφητικά	210	360	500	590
ideal TR[500]	1,06	1,30	1,48	1,59
υπολογισμένος TR[500]	1,05	1,25	1,41	1,58

Σύμφωνα με τις αρχιτεκτονικές επιλογές, τα υλικά επενδύσεων / επιστρώσεων στο αίθριο και στους συζευγμένους χώρους που συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς, είναι :

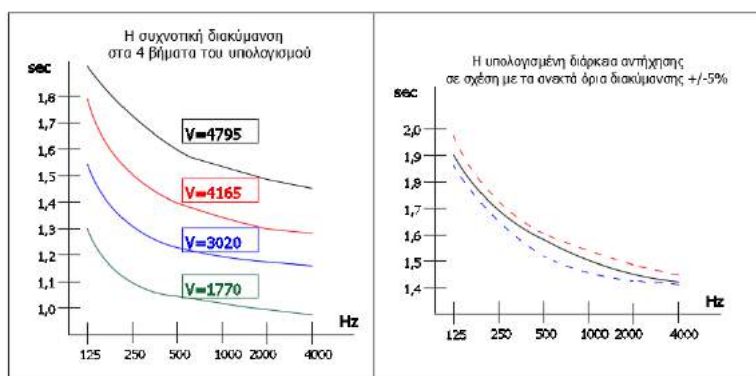
- δάπεδο από πλακίδια μορφής κυβόλιθου,
- οροφές, προβόλους, υποστυλώματα και (στην πλειονότητα τους) κατακόρυφους τοίχους από εμφανές σκυρόδεμα,
- (ορισμένα) τοιχώματα με σοβά, υαλοστάσια και γυάλινα κουφώματα,
- μεταλλικά κιγκλιδώματα και ξύλινες κουπαστές,
- διαχωριστικά ξηράς δόμησης (γυψοσανίδες και πλαστικοποιημένα πετάσματα),
- στέψη από εμφανές σκυρόδεμα και υαλόφρακτα ανοίγματα.

Σε επίπεδο υπολογισμών, στα ανοίγματα εφαρμόστηκαν συντελεστές ηχο-απορροφητικής ικανότητας 20% ως 40%, συνυπολογίζοντας τις διαστάσεις κάθε ανοικτού τυμπάνου σε σχέση με τη συχνότητα υπολογισμού, την αναλογία όγκου των συζευγμένων χώρων, αλλά και την ανακλαστική ικανότητα / θέση των τοιχωμάτων του μικρότερου όγκου (όσο μικραίνει σχετικά το άνοιγμα, τόσο μεγαλώνει η επίδραση των ηχο-ανακλάσεων και μειώνεται η επίδραση της ηχο-απορρόφησης του τυμπάνου). [2] Επίσης, κατά τον υπολογισμό των διάκενων στις ανοικτές επιφάνειες ανάμεσα στα επιμέρους τμήματα του ενιαίου όγκου ελήφθησαν υπόψη συχνοτικά σταθεροί συντελεστές ηχο-απορρόφησης κατά περίπτωση (από 30 ως 40% ανάλογα με τον περιορισμένο ή εκτεταμένο διαχωριζόμενο όγκο). [10], [11] Τέλος, σε πρώτη προσέγγιση ελήφθησαν υπόψη διάτρητες, μεταλλικές ή ξύλινες επενδύσεις (διάτρηση περίπου 20%, οπές περίπου Φ2,5cm, με εσωτερική επένδυση από υαλοϋφασμα και εσωτερικό γέμισμα από ορυκτοβάμβακα 5cm / 70Kg/m³) στις παρακάτω θέσεις και ποσότητες :

- 210 m² στις ψευδοροφές των προβόλων και στους περιμετρικούς τοίχους του Α` & Β` ισογείου
- 150 m² σε μέρος των ψευδοροφών και σε όλα τα διαχωριστικά των ανοικτών θυρίδων εργασίας του 1ου ορόφου,
- 230 m² στους τελευταίους ορόφους και στη στέψη του αίθριου.

Ωστόσο, επειδή για την παραπάνω κατανομή δεν επαρκούσαν οι διαθέσιμες επιφάνειες στην ανώτερη στάθμη και ιδίως στη στέψη του χώρου, σε δεύτερη προσέγγιση και σύμφωνα με την αρχιτεκτονική απαίτηση για ενός είδους και εμφάνισης ηχο-απορροφητικής επένδυσης, αποφασίστηκε να προταθούν σε επίπεδο μελέτης εφαρμογής ηχο-απορροφητικές επενδύσεις από τυποποιημένα, ξύλινα διάτρητα, σύμφωνα με την παρακάτω διασπορά :

- επένδυση όλων των διαχωριστικών στις ανοιχτές θυρίδες εργασίας
- επένδυση όλων των ψευδοροφών στους προβόλους,
- καθώς επίσης και (εναλλακτικά - ιεραρχικά) :
 - ή η κάλυψη επιφανείας 320 m² στη στέψη του αίθριου
 - ή η κατασκευή πρόσθετης ψευδοροφής στον ασκεπή πρόβολο του 2ου ορόφου και η κάλυψη επιφανείας 190 m² στη στέψη του αίθριου,
 - ή η κατασκευή πρόσθετης ψευδοροφής στον ασκεπή πρόβολο του 2ου ορόφου, η ηχο-απορροφητική επένδυση όλων των πλευρικών τοιχωμάτων στον 3ο και 4ο όροφο και σε μέρος των πλευρικών τοιχωμάτων στον 1ο και 2ο όροφο (σε περιοχές με αρχική πρόβλεψη ορθομαρμάρωσης ή σοβά).



Εικόνα 2.1 (αριστερά) τα συχνοπικά διαγράμματα του υπολογισμένου χρόνου αντίληψης στα 4 διαδοχικά βήματα υπολογισμού, (δεξιά) ο υπολογισμένος χρόνος αντίληψης και τα ανεκτά όρια διακύμανσης (+/- 5%) στον ενιαίο χώρο

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της εικόνας 2.1, κατά την τελική φάση της μελέτης, η αριθμητική & συχνοπική σύγκλιση των υπολογισμένων τιμών της αντίληψης στο ακουστικό μοντέλο του αίθριου ήταν επιτυχής.

3. Επίλογος

Κατά τον υπολογισμό της αντίληψης, η κλασική θεωρία αποσυνδέει την πτώση της ηχητικής ενέργειας σε μεταβατικό καθεστώς από το διανυσματικό χαρακτήρα της και προϋποθέτει την εγκαθίδρυση ενός πεδίου διάχυσης, την ομοιομορφία της αίθουσας και τυχαίες κατανομές σχετικά χαμηλής ηχο-απορρόφησης στα όρια. Οι παραπάνω προϋποθέσεις των πεδίων διάχυσης τίθενται σε σοβαρή αμφισβήτηση στην περίπτωση ενός χώρου με συζευγμένους όγκους μεγάλου μεγέθους, μέσω ανοιγμάτων ποικίλων μεγεθών, σε συνδυασμό με την ανομοιόμορφη κατανομή των επενδύσεων

με σχετικά υψηλή ηχο-απορροφητική ικανότητα, συν ανισότροπες ηχητικές εντάσεις από διαδοχικές ή και παράλληλες πηγές.

Η ακουστική διόρθωση στο στεγασμένο αίθριο του νέου Δημαρχείου της Θεσσαλονίκης ακολούθησε μια μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων κατά τον υπολογισμό και τη διασπορά των ηχο-απορροφητικών επενδύσεων, προσδιορίζοντας την αναμενόμενη διάρκεια της αντήχησης σε 1,1 - 1,6 sec στις μέσες συχνότητες (όγκος 8300 m³). Μακροσκοπικά έχει διαπιστωθεί ότι, το αίθριο ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ενός εκτεταμένου χώρου εξυπηρέτησης κοινού και επιπλέον μπορεί να φιλοξενήσει εκδηλώσεις λόγου / ζωντανής μουσικής στο ισόγειο του. Σε επόμενη δημοσίευση θα επιχειρηθεί η ακριβής αποτίμηση των ακουστικών επεμβάσεων, με επιτόπιες μετρήσεις της αντήχησης, σε διάφορες θέσεις του χώρου.

4. Αναφορές

- [1] Bruneau, M. *“Introduction aux Theories de l’ Acoustique”*, ed. Université du Maine, Le Mans, (1984)
- [2] Eyring, C. «Reverberation Time Measurements in Coupled Room», *JASA* **3**, pp 181 – 206, (1931)
- [3] Μπίρης, Τ. - Μπίρης, Δ. «Νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης», *www.domes index.com*, 2010 (πρόσβαση 8 / 2018)
- [4] Καλογήρου, Ν. «Νέο Δημαρχείο Θεσσαλονίκης» *www.greekarchitects.gr*, 2010 (πρόσβαση 8 / 2018)
- [5] Μπίρης, Τ. «Δημαρχιακό Μέγαρο Θεσσαλονίκης», *Κτίριο*, 1, σ.64-82, (2010)
- [6] Γιακουμακάτος, Α. «Το τείχος της Θεσσαλονίκης», *Το Βήμα*, 24/02/2008 (πρόσβαση 8 / 2018)
- [7] Lehmann, R. *“L’ Acoustique des Bâtiments”*, PUF, Paris (1977)
- [8] Lord, P. - Templeton, D. *“The Architecture of Sound”*, The Architectural Press, London (1986)
- [9] Moore, J.E. *“Design for Good Acoustics and Noise Control”*, Mc Millan Press, London (1978)
- [10] Bobran, H.W - Bobran-Wittfoht, I. *“Handbuch der Bauphysik”*, Vieweg, 6th ed. (1 / 1990)
- [11] Egan, D.M. *“Concepts in Architectural Acoustics”*, Mc Graw Hill, New York (1972)

Σύγχρονη αρχιτεκτονική και υπαίθρια ακουστικά κελύφη

Αικατερίνη Μπούσια-Αλεξάκη
Αρχιτέκτων Μηχανικός ΕΜΠ,
Διπλωματούχος Πιάνου, Φοιτήτρια
ΠΜΣ Ιστορίας και Θεωρίας της
Τέχνης ΑΣΚΤ/ Ιωάννας Δρυμπέτη 5,
Νέα Ερυθραία, 14671
katerina.bale@gmail.com

Ανδρέας Γιακουμακάτος, καθηγητής
Ιστορίας, Κριτικής Ανάλυσης και
Θεωρίας της Αρχιτεκτονικής ΑΣΚΤ
Πατησίων 42, 10682, Αθήνα

Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Οικοδομικής & Ακουστικού
Σχεδιασμού Κτιρίων ΕΜΠ
ΕΜΠ, 15780, Ζωγράφου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υπαίθρια ακουστικά κελύφη είναι αρχιτεκτονικές κατασκευές που τοποθετούνται σε δημόσιους ανοιχτούς χώρους με σκοπό να στεγάσουν μουσικές συναυλίες. Η εργασία αποσκοπεί, μέσα από χαρακτηριστικά παραδείγματα της εξέλιξης της αρχιτεκτονικής των ακουστικών κελυφών κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, να αναδείξει τη σημασία της ολιστικής προσέγγισης του ακουστικού σχεδιασμού στην αρχιτεκτονική υπαίθριων χώρων ακροατηρίων. Τα παραδείγματα μελετώνται βάσει της αρχιτεκτονικής και ακουστικής τους ποιότητας και των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους.

Contemporary architecture and outdoor acoustic shells

ABSTRACT

Outdoor acoustic shells are architectural constructions placed in open public spaces to host music concerts. This work aims to highlight the importance of a holistic approach of acoustic design in auditorium's open air architecture, using characteristic examples of the evolution of acoustic shells' design during the 20th century. The examples are examined on the basis of their architectural and acoustic quality and their construction characteristics.

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη αρχιτεκτονική ενώ έχει δοθεί μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό κλειστών χώρων ακροατηρίου (auditorium), δεν έχει δοθεί η αντίστοιχη προσοχή στο σχεδιασμό και την υλοποίηση υπαίθριων χώρων που προορίζονται για την ίδια χρήση. Η ιστορία των υπαίθριων εκδηλώσεων σε ευρωπαϊκό αλλά και διεθνές επίπεδο καθιστά ενδιαφέρουσα τη μελέτη των χώρων που τις στέγασαν από αρχιτεκτονικής αλλά και ακουστικής άποψης.

Στην Ελλάδα τα υπαίθρια θέατρα συνιστούν μεγάλο μέρος της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς και συνεχίζουν να εξετάζονται για τις ακουστικές τους ιδιότητες. Από την άλλη οι υπαίθριοι χώροι μουσικών γεγονότων αποτελούν έναν κτιριακό τύπο που ενώ ταιριάζει απόλυτα στο μεσογειακό κλίμα δεν έχει εξεταστεί ιδιαίτερα.

Σήμερα οι περισσότερες υπαίθριες μουσικές εκδηλώσεις υποστηρίζονται με τεχνικό εξοπλισμό αφού οι χώροι που τις φιλοξενούν δεν είναι σχεδιασμένοι ώστε η ίδια η αρχιτεκτονική κατασκευή να διαθέτει τις κατάλληλες φυσικές ακουστικές ιδιότητες. Υπάρχουν όμως αρκετά διεθνή παραδείγματα ακουστικών κελυφών που έχουν κατασκευαστεί ειδικά για αυτόν το σκοπό.

Τα ακουστικά κελύφη είναι αρχιτεκτονικές κατασκευές που τοποθετούνται σε υπαίθριους δημόσιους χώρους. Η μορφή τους οργανώνει τα ηχητικά κύματα που παράγονται μέσα σε αυτή και εξυπηρετεί τη μετάδοση του ήχου για ένα ακροατήριο που βρίσκεται μπροστά από την κατασκευή. Από τεχνική άποψη η διάδοση του ήχου πραγματοποιείται από τις αντηχήσεις που δημιουργούνται μέσα στο κέλυφος και μέσω του κοίλου σχήματός του διανέμονται προς τους θεατές. Η δομή των ακουστικών κελυφών εξετάζεται κατά περίπτωση καθώς εξαρτάται άμεσα από το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται. Η κλίση και η ποιότητα του εδάφους, οι κλιματικές συνθήκες και τα υλικά του περιβάλλοντος χώρου επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των κελυφών.[1]

Η παρούσα εργασία εξετάζει την εξέλιξη των ακουστικών κελυφών από το 19^ο αιώνα έως τη σύγχρονη εποχή. Επιλεγμένα παραδείγματα χρησιμοποιούνται ως πρότυπα για να αναγνωριστούν μέσω αυτών οι τάσεις της αρχιτεκτονικής και η σχέση της με τον ακουστικό σχεδιασμό.

1. Η μετάβαση από τα στέγαστρα μουσικής στα μουσικά κελύφη

Τα ακουστικά κελύφη προέρχονται ως κατασκευές από το παραδοσιακό «μουσικό στέγαστρο» (*bandstand*) που συναντάται σε πάρα πολλές διεθνώς από το 19^ο και μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Το στέγαστρο μουσικής είναι μία συνήθως μεταλλική ή ξύλινη αρχιτεκτονική κατασκευή, συμμετρική σε σχέση με έναν κεντρικό άξονα (πανοπτική μορφή) και πολυγωνικής ή σπανιότερα κυκλικής κάτοψης. Αποτελείται από μία ελαφρώς υπερυψωμένη βάση, λεπτά υποστυλώματα από χυτό σίδηρο ή ξύλο και μεταλλική συνήθως στέγη που ανακλά τον ήχο. [2] Τοποθετείται σε πάρκα, κήπους, προβλήτες και κεντρικές πλατείες για να στεγάσει την εκτέλεση ορχηστρικής μουσικής. Το μουσικό στέγαστρο εξυπηρετεί ακουστικές απαιτήσεις και προσφέρει καταφύγιο από τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες.

Τα στέγαστρα μουσικής έγιναν πολύ δημοφιλή αρχικά στο Ηνωμένο Βασίλειο κατά τη Βικτωριανή εποχή όταν οι βρετανικές χάλκινες μπάντες κέρδισαν μεγάλη δημοτικότητα. Τα πάρκα στα οποία συναντούνται τα περισσότερα στέγαστρα μουσικής κατασκευάστηκαν κατά τη Βιομηχανική Επανάσταση, όταν οι τοπικές

αρχές διαπίστωσαν ότι οι επιδεινούμενες συνθήκες στις αστικές περιοχές επέβαλαν τη δημιουργία ανοιχτών δημόσιων χώρων πρασίνου. Αποτελούν έτσι ένα κεντρικό συνθετικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής τοπίου (landscape architecture) της εποχής.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο το πρώτο γνωστό στέγαστρο μουσικής κατασκευάζεται στη Royal Horticultural Society στο Νότιο Κένσινγκτον το 1861. Μέχρι το τέλος του 19ου αιώνα αυτή η τυπολογία κτιρίου γίνεται εξαιρετικά δημοφιλής και θεωρείται πλέον απαραίτητο στοιχείο του δημόσιου χώρου. Τα στέγαστρα μουσικής συναντούνται σε πολλές ευρωπαϊκές και αμερικανικές πόλεις. Ακόμα και στην Ελλάδα εμφανίζονται κάποια κιόσκια μουσικής στην Κέρκυρα, το Φάληρο, το Ζάππειο και τον Πειραιά.

Πολλά από τα στέγαστρα μουσικής σταμάτησαν να χρησιμοποιούνται ή και καταστράφηκαν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Στη συνέχεια η αυξανόμενη δημοτικότητα του κινηματογράφου και της τηλεόρασης οδήγησε σταδιακά σε μία μείωση του ενδιαφέροντος του κοινού για τα παραδοσιακά πάρκα ψυχαγωγίας με αποτέλεσμα τα περισσότερα κιόσκια να ερειπωθούν, να βανδαλιστούν ή να κατεδαφιστούν.

Ήδη όμως από τις αρχές του 20ού αιώνα, με την εξέλιξη του οπλισμένου σκυροδέματος και τις νέες δυνατότητες που αυτό προσφέρει, τα στέγαστρα μουσικής αρχίζουν σταδιακά να αντικαθίστανται με νεώτερες κατασκευές από σκυρόδεμα και με σχήμα συχνά παρόμοιο του τεταρτοσφαιρίου, οι οποίες και λόγω της μορφής τους ονομάζονται «ακουστικά κελύφη» (*band shells*).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το στέγαστρο μουσικής του Central Park της Νέας Υόρκης το οποίο κατασκευάστηκε το 1862 και έγινε αμέσως ένα σημαντικό τοπόσημο του πάρκου. Πρόκειται για μία κατασκευή από χάλυβα και ξύλο, εξαιρετικής κάτοψης με εκλεκτικές λεπτομέρειες και έντονα χρώματα που συγκέντρωνε έως και 45.000 ακροατές. Η αυξανόμενη ανάγκη για ένα μεγαλύτερο ακουστικό κέλυφος, οδήγησε στην κατεδάφισή του το 1922, για να αντικατασταθεί το 1923 από το Naumburg Bandshell. Το νέο κέλυφος σχεδιάστηκε από τον William G. Tachau και αντλεί επιρροές από το Πάνθεον της Ρώμης, τα υπαίθρια θέατρα και περίπτερα των Βερσαλιών και τους ναούς και τα κτήρια των κήπων βρετανικών εξοχικών κτηρίων. Το αποτέλεσμα είναι το μοναδικό νεοκλασικό κτίριο του Central Park κι ένα εξαιρετικό παράδειγμα του κινήματος City Beautiful Movement. Είναι ένα από τα πρώτα ακουστικά κελύφη αυτής της μορφής, που εκμεταλλεύεται το υλικό και το σχήμα του για την κάλυψη ακουστικών αναγκών και το οποίο συνεχίζει να είναι πολύ δημοφιλές μέχρι και σήμερα.

2. Hollywood Bowl

Την ίδια περίπου περίοδο ξεκινά η κατασκευή κι άλλων ακουστικών κελυφών, κυρίως στην Αμερική. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Hollywood Bowl το οποίο θα αποτελέσει πρότυπο για τα ακουστικά κελύφη που θα ακολουθήσουν διεθνώς. Το Hollywood Bowl ξεκινά ως ένα φυσικό αμφιθέατρο στο Bolton Canyon το 1916. Από το 1922 αρχίζουν να κατασκευάζονται κάποιες πρώτες προσωρινές σκηνές. Το 1926 σχεδιάζεται η πρώτη αψίδα προσκηνίου από τους Allied Architects, ένα ξύλινο πλαίσιο που η όψη του διαμορφώνεται από μία εξωτερική ελλειπτική και μία εσωτερική σχεδόν ημικυκλική αψίδα.

Το 1927 ο Lloyd Wright (γιος του Frank Lloyd Wright) σχεδιάζει ένα κέλυφος σε μορφή πυραμίδας, ένα από τα πιο ξεχωριστά και αμφιλεγόμενα κελύφη που έχουν

κατασκευαστεί. Την επόμενη χρονιά ο ίδιος σχεδιάζει ένα νέο κέλυφος που αποτελείται από μία σειρά από εννέα ομόκεντρες συναρμολογούμενες ξύλινες ελλειπτικές αψίδες με σκοπό να καλύψει τις αισθητικές και παράλληλα τις ακουστικές απαιτήσεις του χώρου. Το νέο κέλυφος είναι πρωτοπόρος του κινήματος Streamline Moderne και έχει μεγάλη επιτυχία ως προς την ακουστική του.

Οι αψίδες του Wright αντικαθίστανται το 1929 από μία μόνιμη κατασκευή σχεδιασμένη από την τεχνική εταιρία των Elliot, Bowen & Walz, με σύμβουλο ακουστικής τον Vern Knudsen. Το νέο κέλυφος είναι παρόμοιο με του Wright, όμως οι αψίδες είναι τώρα ημικυκλικές και κατασκευασμένες από ένα μείγμα αμιάντου και τσιμέντου πάνω σε ένα πλαίσιο κατασκευής από χάλυβα. Η ακουστική δεν είναι το ίδιο καλή σε σχέση με το προηγούμενο κέλυφος, όμως η νέα μορφή με τις καθαρές λευκές ημικυκλικές αψίδες γίνεται αμέσως το σήμα κατατεθέν του Hollywood Bowl. Οι επιφάνειες που προκύπτουν είναι σκληρές και ανακλαστικές ώστε να ανακλούν τον ήχο προς το ακροατήριο στο επικλινές έδαφος μπροστά από το κέλυφος.[3] Η ακουστική του νέου κελύφους δέχτηκε αρνητικά σχόλια ως προς την επάρκεια και την ισορροπία του ήχου σε συγκεκριμένες θέσεις, καθώς και για τον μεταλλικό και οξύ ήχο, αλλά θεωρήθηκε από άλλους επιτυχής ως ενισχυμένος ήχος χωρίς αντηχήσεις, που μπορούσε να ακουστεί από όλους τους θεατές, οι οποίοι έφταναν τις 20.000 και κάθονταν σε απόσταση 150 μέτρων από τη σκηνή.

Το 1936 τοποθετείται στο Hollywood Bowl το πρώτο σύστημα ενίσχυσης ήχου από τα Bell Laboratories. Αν και πραγματοποιούνται διάφορες αλλαγές στις γενικότερες εγκαταστάσεις του Hollywood Bowl για τις επόμενες δεκαετίες, το κέλυφος παραμένει αναλλοίωτο μέχρι το 1970. Τότε ο αρχιτέκτονας Frank Gehry σε συνεργασία με τον Christopher Jaffee εγκαθιστούν ηχητικούς σωλήνες (*cardboard sonotubes*), οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στο κέλυφος και εκτείνονται προς το εξωτερικό της σκηνής βελτιώνοντας την ακουστική. Το 1980 ο Frank Gehry αντικαθιστά τους ηχητικούς σωλήνες με αναρτημένες σφαίρες από υαλοβάμβακα (*fiberglass spheres*). Οι νέες αλλαγές ελαχιστοποίησαν τη δυσμενή ακουστική, αλλά απαιτούσαν μαζική χρήση ηλεκτρονικής ενίσχυσης για να φτάσουν στο πλήρες κοινό, ιδιαίτερα αφού το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος είχε αυξηθεί απότομα.

Τελικά το 2003 το αρχιτεκτονικό γραφείο Hodgetts & Fung αντικαθιστά εξ'ολοκλήρου το ακουστικό κέλυφος του Hollywood Bowl με ένα νέο, λίγο μεγαλύτερο, βελτιωμένο κέλυφος που συμπεριλαμβάνει σχεδιαστικά στοιχεία τόσο από το κέλυφος του 1929 όσο και από τα προηγούμενα κελύφη του Wright.

Είναι ενδιαφέρον ότι το Hollywood Bandshell (1929), παρ'ότι δεν θεωρήθηκε επιτυχημένο ως προς την ακουστική, υπήρξε ως προς τη μορφολογία το πρότυπο για την κατασκευή πολλών ακουστικών κελυφών διεθνώς, μεταξύ των οποίων το Bandshell του Grand Park στο Σικάγο (1931), το CNE Bandshell του Τορόντο (1936), το Bandshell της Βοστώνης (1940) και άλλα.

3. Ακουστικά κελύφη στη Λατινική Αμερική

Στη Λατινική Αμερική υπάρχουν κάποια πολύ ενδιαφέροντα παραδείγματα ακουστικών κελυφών, η κατασκευή των οποίων βασίζεται στις νέες δυνατότητες που προσφέρει το οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τον 20^ο αιώνα.

Ο Felix Candela σχεδιάζει σε συνεργασία με τον Mario Pani το 1956 το ακουστικό κέλυφος στο συγκρότημα κατοικιών Unidad Habitacional Santa Fé στην πόλη του Μεξικό. Πρόκειται για ένα ελαφρύ στέγαστρο από οπλισμένο σκυρόδεμα, που

στηρίζεται στη μία πλευρά και δημιουργεί μια επιφάνεια πάνω από τους μουσικούς που ανακλά τους ήχους κατευθύνοντάς τους προς το κοινό που βρίσκεται μπροστά από την κατασκευή. Το κέλυφος σχεδιάστηκε για να λειτουργήσει ως κέντρο κοινωνικής συγκέντρωσης των κατοίκων του συγκροτήματος όμως σήμερα παρουσιάζει μια εικόνα πλήρους εγκατάλειψης.

Ένα ακόμα παράδειγμα στο Μεξικό είναι το ακουστικό κέλυφος του Parque Agua Azul στη Γκουανταλαχάρα. Σχεδιασμένο το 1957 από τον αρχιτέκτονα Alejandro Zohn για να στεγάσει υπαίθριες συναυλίες, διαμορφώνεται ως ένα περίβλημα διπλής καμπυλότητας από οπλισμένο σκυρόδεμα που τοποθετείται πάνω σε μία υπερυψωμένη εξέδρα. Το κέλυφος χρησιμοποιήθηκε για πολλές δεκαετίες και αποκαταστάθηκε το 2013 από το αρχιτεκτονικό γραφείο S2 Arquitectura.

Στη Βραζιλία χαρακτηριστικά είναι δύο ακουστικά κελύφη σχεδιασμένα από τον Oscar Niemeyer. Το πρώτο εγκαινιάστηκε το 1969 και βρίσκεται στις όχθες της λίμνης Paranao. Η σύνθεση χαρακτηρίζεται από έντονες χαράξεις και ένα κοίλο κέλυφος από οπλισμένο σκυρόδεμα που αγκαλιάζει τη σκηνή μόνο από το πίσω μέρος της, χωρίς να λειτουργεί ως στέγαστρο. Είναι ο πρώτος μεγάλος χώρος εκδηλώσεων της πόλης χωρητικότητας 5000 θεατών. Το δεύτερο βρίσκεται στο São Luís, και αποτελεί μέρος του Memorial Maria Aragão, ενός σχεδιασμένου δημόσιου χώρου που κατασκευάστηκε το 1998. Το ακουστικό κέλυφος ύψους 7 μέτρων τοποθετείται πάνω σε μία υπερυψωμένη εξέδρα.

Όλα τα παραδείγματα της Λατινικής Αμερικής, χαρακτηρίζονται από τη «νέα» ικανότητα του οπλισμένου σκυροδέματος να εκτυλίσσεται στο χώρο σαν μεμβράνη, μονολιθική, λεπτόφλουδη και αυτοφερόμενη. Πρόκειται για δομές ελαφριές, εύπλαστες που καμπυλώνονται και ελίσσονται.[4] Η ύπαρξη ενδιαφέροντων παραδειγμάτων ακουστικών κελυφών στη Λατινική Αμερική μπορεί να αποδοθεί στο κλίμα, σε κοινωνικούς και πολιτιστικούς παράγοντες, καθώς και στις τάσεις της αρχιτεκτονικής του 20ού αιώνα στην περιοχή.

4. Σύγχρονα ακουστικά κελύφη

Τα ακουστικά κελύφη φτάνουν μέχρι τις μέρες μας με παραδείγματα μικρής και μεγάλης κλίμακας, νέες μορφές και νέες δυνατότητες.

Ο Frank Gehry σχεδιάζει το 1999 το Jay Pritzker Pavilion στο Millennium Park του Σικάγο το οποίο διαθέτει 4000 σταθερές θέσεις και μία επιπλέον έκταση 8.800 τ.μ. που μπορεί να φιλοξενήσει ακόμα 7000 ακροατές. Αυτό το ακουστικό κέλυφος συνδέεται με ένα «πλέγμα» (*trellis*) διασταυρούμενων ατσάλινων σωλήνων που υποστηρίζουν ένα πρωτοποριακό ηχητικό σύστημα που μιμείται την ακουστική εσωτερικών χώρων συναυλιών. Το πλέγμα δημιουργείται με τη μορφή αψίδων που προκαλούν την αίσθηση μιας νοητής οροφής, ορίζοντας έναν κάναβο που προκύπτει από τις απαιτήσεις του ηχητικού συστήματος LARES, επιτρέποντας την ακριβή τοποθέτηση ηχείων για ηχητική βελτιστοποίηση χωρίς οπτικά εμπόδια. Το ακουστικό σύστημα χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό του απευθείας ήχου που ανακλάται στις αρχιτεκτονικές επιφάνειες με ηχεία που χρονομετρούν τη μετάδοση του ήχου ώστε να δημιουργείται η εντύπωση ότι ο ήχος φτάνει απ'ευθείας από τη σκηνή με σωστή καθαρότητα και ένταση. Η τοποθέτηση των ηχείων στο δίκτυο καλύπτει τον εξωτερικό θόρυβο ενώ προσομοιώνει τις ηχητικές ανακλάσεις της οροφής των εσωτερικών χώρων συναυλιών.

Ένα άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα σύγχρονου ακουστικού κελύφους μπορεί να θεωρηθεί το Seiji Ozawa Hall στη Μασαχουσέτη, που λειτούργησε το 1994 σχεδιασμένο από τους William Rawn Associates, Architects, Inc. Πρόκειται για μία κλασική κλειστή αίθουσα συναυλιών ορθογωνικής κάτοψης (shoebbox) της οποίας η πίσω πλευρά έχει τη δυνατότητα να ανοίγει εντελώς επιτρέποντας σε ένα κοινό 2000 ατόμων να παρακολουθήσει τη συναυλία από το εξωτερικό, με τη βοήθεια ενός ηχοσυστήματος.[5] Έτσι έχουμε το παράδειγμα μίας κλειστής αίθουσας συναυλιών που η ίδια μετατρέπεται σε ακουστικό κέλυφος υπαίθριων συναυλιών, απαιτώντας όμως κατάλληλο τεχνολογικό εξοπλισμό.

5. Συμπεράσματα

Τα ακουστικά κελύφη έχουν παρουσιάσει σημαντική εξέλιξη από τον 19^ο αιώνα μέχρι σήμερα. Το πέρασμα από τα δημοφιλή στέγαστρα μουσικής στα ακουστικά κελύφη επηρεάστηκε άμεσα από τις νέες τεχνολογίες και τις νέες δυνατότητες που προσέφερε το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα ακουστικά κελύφη δεν φαίνεται να ήταν πάντοτε επιτυχημένα ως προς την ακουστική τους. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Hollywood Bowl που, παρ'ότι χάρη στη μορφολογία του αποτέλεσε το πρότυπο για την κατασκευή μουσικών κελυφών σε διεθνές επίπεδο, χρειάστηκε συνεχείς σημαντικές επεμβάσεις για να βελτιώσει την ακουστική του και τελικά ανακατασκευάστηκε μετά από 70 χρόνια λειτουργίας. Φαίνεται πως ενώ η κατασκευή των ακουστικών κελυφών ακολουθεί κάποιους γενικότερους κανόνες ακουστικής, επηρεάζεται περισσότερο από τις εκάστοτε τάσεις της αρχιτεκτονικής.

Στο σχεδιασμό ακουστικών κελυφών σήμερα, δεν μπορεί κανείς να παραβλέψει όλες τις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία για την απόκτηση ενός ενισχυμένου ήχου, ειδικά σε κελύφη μεγάλης κλίμακας που απευθύνονται σε χιλιάδες ακροατές, όπου ο φυσικός ήχος δεν θα μπορούσε να επαρκεί. Συχνά και η ίδια η φύση του μουσικού θεάματος, ήδη από τον 20^ο αιώνα, απαιτεί την ύπαρξη ηχοσυστημάτων. Παρ'όλα αυτά πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και η φυσική ακουστική του χώρου, ειδικότερα για κελύφη μικρότερης κλίμακας.[6]

Ο σχεδιασμός υπαίθριων μουσικών χώρων αποτελεί μία πρόκληση για την επίτευξη ενός συνδυασμού καλής ακουστικής και υψηλής αρχιτεκτονικής ποιότητας. Θεωρούμε πως είναι ένα θέμα που θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά σε θεωρητικό αλλά και σε πρακτικό επίπεδο, ειδικά στην Ελλάδα που διαθέτει το κατάλληλο μεσογειακό κλίμα για να φιλοξενεί υπαίθριες μουσικές παραστάσεις καθ'όλη σχεδόν τη διάρκεια του χρόνου.

6. Αναφορές

[1] M.D. Egan, *Architectural Acoustics*, J. Ross Publishing, Νέα Υόρκη (2007).

[2] B. Lemoine, *Architecture in France 1800-1900*, μτφρ. στα Αγγλικά Alexandra Bonfante-Warren, Harry N. Abrams, Inc Publishers, Νέα Υόρκη, Σελίδες 112-113 (1998)

[3] E. Thompson, *The Soundscape of Modernity: Architectural Acoustics and the Culture of Listening in America, 1900-1933*, The MIT Press, Σελίδες 254-256 (2002).

[4] Π.Α. Μιχελή, *Η Αισθητική της Αρχιτεκτονικής του Μπετόν Αρμέ*, Ίδρυμα Παναγιώτη και Έφης Μιχελή, Πέμπτη Έκδοση, Αθήνα (1990).

[5] L. Beranek, *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*, δεύτερη έκδοση, Springer-Verlag, Νέα Υόρκη, Σελίδες 89-92 (2004).

[6] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Burlington, Καλιφόρνια, Λονδίνο, σελ. 665 (2006).

7. Βιβλιογραφία

1. M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Spon Press, Λονδίνο και Νέα Υόρκη (2010).

2. L. Beranek, *Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture*, δεύτερη έκδοση, Springer-Verlag, Νέα Υόρκη, Σελίδες 89-92 (2004).

3. A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, εκδόσεις UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), Βαρκελώνη (1998).

4. M.D. Egan, *Architectural Acoustics*, J. Ross Publishing, Νέα Υόρκη (2007).

5. C.V. Heath, *The Inevitable Bandstand: The State Band of Oaxaca and the Politics of Sound*, University of Nebraska Press (2015).

6. M. Hurwitz, "The Hollywood Bowl: A Unique Blend of Natural Acoustics and Amplified Sound", MIX, 1 Οκτωβρίου 2014

7. B. Lemoine, *Architecture in France 1800-1900*, μτφρ. στα Αγγλικά Alexandra Bonfante-Warren, Harry N. Abrams, Inc Publishers, Νέα Υόρκη, Σελίδες 112-113 (1998).

8. M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, Καλιφόρνια, Λονδίνο (2006).

9. F. Loyer, *Le Siècle de l'Industrie 1789-1914*, Collection « De Architectura », Skira, Παρίσι, Σελίδες 170-171 (1983).

10. Π.Α. Μιχελή, *Η Αισθητική της Αρχιτεκτονικής του Μπετόν Αρμέ*, Ίδρυμα Παναγιώτη και Έφης Μιχελή, Πέμπτη Έκδοση, Αθήνα (1990).

11. P. Rabbits, *Bandstands of Britain*, The History Press, Stroud (2014).

12. P.E. Sabine, *Acoustics and Architecture*, McGraw-Hill Book Company, Inc., Νέα Υόρκη και Λονδίνο (1932).

13. L. Shiner, *The Invention of Art – A Cultural History*, The University of Chicago Press, Σικάγο και Λονδίνο, Σελίδες 93-94 (2001).

14. Α. Σωτηροπούλου, *Ακουστικός Σχεδιασμός Αιθουσών Ακροατηρίου*, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράματα και Βοηθήματα (www.kallipos.gr), Αθήνα (2015).

15. E. Thompson, *The Soundscape of Modernity: Architectural Acoustics and the Culture of Listening in America, 1900-1933*, The MIT Press, Μασαχουσέτη (2002).

16. Wegner, *Planning Guide for Performance Spaces Version 2.00*, Wenger Corporation, Owatonna (2008).

17. <https://www.archdaily.com/889713/how-acoustic-shells-work-and-how-to-design-them-effectively> (τ.π. 20/5/18, 18:20)

18. <https://www.hollywoodbowl.com/about/bowl/> (τ.π. 10/8/18, 11:40)

19. <https://naumburgconcerts.org/history/> (τ.π. 9/7/18, 12:35)

20. <http://www.paulrabbits.co.uk/the-history-of-the-bandstand> (τ.π. 15/7/18, 10:44)

Το φαινόμενο Lombard σε χώρους συνάθροισης κοινού· βιβλιογραφική επισκόπηση και τρόποι αντιμετώπισής του

Ι. Καραγιάννης
Μηχ/γος Μηχ/κός, ΕΜΠ
mediumswing@hotmail.com

Δ. Χριστοφορίδης
Ηλ/γος Μηχ/κός, ΑΠΘ
d.christoforidis@yahoo.com

Α. Σωτηροπούλου
Αν. Καθ. ΕΜΠ
alexia@central.ntua

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ήδη από το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα έχει αναγνωριστεί μια ιδιαίτερη ακουστική συνθήκη, γνωστή ως φαινόμενο Lombard που σχετίζεται με την προσπάθειά επικοινωνίας ανθρώπων που συνυπάρχουν σε έναν χώρο. Κατά την συνθήκη αυτή, οι ομιλώντες προσπαθούν να υπερνικήσουν τον θόρυβο περιβάλλοντος, που εν μέρει συνίσταται στις ταυτόχρονες ομιλίες, ολοένα αυξάνοντας την ένταση της φωνής τους, ανατροφοδοτώντας με αυτόν τον τρόπο το «εμπόδιο» που προσπαθούν να υπερβούν. Εξαιτίας του φαινομένου Lombard, παρατηρούνται δυσχέρειες στην επικοινωνία μεταξύ των παρισταμένων και σημαντική μείωση της ακουστικής άνεσης που προσφέρει ο χώρος, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται έντονα σημάδια κόπωσης και δυσφορίας, ειδικά σε όσους εργάζονται σε τέτοια περιβάλλοντα.

Παρότι, τα τελευταία χρόνια, το επιστημονικό ενδιαφέρον για το εν λόγω φαινόμενο αυξάνεται διαρκώς, παραμένει ένα από τα σύγχρονα θέματα της ακουστικής που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Συνδέεται δε, άμεσα με τους μηχανισμούς επεξεργασίας και κατανόησης της ανθρώπινης ομιλίας σε απαιτητικά περιβάλλοντα (βλ. φαινόμενο cocktail party).

Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες ακουστικής άνεσης σε χώρους συνάθροισης (πχ. εστιατόρια, μπαρ, φουαγιέ, αίθουσες αναμονής κλπ.), εκτός από την εξασφάλιση των τυπικών απαιτήσεων (πχ. ηχομόνωσης), πρέπει να τηρηθούν αρχές σχεδιασμού των χώρων που περιορίζουν το φαινόμενο Lombard.

Η παρούσα εργασία συνίσταται στην βιβλιογραφική αναδρομή του φαινομένου, στους τρόπους υπολογισμού που έχουν κατά καιρούς προταθεί για την έκταση του προβλήματος, καθώς και σε πρόσφατα παραδείγματα εφαρμογής ακουστικών λύσεων για τον περιορισμό του.

The Lombard effect in spaces for social gatherings; literature review and methods for its control

ABSTRACT

The Lombard effect describes the phenomenon of background noise increase due to simultaneous verbal communication. The aim of this study is to discuss the Lombard effect in spaces for social gatherings. A literature review is presented as well various guidelines regarding its control.

Εισαγωγή

Τόσο από την βιβλιογραφία όσο και από την καθημερινή εμπειρία είναι γνωστό ότι σε χώρους συνάθροισης κοινού (εστιατόρια, μπαρ, καφέ, αίθουσες αναμονής κλπ.) εντοπίζονται αυξημένα επίπεδα θορύβου [1], [2]. Αυτό συχνά συνεπάγεται δυσχέρειες στην επικοινωνία μεταξύ των παρισταμένων και σημαντική μείωση της ακουστικής άνεσης που προσφέρει ο χώρος, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται έντονα σημάδια κόπωσης και δυσφορίας, ειδικά σε όσους εργάζονται σε τέτοια περιβάλλοντα.

Κατά τη σχεδίαση ενός χώρου εστίασης, πχ, οι γενικές κατευθυντήριες οδηγίες για το μέγεθος και την κατανομή των τραπεζιών στον χώρο [3] κατά κύριο λόγο αγνοούν το πρόβλημα, με αποτέλεσμα να αποτυγχάνουν να δημιουργήσουν συνθήκες καλής ακουστικής άνεσης. Τα υψηλά επίπεδα θορύβου, τουλάχιστον στα εστιατόρια, είναι ανεπιθύμητα τον επιπλέον λόγο ότι αλλοιώνουν την αίσθηση της γεύσης [4]. Η γεύση επίσης επηρεάζεται από την μουσική βάθους που χρησιμοποιείται στα εστιατόρια, συνήθως για την (αναποτελεσματική) αντιμετώπιση του φαινομένου Lombard [5].

Η παρούσα εργασία συνίσταται στην σχετική βιβλιογραφική αναδρομή, στους τρόπους υπολογισμού που έχουν κατά καιρούς προταθεί για την έκταση του φαινομένου, καθώς και στην υπόδειξη βασικών αρχών σχεδίασης αντίστοιχων χώρων.

1. Περιγραφή του φαινομένου Lombard

Ήδη από το 1911, ο Étienne Lombard εξέτασε την προσαρμογή της ανθρώπινης φωνής στον ανταγωνιστικό θόρυβο βάθους [6]. Οι χώροι συνάθροισης κοινού, ως χώροι όπου ο άνθρωπος με την φωνή του συμβάλλει στον θόρυβο βάθους, τον οποίο ταυτόχρονα προσπαθεί να υπερνικήσει ώστε να καταστεί δυνατή η επικοινωνία του, είναι ίσως το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα του λεγόμενου φαινομένου Lombard.

Η άλλη πλευρά του ίδιου νομίσματος εκφράζεται κατά το φαινόμενο cocktail πάρτυ, δηλαδή με την ικανότητα ενός ατόμου να εστιάσει στα λεγόμενα του συνομιλητή του εν τη παρουσία ανταγωνιστικού θορύβου, ο οποίος προκαλείται από τις ομιλίες άλλων παρευρισκόμενων [7], [8].

Οι ακουστικές συνθήκες σε χώρους συνάθροισης είναι πολύπλοκες, καθώς συνυπάρχουν πολλαπλές πηγές (ομιλούντες παριστάμενοι, μουσικό υπόβαθρο) και πολλαπλοί ακροατές. Έτσι, ενώ πρέπει να εξασφαλιστούν συνθήκες χαμηλής στάθμης θορύβου βάθους ώστε να βελτιωθεί η επικοινωνία μεταξύ των συνομιλητών, ταυτόχρονα πρέπει ο θόρυβος βάθους να είναι τέτοιος ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες ιδιωτικότητας των συνομιλιών.

Η παραπάνω ακουστική συνθήκη δεν μπορεί να οριστεί αντικειμενικά [1], [9], [10], καθιστώντας την αντιμετώπιση του φαινομένου ακόμη δυσκολότερη.

2. Παράμετροι της ανάπτυξης του φαινομένου

Από τη βιβλιογραφία δεν προκύπτει μια ενιαία αντιμετώπιση του φαινομένου, ούτε είναι απολύτως ξεκάθαρος ο μηχανισμός ανάπτυξής του, πόσω μάλλον η υπόδειξη συγκεκριμένων, αντικειμενικών παραμέτρων που συνδέονται με αυτόν. Παράγοντες όπως η διάρκεια παραμονής στον χώρο [11], η διάθεση, η κατανάλωση

αλκοόλ κλπ [12], [13], [14], σαφώς επηρεάζουν την ανάπτυξη του φαινομένου, είναι όμως μάλλον αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν.

Από τις προτάσεις σχεδίασης και τα μοντέλα εκτίμησης της έκτασης του φαινομένου που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία, εξάγονται ως σχετικές με το φαινόμενο παράμετροι η γεωμετρία του χώρου, τα ακουστικά χαρακτηριστικά των επιφανειών του, το πλήθος και η διάταξη των παρευρισκομένων, καθώς και ο θόρυβος βάθους.

Η συζήτηση από νωρίς επικεντρώθηκε στη συνολική ηχοαπορρόφησή του χώρου και κατ' επέκταση στο χρόνο αντήχησης. Μια τέτοιου είδους αντικειμενιστική προσέγγιση, όμως, δεν λαμβάνει υπόψη την απουσία διάχυτου πεδίου, φαινόμενα σύζευξης, τη γεωμετρία και τη σχετική θέση των πηγών και των ακροατών στο χώρο.

Σχετικά με τους παρευρισκόμενους, καταρχήν ελέγχθηκε το πλήθος και πιο συγκεκριμένα ο λόγος των ταυτόχρονα ομιλούντων προς το σύνολο των ατόμων. [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] με δεδομένη τη στάθμη ομιλίας. Σημαντικές, επίσης, κρίνονται τόσο οι αποστάσεις μεταξύ των συνομιλητών σε κάθε ομάδα, όσο και οι αποστάσεις μεταξύ των διαφορετικών ομάδων [19], [20], ειδικά σε σχέση με την συνολική ηχοαπορρόφηση στον χώρο [21]. Και οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις βασίζονται σε μια σειρά παραδοχών (πχ. στάθμη «κανονικής» ομιλίας, επιδιωκόμενος λόγος σήματος-προς-θόρυβο κλπ), δίχως να λαμβάνονται υπόψη οι εκάστοτε κοινωνικές περιστάσεις (είδος συγκέντρωσης, επίπεδο γνωριμίας μεταξύ των συνομιλητών, η ηλικία [12]).

Όσον αφορά τον θόρυβο βάθους ενώ τονίζεται η ευεργετική παρουσία του, καθώς σκιάζει τις ομιλίες εκτός της κάθε ομάδας, παράλληλα συμβάλλει στην αύξηση του επιπέδου ομιλίας εντός της ομάδας [22], [23], [24], [25], [26], [27].

3. Προτεινόμενες παρεμβάσεις

Παρότι δεν μπορεί να οριστεί με αντικειμενικό τρόπο η ακουστική άνεση ενός χώρου [28], βάσει των προαναφερθέντων προσεγγίσεων έχουν διατυπωθεί κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό χώρων, όπου ευνοείται η ανάπτυξη του φαινομένου Lombard.

Σε γενικές γραμμές, η αραιή διάταξη μεταξύ των ομάδων ικανοποιεί ταυτοχρόνως και συνθήκες ιδιωτικότητας και συνθήκες ακουστικής άνεσης [14], [20].

Ο μέγιστος μέσος χρόνος αντήχησης για τις συχνότητες 500-2000 Hz που μετράται σε κενό κατάστημα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0.5-0.6 sec, ενώ η μέγιστη ισοδύναμη στάθμη θορύβου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 60 dB(A) [29]. Οι συνθήκες αυτές θεωρείται ότι εξασφαλίζουν ικανοποιητικό λόγο σήματος-προς-θόρυβο (βλ. 0 dB(A)).

Ο όγκος ανά παριστάμενο δεν πρέπει να ξεπερνά το χρόνο αντήχησης του χώρου επί 20 m³ [14]. Αν και 3,5 m² ηχοαπορρόφησης ανά παρευρισκόμενο σε συνθήκες κανονικής ομιλίας φαίνεται να επαρκούν [16], σε μεγαλύτερους χώρους η ποσότητα ηχοαπορρόφησης προτείνεται να αυξηθεί σε 5-10 m² ανά άτομο [19].

Αναπαραγωγή μουσικής σε λογική στάθμη μπορεί να συμβάλει ως παράγοντας επικάλυψης των ομιλιών, αυξάνοντας τις συνθήκες ιδιωτικότητας, αρκεί να μην υπερβαίνει τα 60 - 65 dB(A), καθώς τότε θα οδηγήσει στην αύξηση της έντασης ομιλίας [14]. Βέβαια κάτι τέτοιο σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το είδος της μουσικής, καθώς και από την ποιότητα του συστήματος αναπαραγωγής και της σχέση του με τις απαιτήσεις του χώρου.

4. Συζήτηση

Η συνολική ηχοαπορρόφηση, σε συνδυασμό με την πυκνότητα κάλυψης, φαίνεται να είναι οι σημαντικότερες παράμετροι ελέγχου του φαινομένου, παρότι οι πρώτες έρευνες υπέδειξαν τη ρύθμιση του χρόνου αντήχησης για το ρόλο αυτό. Ο χρόνος αντήχησης, αν και συνδέεται με αυτές τις παραμέτρους, δεν αρκεί για να περιγράψει και να περιορίσει το φαινόμενο [19].

Κατά τον σχεδιασμό των χώρων συνάθροισης σπάνια λαμβάνεται υπόψη η ανάπτυξη του φαινομένου Lombard. Ειδικά στην χώρα μας, τα κασταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος σχεδιάζονται με κύριο γνώμονα την μέγιστη εκμετάλλευση του χώρου και όχι της ακουστικής άνεσης. Το γεγονός αυτό αφενός τα καθιστά ιδιαίτερα ευπαθή στην ανάπτυξη του φαινομένου Lombard κι αφετέρου δεν επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στον μηχανικό κατά την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ουσιαστικά η μόνη δυνατή παρέμβαση είναι η εισαγωγή ηχοαπορρόφησης. Λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες τάσεις διακόσμησης που υποδεικνύουν τη χρήση στιλπών επιφανειών (τζαμαρίες, inox κλπ), το μόνο πρόσφορο σημείο παρέμβασης είναι η οροφή. Όμως, η πολύπλοκη γεωμετρία και η εν γένει ανομοιόμορφη κατανομή των θέσεων, κυρίως στα μικρότερα καταστήματα, καθιστά την παρέμβαση αυτή ανεπαρκή. Ως εκ τούτου, οι προτάσεις ακουστικής βελτίωσης πρέπει να περιλαμβάνουν την τοποθέτηση ηχοαπορροφητικών διατάξεων, ή τουλάχιστον συνδυασμού ηχοαπορρόφησης και διάχυσης, κοντά στις πηγές ομιλίας/θορύβου, καλύπτοντας και τις τρεις διαστάσεις του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του [28]. Υπό αυτή την έννοια, άξιο διερεύνησης είναι ο ρόλος τους κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων (EDT) κατά την ανάπτυξη του φαινομένου, σε σχέση με τον μετρούμενο χρόνο αντήχησης (T_{20} , T_{30}). Εναλλακτικά, προτείνεται η τοποθέτηση συνδυασμού διαχυτικών και ηχοαπορροφητικών επιφανειών.

Αν και το φαινόμενο Lombard κυρίως συνδέεται με το φάσμα της ομιλίας [30], δεδομένου ότι οι περισσότεροι χώροι συνάθροισης πλέον διαθέτουν και σύστημα αναπαραγωγής μουσικής, οι παρεμβάσεις θα πρέπει να εξασφαλίζουν ισορροπία σε ευρύτερο συχνοτικό φάσμα.

Ενδιαφέρον, όσον αφορά στη φιλοσοφία σχεδίασης, παρουσιάζει η εισαγωγή του μεγέθους της ακουστικής χωρητικότητας [12], [13], [14]. Το μέγεθος αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό του χώρου, εκφράζει το μέγιστο αριθμό ομιλούντων ατόμων που δύναται αυτός να φιλοξενήσει και ουσιαστικά καθορίζει τα όρια παρέμβασης.

Τέλος, δεδομένου ότι το φαινόμενο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από ποιοτικά χαρακτηριστικά που συνδέονται με το εκάστοτε κοινωνικό πλαίσιο, καθιστούν κάθε περίπτωση σχεδίασης πολύπλοκη και ξεχωριστή.

5. Βιβλιογραφία

- [1] L.H. Christie «Psycho-to building acoustics; are bars, cafes, restaurants acceptable acoustic environments» in *Independent Research Acoustics in the Hospitality Industry*, Victoria University of Wellington (2004)
- [2] L. Knudsen, «Syns-og hørselshemmedes opplevelse av lydforhold i rom og arealer» Norwegian Institute for Urban and Regional Research, (2011).
- [3] F. Lawson et al. «Catering design». in *New Metric Handbook*, edited by T. Tutt et al. The Architectural Press Ltd, chapter 18 (1979)
- [4] A.T. Woods et al. «Effect of background noise on food perception» in *Food Quality and Preference* **22**, pp 43-47 (2011)
- [5] J.F. Fiegel et al. «Background music genre can modulate flavor pleasantness and overall impression of food stimuli» *Appetite* **76**, pp 144-152 (2014)
- [6] Lombard E., «Le signe de l'élévation de la voix» *Annales des maladies de l'Oreille, du Larynx, du Nez et du Pharynx*, **37**, pp 101-119 (1911).
- [7] C.Cherry «Cocktail party problem» *J. Acoust. Soc. Am* **25**(4), pp 975-979 (1953)
- [8] I. Pollack, J.M. Pickett «Cocktail party effect» *J. Acoust. Soc. Am* **29**(11), pp 1262 (1957)
- [9] R.M. Schafer «The soundscape; our sonic environment and the tuning of the world» *Environmental Ethics* **18**(3), pp 331-333 (1996)
- [10] J.D. Porteous, J.F. Mastin «Soundscape» *J. Architectural Planning and Research* **2**(3), pp 169-186 (1985)
- [11] H.C. Wu, Z. Mohi, «Assessment of Service Quality in the Fast-Food Restaurant», *J. Foodserv. Bus. Res.* **18**(4), pp 358-388 (2015)
- [12] J.H. Rindel «Acoustical capacity as a means of noise control in eating establishments» in *Joint Baltic Nordic Acoustics Meeting* (2012)
- [13] J.H. Rindel «Acoustic capacity as a means to deal with poor restaurant acoustics» *Acoustics Bulletin* **39**(4), pp 27-30 (2014)
- [14] J.H. Rindel «The Acoustics of places for social gatherings» in *Euronoise*, pp 2429-2436 (2015)
- [15] W.R. Maclean «On the acoustics of cocktail parties» *J. Acoust. Soc. Am* **31**, pp 79-80 (1959)
- [16] E. de Ruiter «Feedback from the foodcourt» in *ICSV22*, pp 1-7 (2015)
- [17] Δ. Σκαρλάτος «Εφαρμοσμένη ακουστική» (3rd Ed) Gotsis, pp 173-175 (2008)
- [18] W.M. To, A. Chung «Noise in restaurants levels and mathematical model» *Noise Health* **16**(73), pp 368-373 (2014)
- [19] E. de Ruiter «Lombard effect, speech communication and the design of large (public) spaces» in *Forum Acusticum*, pp 1577-1581 (2011)
- [20] A. Astolfi, M. Filippi «Good acoustical quality in restaurants: a compromise between speech intelligibility and privacy» in *18th International Congress on Acoustics*, pp II 1201 -1204 (2004)
- [21] M. Long «*Architectural Acoustics*» Elsevier Academic Press, pp 604-605 (2006)
- [22] T.S. Korn «Effect of psychological feedback on conversational noise reduction in rooms» *J. Acoust. Soc. Am.* **26**(5), pp 793-795 (1954)
- [23] J.C. Webster, R.G. Klumpp, «Effects of ambient noise and nearby talkers on a face-to-face communication task» *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, pp 936-941 (1962)

- [24] M.B. Gardner, «Factors affecting individual and group levels in verbal communication». *J. Audio. Eng. Soc.* **19**, pp 560-569, (1971)
- [25] H. Lane, B. Tranel. «The Lombard sign and the role of hearing in speech» *J. Speech Language and Hearing Research* **14**, pp 677-709 (1971)
- [26] A.W. Bronkhorst, «The cocktail party phenomenon; A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions» *Acta Acustica united with Acustica* **86**, pp 117-128 (2000)
- [27] H. Lazarus «Prediction of verbal communication in noise; a review, pt1» *Applied Acoustics* **19**(6), pp 439-464 (1986)
- [28] J. Kang «Numerical modelling of the speech intelligibility in dining spaces» *Applied Acoustics* **63**(12), pp 1315–1333 (2002)
- [29] U. S. Architectural and Transportation Barriers Compliance Board, «Quiet Area in Restaurants», C. No. QA 92004001, (1993)
- [30] L.M. Stowe, E.J. Golob «Evidence that the Lombard effect is frequency-specific in humans» *J. Acoust. Soc. Am.* **134**(1), pp 640-647 (2013)

Θεατρικές σκηνές στην μεταπολεμική Ελλάδα του μοντερνισμού. Φυσικές ακουστικές μετρήσεις

Α. Σωτηροπούλου¹, Ι. Καραγιάννης², Μ. Σκούτα³, Β. Λουίζος⁴, Γ. Πετρόπουλος⁵,
Π. Πάνου⁶, Π. Σπύρου⁷, Σ. Βουγιούκας⁸, Π. Μπαλιάκας⁹,
Γ. Βλάχος¹⁰, Δ. Χριστοφορίδης¹¹

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα

email: ¹:alexiasotirop@gmail.com, ²:mediumswing@hotmail.com,

³:maria_skout@hotmail.gr, ⁴:louizosbill@gmail.com, ⁵:ggpetrop7@gmail.com,

⁶:penny14panou@gmail.com, ⁷:evhspyrou@yahoo.gr, ⁸:vousta13@hotmail.com

⁹:mpaliaka@hotmail.com, ¹⁰:vlachosemp@gmail.com, ¹¹:d.christoforidis@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το παρόν άρθρο αποσκοπεί να εξετάσει ελληνικές θεατρικές σκηνές του μεταπολεμικού μοντερνισμού στην Ελλάδα, σε σχέση με την ακουστική τους απόδοση και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό τους. Ακουστικές μετρήσεις διενεργήθηκαν σε επτά θεατρικές σκηνές. Δύο τύποι θεάτρων παρατηρούνται στην υπό εξέταση εποχή: τα θέατρα τύπου “less is more” και τα «αυτοτελή». Βρέθηκε ότι η ανθρώπινη κλίμακα που υιοθετούν θέατρα του πρώτου τύπου ευνοεί τον ακουστικό σχεδιασμό των, σε αντίθεση με την άλλη κατηγορία που χρειάζεται επιπρόσθετα σχεδιαστικά στοιχεία για να ελεγχθεί η ακουστική των. Αναλύονται επί μέρους χαρακτηριστικά. Τα παρόντα αποτελέσματα διαφωτίζουν ως προς τις επιπτώσεις του αρχιτεκτονικού ύφους στην ακουστική απόδοση του θεάτρου και αναδεικνύουν εν γένει χαρίσματα των υπό εξέταση θεάτρων.

Drama theatres of modernity in postwar Hellas; Physical acoustic measurements

ABSTRACT

This paper aims to examine the acoustical performance of drama theatres of modernity in postwar Hellas, in relation to their architecture. Acoustic measurements were carried out in seven theatres. Two theatre types are observed in this period, namely the type “less is more” and “detached” theatres. The first theatre type is usually hosted in the basement of multistory modern buildings; the other theatre type occupies an entire building in itself. It is demonstrated that the human scale which is adopted by the theatre type “less is more” works synergistically with good acoustics; by contrast the other theatre type needs additional building elements to achieve satisfactory sound performance. The present results illustrate the implications of architectural design on the acoustical performance of the theatres and demonstrate, by and large, the acoustical merits of the test auditoria.

Εισαγωγή

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού στα αστικά κέντρα κυρίως λόγω αστυφιλίας, σε συνδυασμό με την εξέλιξη και την αγάπη του Έλληνα για την τέχνη του θεάτρου, είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία πληθώρας νέων θεατρικών σκηνών στην μεταπολεμική Ελλάδα του μοντερνισμού. Δυο τάσεις παρατηρούνται. Η πρώτη ενσαρκώνει το δόγμα του μοντερνισμού που συνοψίζεται στο μότο "less is more" («ουκ εν τω πολλώ το ευ»), και χρησιμοποιεί το περιορισμένων διαστάσεων ισόγειο ή υπόγειο νεόδμητων αστικών πολυκατοικιών για να χωρέσει τα νέα θέατρα της εποχής. Η άλλη τάση επιλέγει την ευρυχωρία του αυτοτελούς κτιρίου με χρήση αποκλειστικά το θέατρο, με παράδειγμα τα θέατρα που ανεγέρθησαν τότε υπό την αιγίδα του Υπ. Πολιτισμού σε διάφορες ελληνικές πόλεις.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης μελέτης στο Ε.Μ.Πολυτεχνείο και έχει στόχο να καταγράψει θέατρα της μεταπολεμικής Ελλάδας του μοντερνισμού καθώς και να διερευνήσει την ακουστική των απόδοσης σε σχέση με το αρχιτεκτονικό ύφος και τα χαρακτηριστικά των. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων από θέατρα της ως άνω περιόδου.

1. Βιβλιογραφική αναδρομή

Από τις πρώτες προσπάθειες που έγιναν για να συσχετίσουν την ακουστική απόδοση με την αρχιτεκτονική των θεάτρων, είναι η εργασία των Talaske και Boner [1] και περιλαμβάνει απλή καταγραφή σχετικών δεδομένων σε πολλά θέατρα ανά τον κόσμο. Εμπειριστατωμένη έρευνα στο θέμα είναι η εργασία του Barron [2]. Η εργασία, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει επιτόπιες μετρήσεις σε δώδεκα θέατρα της Μεγάλης Βρετανίας και μεταξύ άλλων συμπερασμάτων καταλήγει στα εξής: ο επιθυμητός χρόνος αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες είναι από 1.0s έως περίπου 0.75s σε θέατρο χωρίς ακροατήριο, οι μικρές αποστάσεις ακροατών-δρώμενων ευνοούν την ακουστική, οι βαθείς εξώστες είναι δεκτοί, ο προσκηνιακός τύπος θεάτρου είναι πλεονεκτικός, κλπ. Μελέτη, εν εξελίξει, στο ανωτέρω θέμα γίνεται στο ΕΜΠ και συνοψίζεται στο [3].

2. Μεθοδολογία και πειραματική διαδικασία

Οι φυσικές ακουστικές παράμετροι, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη και θεωρούνται αντιπροσωπευτικές [2], είναι οι: **α) Κλάσμα πρώιμων ανακλάσεων "50EEF"** (Μέτρο καταληπτότητας της ομιλίας. Ανεκτό όριο ≥ 0.50), **β) Χρόνος αντήχησης της αίθουσας "RT (s)"**, **γ) Απόσβεση της στάθμης έντασης του ήχου "G (dB)" από την πηγή**, και **δ) Θορυβος βάθους "L_{Aeq} (dBA)"**.

Εδώ παρουσιάζονται μετρήσεις στη μεσαία περιοχή του φάσματος (μ.ο. 500, 1.000 Hz). Επιθυμητές τιμές για τον Χρόνο αντήχησης, βλέπε ανωτέρω. Μέγιστη ανεκτή στάθμη θορύβου βάθους επιλέγεται "31.0 dBA". Μέγιστη επιθυμητή απόσβεση της έντασης του ήχου "23.5 dB" [3].

3. Ακουστικές μετρήσεις

Οι μετρήσεις έγιναν σε επτά θεατρικές σκηνές χωρίς ακροατήριο και χωρίς κλιματισμό (Πίνακας 3.1). Απεικονίσεις των θεάτρων «Πόρτα», «Κάλπα» και «Τζένη Καρέζη» δίδονται στο άρθρο [3]. Όλα είναι προσκηνιακής διάταξης πλην του «Τζένη Καρέζη» που είναι αμφιθεατρικής. Παρότι τα περισσότερα έχουν υποστεί ανακαινίσεις, δεν έχει αλλάξει η γεωμετρία και το μέγεθός τους.

Μετρήσεις ελήφθησαν διαδοχικά: **1)** Με ισότροπη πηγή (δωδεκάεδρη, Brüel & Kjær), η οποία τοποθετήθηκε στο κέντρο της σκηνής, 1.5 μ. από την εμπρός άκρη της, και **2)** με κατευθυντική πηγή, που προσομοιάζει την κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής, και χρησιμοποιείται στο πλάι της σκηνής, 2 μ. από τον άξονα συμμετρίας, με φορά προς το κέντρο της σκηνής. Οι θέσεις μέτρησης σε κάθε θέατρο ποικίλλουν από 8 μέχρι 16 (Σχήματα 4.5-4.8). Οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με το σχετικό ISO [4]. Περαιτέρω λεπτομέρειες βλέπε στο άρθρο [3].

Πίνακας 3.1 Βασικές πληροφορίες για τις θεατρικές σκηνές. Το RT_{mid} αφορά στον χρόνο αντήχησης για τις μεσαίες συχν. (μ.ο. 500, 1000Hz), χωρίς ακροατήριο

Θέατρο	«Άλφα Ιδέα»	«Στόα»	«Κάλπα»	«Τζένη Καρέζη»	«Πόρτα»	«Άνεσις»	«ΔΗΘΕΛΑ»
Χρονολογία	Κατασκευή 1956, Ανακαίνιση 1977 & 2005	Κατασκευή: 1971	Κατασκευή: 1976, Ανακαίνιση: 1997	Κατασκευή: 1978, Ανακαίνιση: 1989	Κατασκευή: 1984, Ανακαίνιση: 2014	Κατασκευή: 1950, Ανακαίνιση 2004	Κατασκευή: 1961
Αρχιτέκτονας	ΑΦΟΙ Μπίτσου	Α. Κυρίση Κολλλάρου	Ρ. Ε. Αρβανίτης	Α. Γ. Γκοτοβός	Μ. Φωτιάδης	Κριθαράς, Χαραγκιώνης	Κ. Θ. Λασκαριδής
Χωρητικότητα (άτομα)	276	300	340	300	320	260	450
Όγκος (m ³)	1480	2100	1360	1350	1840	2680	2965
Όγκος ανά θέση (m ³)	5,4	7	4	4,5	4,8	13,1	6,6
Μήκος (m)	22,80	23,50	18,60	20,30	18,90	26,00	26,10
Πλάτος (m)	14,70	16,00	18,00	21,50	20,20	15,90	18,30
Ύψος (m) [min - max]	3,05 - 4,70	2,60 - 6,55	2,60 - 5,70	2,10 - 5,00	4,00 - 5,90	4,10 - 8,80	3,13 - 10,15
Εμβαδό (m ²)	369	376	324	370	383	Πλατεία: 418 Εξώστης: 176	Πλατεία: 446 Εξώστης: 176
RT_{mid} (s)	0,74	0,96	0,60	0,75	0,77	0,93	0,58

4. Αποτελέσματα και ερμηνεία

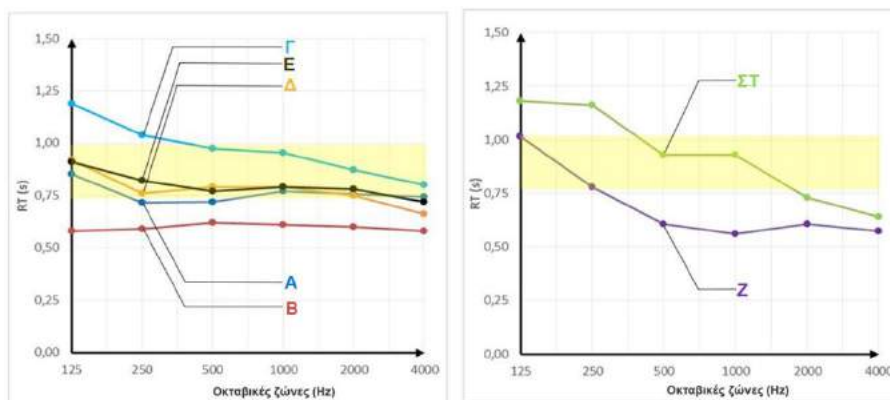
Τα αποτελέσματα φαίνονται στα Σχήματα 4.1-4.4. Όλα τα θέατρα χαρακτηρίζονται από τη λιτότητα του μοντερνισμού. Η πρώτη κατηγορία εξ αυτών, δηλαδή τα αυτοτελή θέατρα, χαρακτηρίζονται από αυξημένο ύψος αίθουσας, κατά μέσο όρο γύρω στα 10 μ. και είναι τα πρώτα δύο θέατρα που ακολουθούν. Τα υπόλοιπα πέντε είναι από την κατηγορία θεάτρων του τύπου “less is more”, και διαθέτουν μέσο ύψος γύρω στα 4.5 μ. Σε όλα τα θέατρα τα καθίσματα είναι επενδεδυμένα με παχιά ηχοαπορροφητική στόφα.

Θέατρο Άνεσις (Σχήμα 4.5). Αυτό το θέατρο των αρχών της μεταπολεμικής περιόδου διατηρεί τις μνημειώδεις διαστάσεις των θεάτρων του μεσοπολέμου. Αρχικά λειτούργησε ως σινεμά και μεταγενέστερα μετετράπη σε θεατρική σκηνή. Το υπερβολικό ύψος έχει ως αποτέλεσμα τον αυξημένο χρόνο αντήχησης, ο οποίος, παρ’ όλες τις ηχοαπορροφητικές επενδύσεις που τοποθετήθηκαν κατά την ανακαίνιση, παραμένει αυξημένος στις χαμηλές συχνότητες. Η υπερβολικά υψηλή οροφή έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη πρώιμων ανακλάσεων στον εξώστη· ενώ στην πλατεία τα

πίσω καθίσματα δέχονται πρώιμες ανακλάσεις από την οροφή του προβόλου του εξώστου. Οι πρώτες θέσεις της πλατείας προφανώς έχουν έντονο απευθείας ήχο. Η απόσβεση της στάθμης έντασης του ήχου (G) είναι ουσιαστικά μηδενική κυρίως λόγω των εξαιρετικά ανακλαστικών σκηνικών που ήταν εγκατεστημένα κατά τη διάρκεια της παρούσας μέτρησης. Ζώνη ανάσχεσης (φουαγιέ) μεταξύ της αίθουσας και της Λ. Κηφισίας προστατεύει τον χώρο από την ηχορρύπανση.

Δημοτικό Θέατρο Λαμίας (Σχήμα 4.7). Ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες είναι κάτω των επιθυμητών ορίων χάρις στα πορώδη ηχοαπορροφητικά που φέρει η αίθουσα στις πλαϊνές παρειές και τον πίσω τοίχο. Χάρη στους ανακλαστήρες που φέρει η αίθουσα στην οροφή της υπάρχει άπλετη πρώιμη ηχητική ενέργεια, η οποία φαίνεται και στις τιμές του μετρηθέντος 50EEF (Σχήμα 4.2). Η σχετικά αυξημένη ηχοαπορρόφηση στην αίθουσα έχει σαν αποτέλεσμα τη σχετικά έντονη πτώση της στάθμης έντασης του ήχου (G), ωστόσο παραμένει εντός ορίων. Η αίθουσα είναι εξαιρετικά προστατευμένη από εξωτερικούς θορύβους χάρη στη ζώνη ανάσχεσης που την περιβάλλει, δηλαδή διάδρομοι και φουαγιέ στις τρεις πλευρές της και βοηθητικοί χώροι στην πλευρά της σκηνής.

Άλφα Ιδέα (Σχήμα 4.6). Καταλαμβάνει το υπόγειο πολυκατοικίας της εποχής του. Ο χρόνος αντήχησης είναι εντός των δεκτών ορίων σε όλο το φάσμα με σχετική μείωση στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες ως προς τις χαμηλές λόγω της εκτενούς ηχοαπορροφητικής υφής του δαπέδου (μοκέτα). Το θέατρο διαθέτει ανακλαστική οροφή, καθώς και πλευρικές παρειές και αυτό φαίνεται στις τιμές του 50EEF που είναι εντός επιθυμητών ορίων σε όλη την αίθουσα. Ο πίσω τοίχος φέρει στοιχεία διάχυσης. Η απόσβεση της στάθμης έντασης του ήχου (G) είναι μέσα στα επιθυμητά όρια χάρις στις ανακλαστικές επιφάνειες του χώρου και τις μικρές αποστάσεις ακροατηρίου από τη σκηνή.

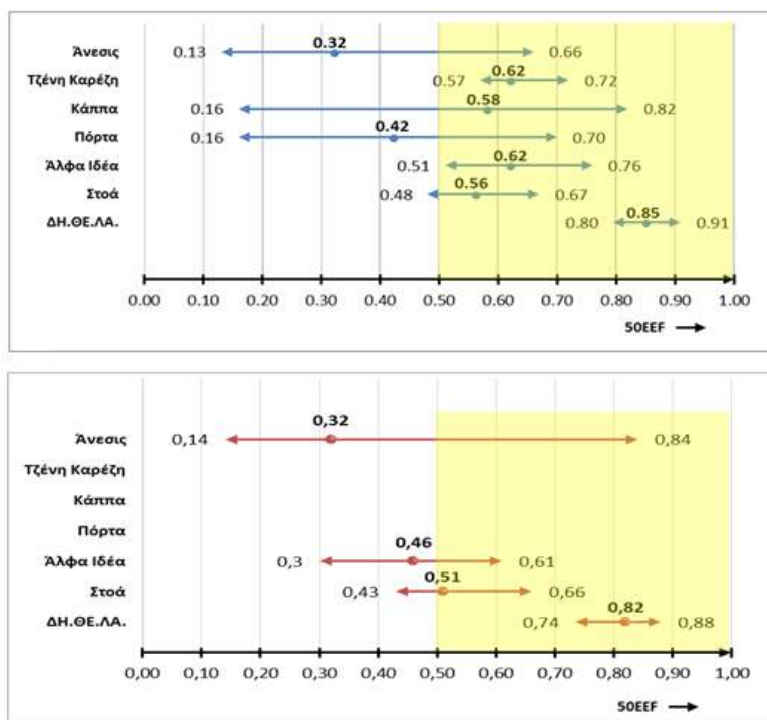


Σχήμα 4.1 Μετρήσεις του χρόνου αντήχησης (RT) σε όλο το φάσμα συχνοτήτων.

A. Άλφα Ιδέα, **B.** Κάππα, **G.** Στοά, **Δ.** Πόρτα, **E.** Τζένη Καρέζη, **ΣΤ.** Άνεσις, **Ζ.** Δημοτικό Θέατρο Λαμίας. Επιθυμητά όρια.

Η είσοδος του θεάτρου βρίσκεται εντός «στοάς», η δε αίθουσα προστατεύεται με την ύπαρξη φουαγιέ (χώρος ανάσχεσης) από την κύρια είσοδο του θεάτρου. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική ηχοπροστασία της αίθουσας.

Στοά (Σχήμα 4.8). Το θέατρο αυτό καταλαμβάνει το ισόγειο και τον πρώτο όροφο πολυκατοικίας και έχει σχετικά αυξημένο ύψος (6,5 μ.). Ο χρόνος αντήχησης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες είναι εντός των ανεκτών ορίων ενώ στις χαμηλές είναι σχετικά αυξημένος. Αυτό οφείλεται στο ύψος του χώρου σε συνδυασμό με τις κουρτίνες που καταλαμβάνουν εκτενή επιφάνεια των πλευρικών παρειών και προφανώς απορροφούν από τη μεσαία περιοχή του φάσματος και πάνω. Το θέατρο διαθέτει ανακλαστική οροφή η οποία έχει ως αποτέλεσμα την επάρκεια όλων των θέσεων του ακροατηρίου σε πρώιμες ανακλάσεις. Η απόσβεση της στάθμης έντασης του ήχου (G) είναι μέσα στα επιθυμητά όρια, όπως μετρήθηκε με την ισότροπη πηγή, χάρη στην ανακλαστική οροφή του χώρου και στις μικρές αποστάσεις ακροατηρίου από τη σκηνή. Ωστόσο, όταν η μέτρηση έγινε με την κατευθυντική πηγή, η απόσβεση της στάθμης της έντασης του ήχου γίνεται οριακά δεκτή, λόγω της απορρόφησης που υφίσταται στην ηχοαπορροφητική κουρτίνα των παρειών του χώρου.



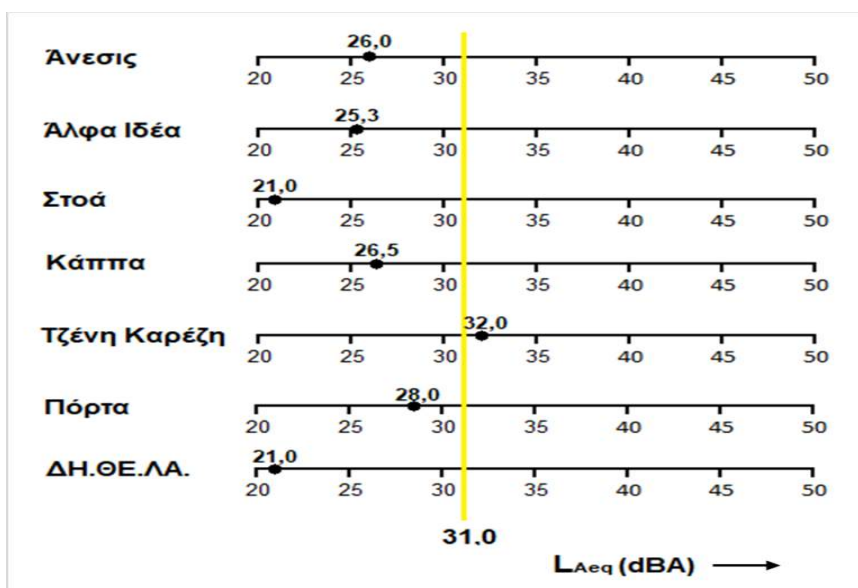
Σχήμα 4.2 Μετρήσεις του κλάσματος πρώιμων ανακλάσεων (50EEF). Για κάθε θέατρο απεικονίζονται μέση τιμή, μέγιστη, και ελάχιστη.

: ισότροπη πηγή : κατευθυντική πηγή

Τα υπόλοιπα τρία θέατρα, δηλαδή το **Θέατρο «Κάππα»**, το **Θέατρο «Πόρτα»** και το **Θέατρο «Τζένη Καρέζη»** περιγράφονται στο άρθρο [3].

Τα θέατρα που εξετάστηκαν διακρίνονται για τις μικρές αποστάσεις των δρώμενων από τη σκηνή, χάρη στις οποίες επικρατεί σχετικά αυξημένη πρώιμη ηχητική ενέργεια στον χώρο. Παρόλα αυτά, η κατηγορία των «αυτοτελών» θεάτρων

διακρίνεται για το σχετικά αυξημένο ύψος της αίθουσας, το οποίο οδηγεί σε αυξημένο χρόνο αντήχησης. Αυτός ελέγχεται μεν στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες με τη χρήση πορώδους ηχοαπορροφητικού στον χώρο ενώ στη χαμηλή περιοχή του φάσματος οι τιμές παραμένουν σχετικά αυξημένες. Η κατηγορία των θεάτρων “less is more”, όμως, διαθέτει μέτρια ύψη που είναι συμβατά με την ανθρώπινη κλίμακα που υιοθετείται σε αυτό τον τύπο θεάτρου. Χάρη σε αυτά τα ύψη επιτυγχάνονται επιθυμητές τιμές του χρόνου αντήχησης. Η κατηγορία των «αυτοτελών» θεάτρων με τα σχετικά μεγάλα ύψη στερείται εγγύς ανακλαστικών επιφανειών. Ωστόσο, αυτή η κατηγορία θεάτρων διαθέτει εξώστες των οποίων ο πρόβολος λειτουργεί ως χρήσιμη ανακλαστική επιφάνεια που υποκαθιστά την απομακρυσμένη οροφή για μια μερίδα του ακροατηρίου. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση πρόσθετων ανακλαστικών. Αντίθετα, η κατηγορία θεάτρων “less is more” διαθέτει εγγύς ανακλαστικές επιφάνειες χάρη στις μικρές διαστάσεις του χώρου που υπαγορεύονται από την τάση «οὐκ ἐν τῷ πολλῷ τὸ εὖ». Όλα τα θέατρα, εν γένει, βρέθηκαν ότι είναι προστατευμένα από την αστική ηχορρύπανση, χάρις κυρίως στις ζώνες ανάσχεσης (προθάλαμοι κλπ) που περιβάλλουν τις αίθουσες. Τα παραπάνω ευρήματα που προέκυψαν με ισότροπη πηγή είναι παρεμφερή με εκείνα που προέκυψαν με τη χρήση κατευθυντικής πηγής. Αυτό επιβεβαιώνει τα πλεονεκτήματα των θεάτρων προσκηνιακού τύπου.



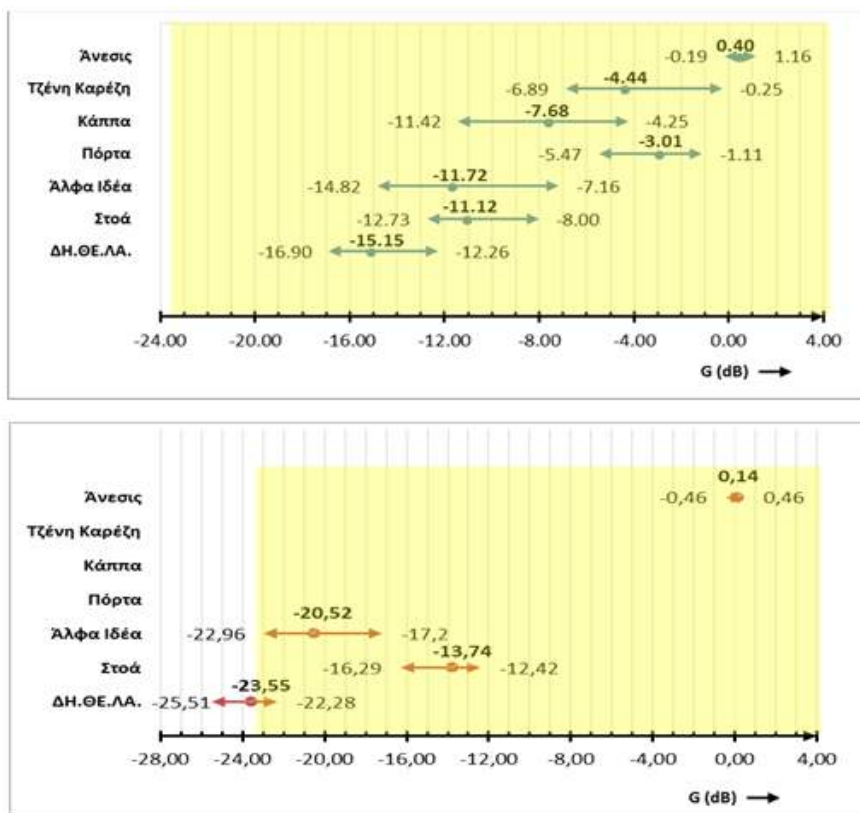
Σχήμα 4.3 Μετρήσεις θορύβου βάθους στα υπό εξέταση θέατρα (L_{Aeq})

5. Συμπεράσματα

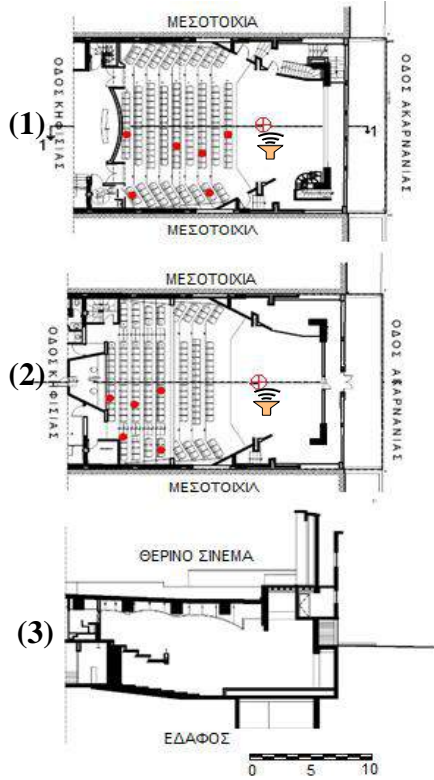
Η ανθρώπινη κλίμακα που υιοθετείται στις διαστάσεις του τύπου θεάτρου “less is more” ευνοεί τον ακουστικό σχεδιασμό των, σε αντίθεση με την κατηγορία των «αυτοτελών» θεάτρων της ίδιας εποχής, τα οποία διαθέτουν μεγαλύτερα ύψη και χρειάζονται επιπρόσθετα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως, ειδικούς ανακλαστήρες

και ηχοαπορροφητικές επενδύσεις για να ελεγχθεί η ακουστική των. Κοινό πλεονέκτημα των θεάτρων αυτής της εποχής είναι οι μικρές αποστάσεις σκηνής - ακροατών και το γεγονός ότι στην πλειοψηφία των είναι προσκηνιακού τύπου. Τέλος, όλα βρέθηκαν να διαθέτουν επαρκή σχεδιασμό ηχοπροστασίας.

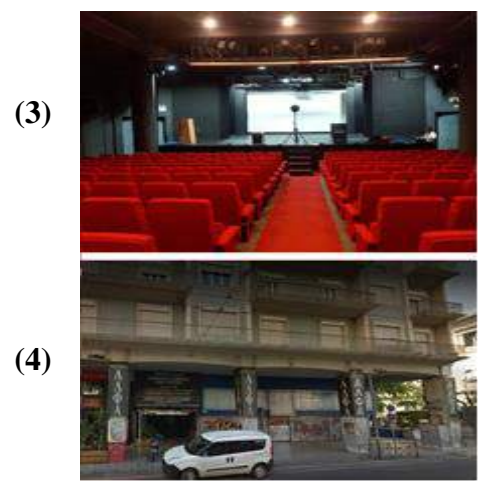
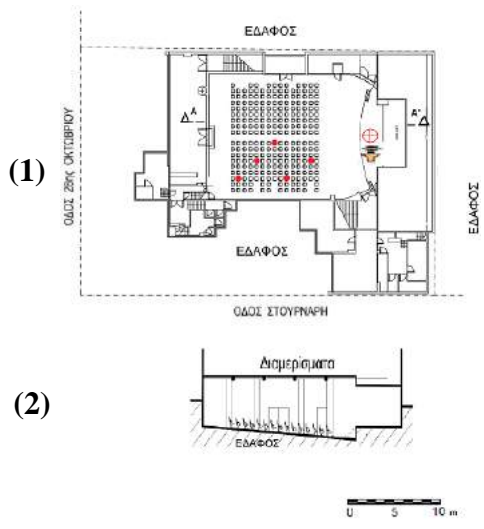
Τα παρόντα αποτελέσματα διαφωτίζουν ως προς τις επιπτώσεις του αρχιτεκτονικού ύφους και σχεδιασμού στην ακουστική απόδοση του θεάτρου και αναδεικνύουν εν γένει χαρίσματα των υπό εξέταση θεάτρων.



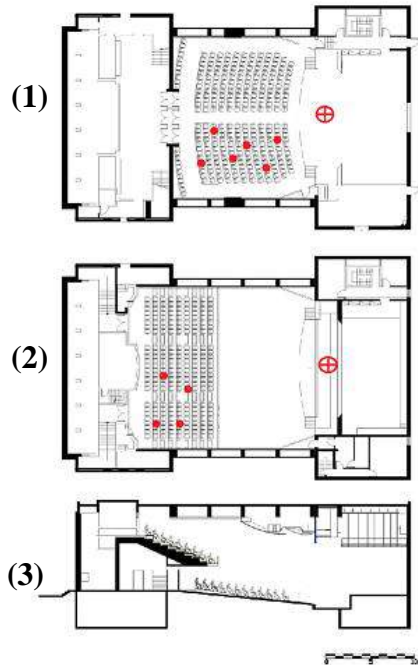
Σχήμα 4.4: Μετρήσεις της απόσβεσης της στάθμης έντασης του ήχου (G) ως προς την ένταση του ήχου στο 1 μ. από την πηγή (0 dB) Για κάθε θέατρο απεικονίζονται μέση τιμή, μέγιστη, και ελάχιστη.
 : ισότροπη πηγή : κατευθυντική πηγή



Σχήμα 4.5 Θέατρο Άνεσις.
 (1) Κάτοψη πλατείας, (2) Κάτοψη εξώστη, (3) Τομή 1-1,
 (4) Αποψη πλατείας από τη σκηνή,
 (5) Εξωτερική άποψη,
 ⊕: ισότροπη πηγή, ●: θέσεις μέτρησης
 ☛: κατευθυντική πηγή



Σχήμα 4.6 Θέατρο Άλφα Ιδέα.
 (1) Κάτοψη πλατείας, (2) Τομή ΑΑ',
 (3) Άποψη σκηνής από την πλατεία, (4)
 Εξωτερική άποψη, ⊕: ισότροπη πηγή,
 ☛: κατευθυντική πηγή ●: θέσεις μέτρησης

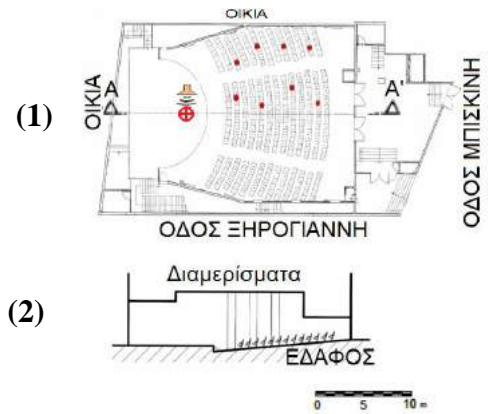


Σχήμα 4.7 Δημ. Θέατρο Λαμίας.

(1) Κάτοψη πλατείας, (2) Κάτοψη εξώστη, (3) Τομή 1-1,

(4) Άποψη πλατείας από τη σκηνή, (5) Εξωτερική άποψη

⊕: ισότροπη πηγή, ●: θέσεις μέτρησης
 ☛: κατευθυντική πηγή



Σχήμα 4.8 Θέατρο Στοά.

(1) Κάτοψη πλατείας, (2) Τομή ΑΑ', (3) Άποψη σκηνής από την πλατεία,

(4) Εξωτερική άποψη

⊕ : ισότροπη πηγή, ● : θέσεις μέτρησης
 ☛ : κατευθυντική πηγή

6. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται στον κοσμήτορα της σχολής Πολ. Μηχ. ΕΜΠ καθ. κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη για τη στήριξη στις σπουδές μας. Επίσης, ευχαριστούμε τους ηθοποιούς κ. Γιασεμί Κηλαηδόνη, κ. Στέφανο Ληναίο, και κ. Θανάση Παπαγεωργίου, καθώς και τα στελέχη των θεάτρων που συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της μελέτης.

Μέρος της παρούσας εργασίας εκπονήθηκε στο πλαίσιο επί διπλώματι εργασιών στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ από τους σπουδαστές Μ. Σκούτα, Β. Λουίζο, Γ. Πετρόπουλο, Π. Πάνου, Π. Σπύρου, Σ. Βουγιούκα και Π. Μπαλιάκα.

7. Αναφορές

[1] Talaske, R. H., Boner, R. E. (eds). "Theatres for drama performance" Recent experiences in acoustical design, ASA, New York (1986).

[2] Barron M., *Auditorium acoustics and architectural design (also in e-form)*, F & FN SPON, London (1993).

[3]. Sotiropoulou A., Karagiannis J., Margaris O., Karavoglou G., Fotomaras G., *Intergrated acoustic design in the architecture of Hellenic drama theatres of the 19th and 20th century*, ICSV 24, London (2017).

[4] ISO 3382:2009, *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters*, (2009).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 11 Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου II

Διαδικτυακή Μουσική Εκτέλεση: Διεπαφή πελάτη για τον έλεγχο ηχητικών ροών με χρήση των βιβλιοθηκών *gstreamer* και *gtk*

Κωνσταντίνος Τσιούτας
Υποψήφιος Διδάκτωρ
Τμήμα Πληροφορικής
Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
ktsioutas@aueb.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Υλοποιήσαμε εφαρμογή πελάτη με σκοπό τη πραγματοποίηση διαδικτυακών μουσικών εκτελέσεων με την οποία ο χρήστης μουσικός ελέγχει την έναρξη μετάδοσης και λήψης ήχου από και προς τον εξυπηρετητή καθώς και τη μετάδοση και λήψη από σημείο προς σημείο. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις εστιάζοντας στο *mouth to ear delay* και πως αυτό επηρεάζεται από παραμέτρους όπως το μέγεθος του *Ethernet* πακέτου το μέγεθος της προσωρινής μνήμης και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για διάφορες συμπίεσεις ήχου αλλά και για ασυμπιεστο ήχο.*

Network Music Performance: A client side interface to control audio streams using Gstreamer and GTK open frameworks.

ABSTRACT

*We have implemented a client application to perform online music sessions with which the musician - user controls the start and transmission of audio to and from the server as well as point-to-point transmission and reception. We made measurements focusing on the *mouth to ear delay* and how this is affected by parameters such as the size of the *Ethernet* packet, the cache size, and we present the results for various audio compressions and uncompressed audio.*

Εισαγωγή

Η εξέλιξη του διαδικτύου και οι υπηρεσίες που προσφέρονται μέσω αυτού αποτελούν σημαντικό κομμάτι στην καθημερινότητα μας. Βιομηχανία, επιστήμες, τεχνολογία, ιατρική, εμπόριο, οικονομία, επικοινωνία και κοινωνικά δίκτυα βασίζονται στις υπηρεσίες του διαδικτύου. Μια από τις πλέον εμβληματικές

υπηρεσίες είναι η αμφίδρομη πολυμεσική επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων σε πραγματικό χρόνο (τηλεδιάσκεψη). Πολλές πλατφόρμες προσφέρουν την υπηρεσία αυτή δωρεάν όπως το Skype και το Google Hangouts. Άλλες επί πληρωμή υπηρεσίες προσφέρουν περιβάλλοντα τηλεδιασκέψεων μεταξύ πολλών χρηστών σε πραγματικό χρόνο, όπως το Skype for Business και το Cisco WebEx.

Οι υπηρεσίες αυτές δεν είναι επαρκείς για την υποστήριξη Δικτυακής Μουσικής Εκτέλεσης (NMP). Το Network Music Performance (NMP) [1] συμβαίνει όταν δύο ή περισσότεροι μουσικοί εκτελούν μουσικό έργο απομακρυσμένα, μέσω της διαδικτυακής τους σύνδεσης συγχρονισμένα σαν να βρίσκονταν στον ίδιο χώρο. Παράγοντες όπως η καθυστέρηση του διαδικτύου, ειδικά όταν παρεμβάλλονται εξυπηρετητές (ο κανόνας όταν έχουμε πάνω από δύο άκρα επικοινωνίας), αλλά και οι καθυστερήσεις λόγω συμπίεσης ήχου και εικόνας, έχουν σαν αποτέλεσμα την αδυναμία συγχρονισμού των απομακρυσμένων μουσικών. Στην πράξη, είναι αδύνατο δύο η περισσότεροι μουσικοί να εκτελέσουν μουσικά έργα απομακρυσμένα όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες, αφού το άθροισμα των καθυστερήσεων κωδικοποίησης και μετάδοσης υπερβαίνει τα ανεκτά όρια που απαιτεί η ζωντανή NMP. Για να γίνει εφικτή η NMP σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η μόνη λύση σήμερα είναι η χρήση απευθείας οπτικών μονοπατιών μέσω ακαδημαϊκών κέντρων, ώστε (α) να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις δρομολόγησης και μεταγωγής, (β) να έχουμε μόνο δύο άκρα, ώστε να αποφεύγεται η καθυστέρηση επικοινωνίας μέσω εξυπηρετητή, και (γ) τα μέσα να μεταδίδονται χωρίς συμπίεση, ώστε να αποφεύγεται η καθυστέρηση κωδικοποίησης. Οι απαιτήσεις αυτές περιορίζουν την NMP σε τεχνολογικές επιδείξεις, αφού οι υποδομές και ο εξοπλισμός που απαιτούν υπερβαίνουν τις δυνατότητες όχι μόνο των απλών μουσικών, αλλά και των επαγγελματικών στούντιο. Έτσι η υπηρεσία μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με χρήση πολύ γρήγορων δικτυακών υποδομών όπως το τοπικό δίκτυο του πανεπιστημίου. Ένα τέτοιο δίκτυο προσφέρει τη δυνατότητα να μεταδοθεί ασυμπίεστος ήχος ποιότητας CD (Fs 44100 samples per sec και 16 bit depth) ενώ η καθυστέρηση για να είναι εφικτός ο συγχρονισμός των μουσικών είναι μικρότερη από το EPT (Ensemble Performance Threshold) που είναι τα 25ms [2]. Χρησιμοποιήσαμε τις βιβλιοθήκες Gstreamer και GTK για την υλοποίηση της γραφικής διεπαφής.

1. Το λογισμικό και οι δυνατότητές του

Υπάρχουν ήδη βιβλιοθήκες και λογισμικά τα οποία δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας ηχητικών ροών με σκοπό την επικοινωνία φωνής και ήχου σε πραγματικό χρόνο. Έτσι αρκετά γνωστό λογισμικό είναι το jacktrip [3] το οποίο είναι γραμμένο με βάση τη βιβλιοθήκη Qt και υλοποιεί αρχιτεκτονική p2p. Ακόμα υπάρχει το LOLA [4] και το diamouses [5] το οποίο αναπτύχθηκε στο ΤΕΙ κρήτης. Στο τμήμα Πληροφορικής του Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών εκπονήθηκε το Musinet [6] και τελευταία αναπτύξαμε πρωτότυπο λογισμικό βασισμένο στις βιβλιοθήκες gstreamer [7] και gtk [8] το οποίο δίνει τη δυνατότητα ελέγχου ηχητικών ροών από και προς το δίκτυο. Το λογισμικό έχει δύο εκδόσεις, η μία υποστηρίζει την αρχιτεκτονική p2p για δύο μουσικούς ενώ η άλλη υποστηρίζει την αρχιτεκτονική πελάτη εξυπηρετητή. Το λογισμικό αποτελεί διεπαφή μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να ξεκινήσει η να τερματίσει ηχητικές ροές, να θέσει IP και UDP θύρα του άλλου άκρου, και να αλλάξει πλήθος άλλων παραμέτρων της ροής. Η βιβλιοθήκη Gstreamer δίνει τη δυνατότητα εικονικής δημιουργίας pipelines οι οποίες

αποτελούνται από modules συνδεδεμένα σειριακά. Κάθε module εκτελεί μια επεξεργασία. Έτσι ένα pipeline μπορεί να ξεκινά με τη πηγή του ήχου (κάρτα ήχου) και να ακολουθούν τα module που πραγματοποιούν προσθήκη επικεφαλίδων των πρωτοκόλλων RTP,UDP, IP, Ethernet. Το λογισμικό μας, δημιουργεί όλες τις απαραίτητες ροές (pipelines) και κατόπιν ο χρήστης μπορεί να εκκινήσει ή να σταματήσει όποια ροή επιθυμεί. Ακόμα παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης του ήχου για κάθε ροή έτσι ώστε ο μουσικός να δημιουργεί τη δική του μίξη. Επιπλέον υποστηρίζει τη μετάδοση PCM ασυμπίεστου ήχου καθώς και συμπίεσμένου ήχου σύμφωνα με τη κωδικοποίηση opus [9] για διάφορες τιμές συμπίεσης, frame-size κλπ. Τέλος υπάρχει η δυνατότητα πολυκαναλικής καταγραφής των ροών σε αντίστοιχα μονοφωνικά αρχεία ώστε σε δεύτερο χρόνο να μπορεί να γίνει επεξεργασία και μίξη τους.



Σχήμα 0.1 γραφικό περιβάλλον της διαπεφής

2. Αρχιτεκτονικές p2p και server – client

Το λογισμικό υποστηρίζει και τις δύο αρχιτεκτονικές. Στην αρχιτεκτονική p2p κάθε άκρο:

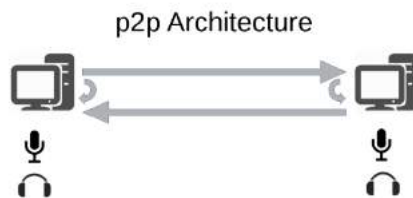
- Στέλνει τη ροή του στο άλλο άκρο
- Ακούει τον εαυτό του άμεσα
- Δέχεται και ακούει τη ροή του άλλου άκρου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ηχητική μίξη των ροών γίνεται τοπικά σε κάθε τερματικό πελάτη είτε πρόκειται για τη p2p-audio έκδοση είτε για τη server-client-audio.

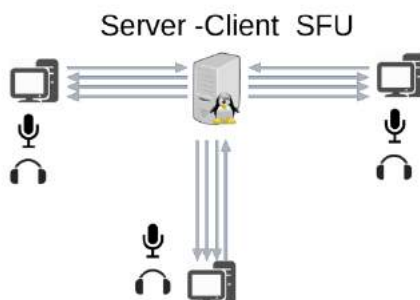
Στην αρχιτεκτονική πελάτη - εξυπηρετητή κάθε εφαρμογή πελάτη:

- Στέλνει τη ροή της προς τον SFU εξυπηρετητή
- Δίνει τη ροή εισόδου της κάρτας άμεσα στην έξοδο των ακουστικών.
- Δέχεται και ακούει τη ροή της σαν επιστροφή από τον εξυπηρετητή.
- Δέχεται και ακούει τη ροή δεύτερου πελάτη από τον εξυπηρετητή.
- Δέχεται και ακούει τη ροή τρίτου πελάτη από τον εξυπηρετητή.

Όπως είναι εύκολα κατανοητό οι απαιτήσεις σε χωρητικότητα της σύνδεσης του πελάτη σε αυτή την αρχιτεκτονική είναι μεγαλύτερες καθώς στέλνει μία ροή και λαμβάνει τρεις μαζί με τη δική του.



Σχήμα 2.1 P2P αρχιτεκτονική



Σχήμα 2.2 Αρχιτεκτονική Server - Client

3. Ο εξυπηρετητής

Διατηρούμε εξυπηρετητή στο πρόγραμμα Okeanos [10] στον οποίο εκτελούνται εργαλεία (command line tools) του Gstreamer. Ο εξυπηρετητής δεν πραγματοποιεί καμία επεξεργασία κωδικοποίησης αποκωδικοποίησης στις ηχητικές ροές οπότε δεν είναι παράγων καθυστέρησης στην όλη διαδικασία. Αυτό που κάνει είναι να δέχεται μια ροή σε μια UDP θύρα και να την αναμεταδίδει επιλεκτικά προς τους πελάτες σε πραγματικό χρόνο. Αποτελεί δηλαδή έναν SFU (Selective Forwarding Unit) [11].

4. Φυσική Τοπολογία Δικτύου

Τα πειράματα έγιναν από τις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Ασυρμάτων Δικτύων και Πολυμεσικών Επικοινωνιών του ΟΠΑ που βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας και συνδέεται μέσω Fast Ethernet γραμμής με το κεντρικό κτίριο του πανεπιστημίου. Και οι δυο αρχιτεκτονικές δοκιμάστηκαν μέσω του εξυπηρετητή. Οι υπολογιστές ήταν τερματικά του εργαστηρίου ενώ ο εξυπηρετητής βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του okeanos project και οι ενδιάμεσοι δρομολογητές μετρήθηκαν τέσσερις στον αριθμό με το εργαλείο traceroute.

5. Εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστές με επεξεργαστή i7 και μνήμη RAM 10GB ενώ το λειτουργικό σύστημα ήταν το Ubuntu

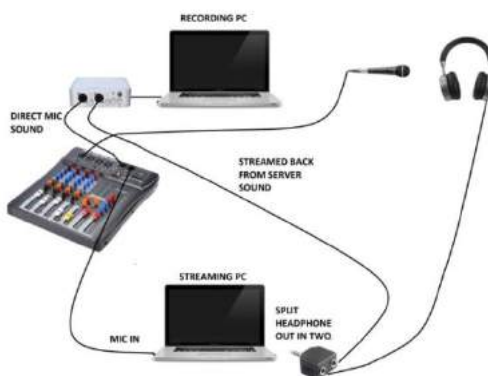
16.04. Στους υπολογιστές αυτούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό p2p-audio και χρησιμοποιήθηκε η κάρτα ήχου της μητρικής πλακέτας. Χρησιμοποιήθηκαν μικροφωνικοί μίκτες μικρού αριθμού καναλιών προκειμένου να δρομολογηθεί ο ήχος και προς το δεύτερο υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για ηχογράφηση. Τα μικρόφωνα σε κάθε μουσικό ήταν πυκνωτικά μεγάλου διαφράγματος και τα ακουστικά ήταν κλειστού τύπου.

6. Μετρήσεις Καθυστέρησης

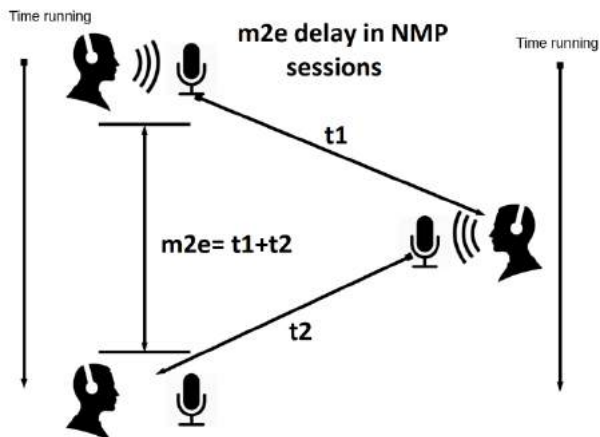
Το mouth to ear delay [12] M2E σε εφαρμογές VoIP είναι η καθυστέρηση στη μετάδοση του ήχου από τον αποστολέα στο παραλήπτη. Σε εφαρμογές NMP το M2E εκτιμούμε ότι είναι το διπλάσιο αφού ο μουσικός όταν δεν έχει οπτική επαφή, δεν υπάρχει μετρονόμος και μαέστρος να δίνει το ρυθμό οπτικά, βασίζεται στην μουσική νότα που θα ακούσει από τον άλλο μουσικό. Έτσι είναι ο συνολικός χρόνος από τη στιγμή που θα στείλει μια μουσική νότα προς το άλλο άκρο (μουσικό), το άλλο άκρο θα λάβει τη νότα και αμέσως θα στείλει τη δική του νότα και θα τη λάβει το πρώτο άκρο. Σχηματικά το mouth to ear delay σε NMP applications παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2 και εκτιμούμε ότι θα μπορούσε να δοθεί από τη παρακάτω σχέση κάτι το οποίο χρήζει περαιτέρω έρευνας.

$$M2E_{NMP} = t_{my\ mouth\ to\ your\ ear} + t_{your\ mouth\ to\ my\ ear}$$

Για τη μέτρηση της πραγματικής καθυστέρησης χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω σύστημα. Όπως φαίνεται στην εικόνα χρησιμοποιείται δεύτερο υπολογιστικό σύστημα (Recording PC) το οποίο αναλαμβάνει την ηχογράφηση με χρήση του λογισμικού audacity[13]. Το recording pc συνδέεται με εξωτερική κάρτα ήχου με σκοπό τη ταυτόχρονη καταγραφή δύο καναλιών. Το ένα κανάλι καταγράφει την άμεση ηχητική πληροφορία από το μικρόφωνο του μουσικού ενώ το άλλο κανάλι καταγράφει την ηχητική πληροφορία που επιστρέφει από το άλλο άκρο όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.



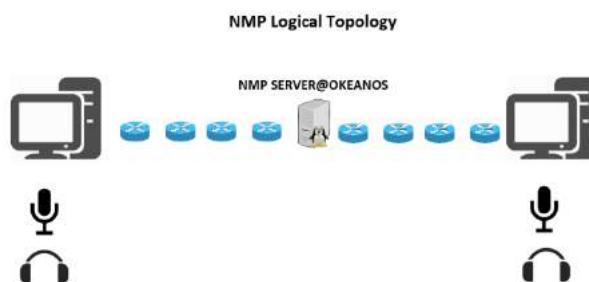
Σχήμα 6.17 Σύστημα μέτρησης της καθυστέρησης M2E



Σχήμα 6.2 M2E delay στη διαδικτυακή μουσική εκτέλεση

7. Πειραματική Διαδικασία

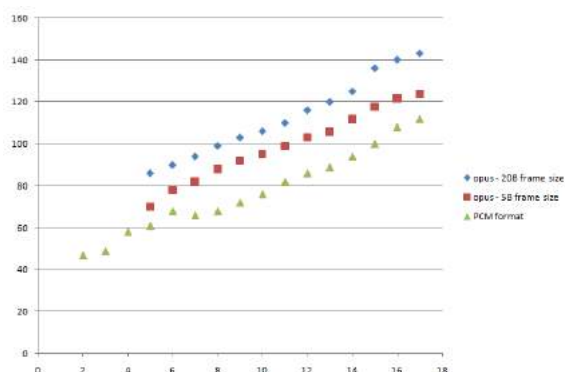
Πραγματοποιήσαμε Networked Music Performance Sessions με δυο μουσικούς και με χρήση της τοπολογίας p2p όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις του mouth to ear delay και ταυτόχρονα του RTP delay με χρήση των λογισμικών audacity και wireshark [14]. Το p2p-audio δίνει τη δυνατότητα να τεθούν τιμές σε παραμέτρους όπως, το μέγεθος του buffer της κάρτας ήχου σε τάξη δεκάδων ms, το μέγεθος του Ethernet πακέτου (max = 1400 Bytes). Σε σχέση με τη κωδικοποίηση orpus μπορούσαμε να θέσουμε τιμές για το bit-rate, το frame-size, το complexity, το bandwidth και τέλος το bit-rate type. Έγιναν μετρήσεις του M2E του ήχου με τη ροή να φτάνει στον άλλο μουσικό μέσω του εξυπηρετητή και να επιστρέφει το οποίο αποτελεί και τη πραγματική καθυστέρηση.



Σχήμα 7.1 Λογική τοπολογία του πειράματος

8. Ανάλυση μετρήσεων

Απο το παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι το M2E delay είναι μικρότερο χρησιμοποιώντας PCM format σε σχέση με τη κωδικοποίηση opus για πολύ γρήγορα δίκτυα όπως αυτό του GRNET. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η opus εισάγει καθυστέρηση κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης σε κάθε άκρο της τάξης των 10 ms ανά άκρο. Επιπλέον η συνολική καθυστέρηση του δικτύου δεν ξεπέρασε τα 6 ms από τον ένα άκρο στο άλλο και πίσω κάτι που μετρήθηκε με το wireshark. Επιπροσθέτως το μέγεθος των Ethernet Frames το οποίο μπορούσαμε να μεταβάλλουμε δεν έπαιξε ουσιαστικό ρόλο στην τελική τιμή του M2E delay. Είναι σαφές ότι η κυριότερη πηγή καθυστέρησης για το συγκεκριμένο πείραμα ήταν το μέγεθος του buffer στις δύο κάρτες ήχου. Για πολύ χαμηλές τιμές της τάξεως των 5 ms οι μουσικοί άκουγαν το φαινόμενο του glitch με πολλά χαμένα δείγματα αλλά ο συγχρονισμός τους ήταν εφικτός. Το φαινόμενο του glitch μειωνόταν αισθητά για τιμές της τάξεως των 15 με 20 ms αλλά έτσι αυξανόταν σημαντικά το M2E με αποτέλεσμα οι μουσικοί να επιβραδύνουν το ρυθμικό μοτίβο. Η ιδανική τιμή του buffer time χωρίς glitch που ήταν αρκετά ενοχλητικό, ώστε να επιτευχθεί συγχρονισμός χωρίς σημαντική επιβράδυνση ήταν τα 10ms ενώ η καθυστέρηση παρέμενε αισθητή.



Σχήμα 8.1 M2E delay για PCM, opus με 5B frame – size και opus 20B frame - size

9. Συμπεράσματα μελλοντική έρευνα

Υλοποιήσαμε εφαρμογή πελάτη με σκοπό την διαξεγωγή διαδικτυακών μουσικών εκτελέσεων. Εστίασαμε στο θέμα του συγχρονισμού των μουσικών και στη μέτρηση του συνολικού M2E delay. Χρησιμοποιήσαμε το δίκτυο υψηλών ταχυτήτων του GRNET και τη τοπολογία p2p χρησιμοποιώντας δύο μουσικούς. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις με χρήση ασυμπίεστου PCM ήχου αλλά και κωδικοποίηση opus. Ως πιο σημαντικός παράγων καθυστέρησης αποδείχθηκε το μέγεθος του buffer της κάθε κάρτας ήχου ενώ η καθυστέρηση του δικτύου είχε τη πιο μικρή επίδραση. Έχουμε ως στόχο να εστιάσουμε στη μέτρηση του MOS (Mean Opinion Score) [15] για το NMP

και τη περεταίρω μελέτη του QoE (Quality of Experience) [16] των μουσικών σε τέτοια περιβάλλοντα.

10. Αναφορές

- [1] John Lazzaro, John Wawrzynek, «A Case for Network Musical Performance|», presented at the 11th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 2001) June 25-26, 2001, Port Jefferson, New York
- [2] Nathan Schuett, «The Effect of Latency on Ensemble Performance», Stanford University May 2002
- [3] [JackTrip](https://ccrma.stanford.edu/groups/soundwire/software/jacktrip/): A System for High-Quality Audio Network Performance over the Internet. <https://ccrma.stanford.edu/groups/soundwire/software/jacktrip/>, Accessed on March of 2014
- [4] LOLA: Low Latency audio visual streaming system, <https://conts.it/art/lola-project/old-lola-project-web-site/lola-low-latency-audio-visual-streaming-system> Accessed on March of 2014
- [5] ΔΙΑΜΟΥΣΕΣ: Διαδραστικό κατανεμημένο περιβάλλον επικοινωνίας κατά τη ζωντανή μουσική εκτέλεση. <http://www.teicrete.gr/diamouses/> , Accessed on March of 2014
- [6] MusiNet: Comprehensive design and implementation of a networked music performance system, <http://musinet.aueb.gr/> , Accessed on March 2014
- [7] Gstreamer: Open Source Multimedia Framework, <https://gstreamer.freedesktop.org/> , Accessed on March 2014
- [8] The GTK+ Project, <https://www.gtk.org/> , Accessed on June of 2017
- [9] Opus Interactive Audio Codec , <http://opus-codec.org/> , Accessed on March of 2014
- [10] Okeanos project , <https://okeanos.grnet.gr/home/> , Accessed on March 2014
- [11] SFU (Selective Forwarding Unit), <https://webrtcglossary.com/sfu/> , Accessed on June of 2017
- [12] Chitra Agastya, Dan Mechanic, and Neha Kothari, « Mouth-To-Ear Latency in Popular VoIP Clients» , Department of Computer Science Columbia University July 9 ,2009
- [13] Free Open Source Cross Platform audio software, <https://www.audacityteam.org/> , Accessed on October 2006
- [14] Wireshark, <https://www.wireshark.org/>, Accessed on October 2006
- [15] Mean Opinion Score for VoIP, <https://route-test.com/mean-opinion-score-mos-measure-voice-quality-voip/> , Accessed on June of 2017
- [16] QoE (Quality of Experience) , Quality of experience requirements for IPTV services, ITU-T G.1080 12/2008

Αυτοματισμοί διαδικτυακού ραδιοφώνου και «μεγάλα δεδομένα» ηχητικής (και οπτικοακουστικής) σημασιολογικής επισημείωσης

Ανδρέας Νταλάκας, Διπλ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ
antalakas@jour.auth.gr

Νικόλαος Τσίπας, Διπλ. Μηχ.-ΜΔΕ, Υπ. Δρ. ΑΠΘ
nitsipas@auth.gr

Χαράλαμπος Δημούλας, Δρ. Μηχ., Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ
babis@eng.auth.gr

Γεώργιος Καλλίρης, Δρ. Μηχ., Καθηγητής ΑΠΘ
gkal@jour.auth.gr

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (<http://m3c.web.auth.gr/>)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα βασικά θέματα των ραδιοηλεκτρονικών σταθμών είναι η τεκμηρίωση και διαχείριση περιεχομένου. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που αξιοποιούν αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για την κατάτμηση, αναγνώριση και ταξινόμηση των ηχητικών συμβάντων. Σήμερα, προηγμένες μέθοδοι εμβαθύνουσας μάθησης (*deep learning*) και συνδυαστικές προσεγγίσεις επιδιώκουν ακόμη πιο θεαματικά αποτελέσματα σημασιολογικής αναγνώρισης. Ωστόσο, η περιορισμένη διαθεσιμότητα κατάλληλα επισημασμένων δεδομένων εκπαίδευσης αποτελεί το πιο σημαντικό πρόβλημα στην υλοποίηση και αξιολόγηση τέτοιων ευφών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα αυτοματισμού μίξης και διαδικτυακής εκπομπής ραδιοφωνικού περιεχομένου, που καταγράφει ενέργειες και συμβάντα της ηχητικής μετάδοσης, δημιουργώντας αυτόματα τυποποιημένες επισημάνσεις υψηλής ποιότητας και ακρίβειας.

Web radio automation and "big data" of audio (and audiovisual) semantic annotation

ABSTRACT

One of the main issues of radio broadcasters is content documentation and management. For this purpose, various techniques have been developed, utilizing machine learning algorithms for the segmentation, recognition and classification of sound events. Advanced deep learning methods and hybrid /combined approaches are currently deployed, pursuing more sophisticated semantic conceptualization and analysis outcomes. However, the limited availability of properly annotated datasets is undoubtedly one of the most critical problems in the training and evaluation of such smart systems. This paper proposes a novel web-radio automation system that, besides audio playlist and mixing management, it records events and actions of the streaming process, thus automatically producing suitable sound datasets with high quality and accuracy annotations.

Εισαγωγή

Ένα από τα χαρακτηριστικά της σύγχρονης εποχής του Διαδικτύου και των Κοινωνικών Μέσων, είναι ότι ο καθένας μπορεί εύκολα να παράγει και διαμοιράζει ψηφιακό περιεχόμενο [1]-[7]. Παρατηρείται λοιπόν ραγδαία αύξηση των ρυθμών δημιουργίας και μετάδοσης πληροφοριών, με αποτέλεσμα να χρειάζονται νέα εργαλεία επεξεργασίας, διαχείρισης και εν τέλει αξιοποίησης του τεράστιου όγκου δεδομένων που παράγεται καθημερινά. Έτσι, αναπτύσσονται αυτοματοποιημένες τεχνικές σημασιολογικής επεξεργασίας και διαχείρισης των πληροφοριακών ροών, αξιοποιώντας αλγορίθμους μηχανικής και εμβαθύνουσας μάθησης (machine /deep learning). Ειδικότερα στην περίπτωση των ραδιοφωνικών και ραδιοτηλεοπτικών μέσων, η σωστή τεκμηρίωση και διαχείριση περιεχομένου είναι υψίστης σημασίας για την κατάτμηση, αναγνώριση και ταξινόμηση ηχητικών (και οπτικοακουστικών) προτύπων, διευκολύνοντας την αποτελεσματικότερη αρχειοθέτηση και επανάχρηση των εκπομπών [1]-[7]. Ωστόσο, οι περισσότεροι αλγόριθμοι βασίζονται στη μάθηση με εποπτεία (supervised learning), απαιτώντας έναν μεγάλο αριθμό επισημασμένων δειγμάτων εκπαίδευσης (annotated /training datasets) με γνωστές τιμές εισόδου-εξόδου (ειδικά στις περιπτώσεις της εμβαθύνουσας μάθησης) [1]-[11]. Η παραγωγή των δειγμάτων αυτών απαιτεί χρονοβόρες /χειροκίνητες διαδικασίες επισημείωσης των διαφόρων συμβάντων, όπου συνήθως εφαρμόζονται διαφορετικές τυποποιήσεις ταξινόμησης, υπεισέρχονται υποκειμενικές παρατηρήσεις, ενώ αναπόφευκτη είναι και η εισαγωγή σφαλμάτων. Έτσι, ημιαντόματες διαδικασίες και προσαρμοστικά – στην κάθε μορφή περιεχομένου– συστήματα χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της ζητούμενης τεκμηρίωσης ανά περίπτωση (π.χ., σε συγκεκριμένες ραδιοφωνικές και ραδιοτηλεοπτικές εκπομπές [1]). Τα μετα-δεδομένα κατάτμησης μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο στις ανάγκες περιγραφής και διαχείρισης των συγκεκριμένων «αρχείων», όσο και ως δείγματα εκπαίδευσης για την αναγνώριση «άγνωστου» περιεχομένου, άλλων μέσων. Σε κάθε περίπτωση, οι προσπάθειες αυτές δεν μπορούν να καλύψουν το σύνολο των αναγκών επισημείωσης και μηχανικής εκπαίδευσης ευφών συστημάτων και να ανταποκριθούν στον όγκο των σύγχρονων απαιτήσεων σημασιολογικής επεξεργασίας και ανάλυσης πολυμεσικών δεδομένων.

Την ίδια στιγμή, ένας μεγάλος και συνεχώς αυξανόμενος αριθμός ραδιοφωνικών και ραδιοτηλεοπτικών διαδικτυακών ροών εκπέμπεται καθημερινά σε 24ωρη βάση (24/7), πηγή «μεγάλων δεδομένων» (big data) που θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση δημιουργίας των ζητούμενων «δειγμάτων εκπαίδευσης». Ωστόσο, ενώ πλέον είναι πολύ εύκολη η μετάδοση ηχητικών και οπτικοακουστικών ροών (streaming) μέσω του Διαδικτύου, δεν υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία ανοιχτού ή ελεύθερου κώδικα για την αυτόματη διαχείριση οπτικοακουστικών προγραμμάτων (Web-Radio /-TV automation software). Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προτείνει ένα μοντέλο αυτοματισμού διαδικτυακών ραδιοφωνικών ροών που, παράλληλα με τη διαμόρφωση της λίστας αναπαραγωγής (playlist) και την ηχητική μίξη, καταγράφει ενέργειες και συμβάντα της μετάδοσης, εξάγοντας σημασιολογικές ετικέτες υψηλής ακρίβειας χρονισμού. Τα μετα-δεδομένα αυτά παρέχουν άμεση και αποτελεσματική κατάτμηση /τεκμηρίωση των ραδιοφωνικών εκπομπών, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αξιοποιηθούν στη διαμόρφωση κατάλληλα επισημασμένων συνόλων (annotated datasets).

1. Τρέχουσα κατάσταση

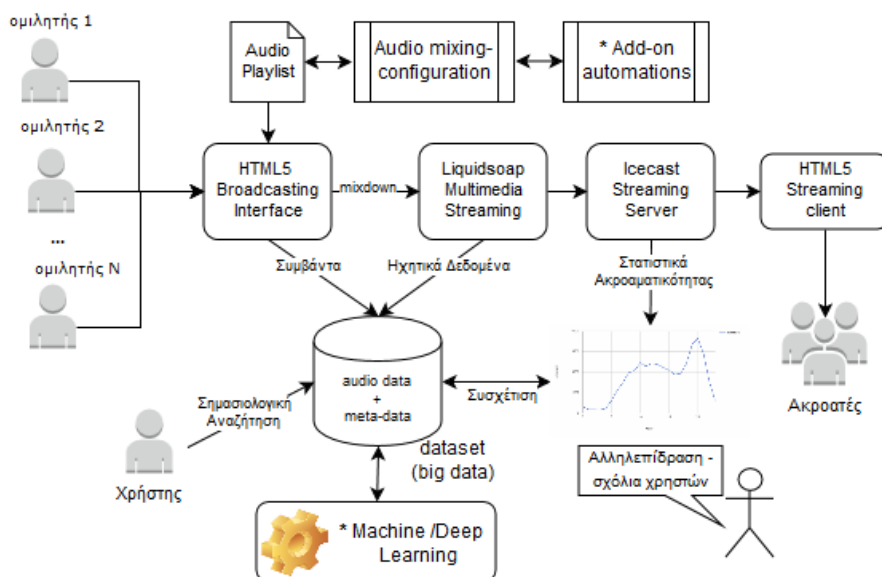
Σήμερα, στον δρόμο καθολικής μετάβασης προς τον Σημασιολογικό Ιστό (Web 4.0, Semantic Web), η σημασιολογική επεξεργασία και ανάλυση ηχητικού (και οπτικοακουστικού) περιεχομένου αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά, δύσκολα και δημοφιλή ζητήματα. Οι διαδικασίες αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα χρήσιμες, τόσο από δημοσιογραφική άποψη (από τη σκοπιά του παραγωγού) όσο και στην πλευρά του ακροατηρίου, των «καταναλωτών». Και στις δύο περιπτώσεις, η ανάλυση αυτή παρέχει πρόσθετη γνώση, διευκολύνει την αναζήτηση και ανάκτηση συγκεκριμένων πληροφοριών, συμβάλει στην αποτελεσματικότερη οργάνωση, διαχείριση και αξιοποίηση του υλικού (διατήρηση αρχείου, επανάχρηση πόρων, άμεση /κατ' απαίτηση ενημέρωση, κ.ά.). Κατά το παρελθόν, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι αναγνώρισης ηχητικών συμβάντων, πολλές από τις οποίες εφαρμόστηκαν ειδικά στις περιπτώσεις ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών εκπομπών (εντοπισμός ομιλητών, διαφορετικών μορφών μουσικής, διαφημιστικών μηνυμάτων, σημάτων εκπομπής κ.ά.) [1]-[2], [5]-[7], [9]-[14]. Κοινό γνώρισμα αυτών των τεχνικών είναι ότι αξιοποιούν τον ήχο, που πλεονεκτεί έναντι της εικόνας και του βίντεο σε επίπεδο υπολογιστικών απαιτήσεων (αποθήκευση και επεξεργασίας), αναζητώντας τις κατάλληλες παραμέτρους (features) ταξινόμησης και διαχωρισμού των συμβάντων. Εκτός από την εποπτευόμενη εκπαίδευση μηχανής (supervised learning), αυτόματες τεχνικές ομαδοποίησης (clustering) επιχειρούν να εντοπίσουν τα σημεία μετάβασης μεταξύ των διαφόρων ηχητικών προτύπων (transition point detection), αξιοποιώντας δομικά (structural) χαρακτηριστικά της ηχητικής αναπαράστασης [3]-[6], [9]-[11]. Επιπλέον, υβριδικά και ιεραρχικά σχήματα ταξινόμησης έχουν εφαρμοστεί για τον περαιτέρω διαχωρισμό των κλάσεων σε περισσότερες υποκατηγορίες, παρέχοντας μεγαλύτερες λεπτομέρειες κατάτμησης [1]-[4], [9]. Έτσι, οι εξαγόμενες παράμετροι και τα αντίστοιχα αποτελέσματα εντοπισμού μπορούν να συνδεθούν με βαθύτερες αντιληπτικές και γνωστικές διεργασίες, όπως η αξιολόγηση της ποιότητας εμπειρίας (Quality of Experience –QoE), της συναισθηματικής φόρτισης (emotion recognition /sentiment analysis) κ.ά. [15]-[17]. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα στοιχεία αυτά είναι αυθύπαρκτα στη φύση και το σκοπό του ραδιοφώνου [18]-[19], γίνεται κατανοητή η σπουδαιότητα της δημιουργίας τέτοιου είδους συσχετίσεων, ανάμεσα στο εκπεμπόμενο περιεχόμενο και τις «αντιδράσεις του ακροατηρίου».

Όπως έχει ήδη τονιστεί, η βασική ιδέα πίσω από την παρούσα εργασία είναι η ανάπτυξη ενός περιβάλλοντος αυτοματισμού διαδικασιών ραδιοφωνικής εκπομπής. Τέτοιου είδους συστήματα χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως, σε επαγγελματικό επίπεδο αλλά και από ερασιτέχνες παραγωγούς, τόσο στην κλασική εκπομπή όσο και στις διαδικτυακές μεταδόσεις ραδιοφώνου. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν τη διαμόρφωση και τον αυτοματισμό της λίστας αναπαραγωγής (αρχεία μουσικής, ρεπορτάζ/ντοκιμαντέρ, σήματα εκπομπής κλπ.), καθώς επίσης την εύκολη επιλογή και μετάβαση στον «ραδιοφωνικό αέρα» (στους διαφόρους ομιλητές), καλύπτοντας το σύνολο των αναγκών «ζωντανής μίξης» (live mixing) [18]-[19]. Ανάμεσα στα διάφορα προϊόντα λογισμικού αξίζει να αναφερθούν τα JAZLER [20], Sam-Broadcaster [21] και Radiojar [22] που παρέχουν μια δέσμη χρήσιμων υπηρεσιών με το αντίτιμο του σχετικά υψηλού κόστους. Παράλληλα, είναι διαθέσιμες και πιο «φθηνές επιλογές», που παρέχουν τη δυνατότητα δοκιμαστικής εφαρμογής ή/και χρήσης περιορισμένων λειτουργιών, όπως είναι τα Playit Live, Radio DJ, DirEttore, RadioBoss κ.ά. [23]. Σε κάθε περίπτωση, όμως, δεν υπάρχουν ανοιχτές ή ελεύθερες εφαρμογές αυτοματισμού ραδιοφώνου με δυνατότητες παράλληλης σημασιολογικής

κατάτμησης και τεκμηρίωσης των εκπομπών, κενό που επιχειρεί να καλύψει το προτεινόμενο μοντέλο.

2. Περιγραφή συστήματος

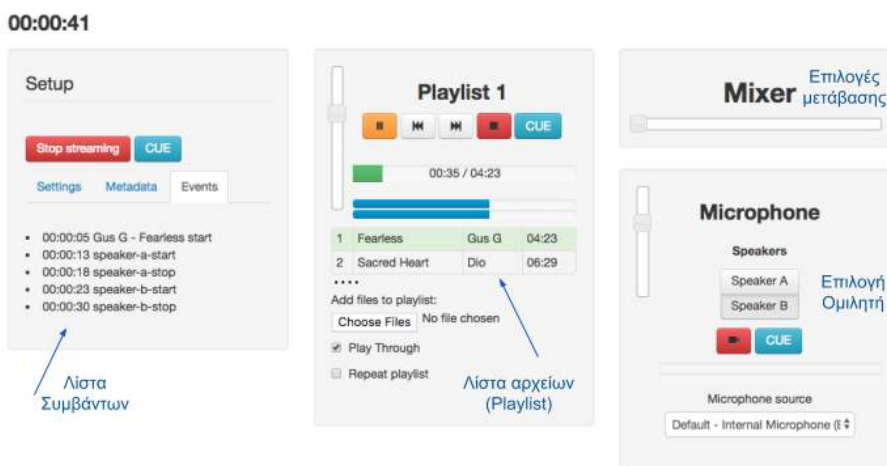
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο εργαλείων ανοικτού λογισμικού που μπορούν να διαχειριστούν την παραγωγή και μετάδοση εκπομπών διαδικτυακού ραδιοφώνου, ενώ έμφαση δόθηκε στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ανάπτυξης των πρωτοτύπων. Έτσι, αναπτύχθηκε το κατάλληλο περιβάλλον διασύνδεσης με το χρήστη /ραδιοφωνικό παραγωγό (GUI /Graphical User Interface) βασισμένο στο πρότυπο HTML5. Ο ακροατής μπορεί να λαμβάνει τη μετάδοση είτε με χρήση κατάλληλης εφαρμογής με δυνατότητα αναπαραγωγής ροής δεδομένων (π.χ. VLC Player), είτε σε περιβάλλον φυλομετρητή (browser), χρησιμοποιώντας διαδικτυακή διεπαφή βασισμένη επίσης στο πρότυπο HTML5. Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 2.1 που αποδίδει την αρχιτεκτονική του προτεινόμενου μοντέλου, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης (σε πραγματικό χρόνο) δημιουργούνται αυτόματες ετικέτες μετα-δεδομένων που καταγράφουν τις «μεταβάσεις της κονσόλας μίξης», χωρίς να απαιτούνται επιπλέον ενέργειες από τον χειριστή. Έτσι, οι σημασιολογικές ετικέτες, που έχουν αποδοθεί στους ομιλητές και τα αντίστοιχα ηχητικά αρχεία της λίστας, σωρεύονται σειριακά (με τον κατάλληλο χρονοισμό), παρέχοντας μια αρκετά αναλυτική εννοιολογική περιγραφή διαδοχής των συμβάντων. Επίσης, η δυνατότητα σύνδεσης με μετρικά ακροαματικότητα ή/και σχόλια ακροατών (π.χ. σε διάφορα κοινωνικά μέσα) μπορούν να αξιοποιηθούν στην προσθήκη επιπλέον ετικετών, που αξιολογούν την αντίδραση του κοινού, τον τρόπο διείσδυσης στις διάφορες ομάδες ακροατηρίου, την εκτίμηση συναισθηματικής φόρτισης ή/και άλλων συσχετίσεων.



Σχήμα 2.1 Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ραδιοφωνικού αυτοματισμού

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται το γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης με το χρήστη, που αποτελεί το *HTML5 Broadcasting Interface* του μοντέλου. Χωρίζεται σε τρεις στήλες και για τις ανάγκες της περιγραφής υποστηρίζει δύο ομιλητές και μία λίστα αναπαραγωγής ηχητικού περιεχομένου (μουσική, σήματα /εφέ, αρχεία ειδήσεων κ.ά.). Στην αριστερή στήλη, ο χειριστής μπορεί να εκκινήσει και να σταματήσει τη ροή ενώ υπάρχει και μία καταγραφή της ροής εργασιών που τελικά θα αποθηκευτεί στο αρχείο μετα-δεδομένων. Με τη χρήση του μίκτη (mixer), ο παραγωγός μπορεί να ανοίξει και να κλείσει το μικρόφωνο σε ομιλητές ενώ παράλληλα διαχειρίζεται την εναλλαγή των ηχητικών πηγών. Κάθε αλλαγή κατάστασης κωδικοποιείται με κατάλληλη μορφοποίηση σε μήνυμα που περιλαμβάνει την ακριβή ώρα του συμβάντος και αποθηκεύεται στο αρχείο επίσημανσης. Ακολουθεί ένα στάδιο επεξεργασίας (post-processing) όπου τα καταγεγραμμένα συμβάντα μετατρέπονται σε επισημάνσεις που ακολουθούν το πρότυπο: [χρόνος αρχής συμβάντος, χρόνος λήξης συμβάντος, ετικέτα συμβάντος].

Για τις ανάγκες της μετάδοσης, αξιοποιούνται δύο εργαλεία ανοικτού κώδικα. Το liquidsoap [24], που χρησιμοποιείται σε δικτυακούς ραδιοφωνικούς σταθμούς και τη δικτυακή τηλεόραση για τη μετάδοση ροής πολυμέσων, παρέχει δυνατότητες περιγραφής και μετασχηματισμού της ροής ώστε να καλύψει απαιτητικές ανάγκες. Υποστηρίζει στατικές και δυναμικές λίστες πολυμέσων, επιλογή ακουστικής πηγής με βάση το χρόνο, ζωντανή παρέμβαση του χειριστή, διαδραστικότητα με τον ακροατή και προσαρμόσιμες μεταβάσεις ανάμεσα στα στοιχεία της λίστας. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας με το liquidsoap, είναι η δημιουργία του αρχείου ηχητικών δεδομένων, το οποίο αποτελεί τη βάση αναφοράς των επισημάνσεων. Παράλληλα, τα ηχητικά δεδομένα καθίστανται έτοιμα προς μετάδοση. Το icecast [25], συμπληρώνει το liquidsoap, καθώς αποτελεί τον δικτυακό εξυπηρέτη της ροής (streaming server) και υλοποιεί τη μετάδοση (για ακουστικό ή/και οπτικό υλικό). Υποστηρίζει πολλές μορφοποιήσεις δεδομένων (με ευκολία στην προσθήκη νέων) και ουσιαστικά είναι αυτό που δημιουργεί το κανάλι διαδικτυακού ραδιοφώνου. Ο πολύπλευρος χαρακτήρας του, βασίζεται σε ανοιχτά πρότυπα για την επικοινωνία και αλληλεπίδραση με τους χρήστες.



Σχήμα 2.2 Γραφικό περιβάλλον αυτοματισμού ραδιοφωνικής μετάδοσης

Όπως αποτυπώνεται στα δύο σχήματα, παρέχονται δύο βασικοί εναλλακτικοί μηχανισμοί διαμόρφωσης του συστήματος. Στον πρώτο προβλέπεται η αξιοποίηση πολυκαναλικής κάρτας ήχου, με καθένα από τα κανάλια να μπορεί να αντιστοιχηθεί σε διαφορετικά μικρόφωνα και ομιλητές. Τα κανάλια αυτά ελέγχονται άμεσα από τον μίκτη του περιβάλλοντος, επιτρέποντας τον χειριστή να επιλέγει απευθείας την επιθυμητή είσοδο (χωρίς άλλες ρυθμίσεις εξοπλισμού). Στη δεύτερη περίπτωση, η επιλογή των διαφόρων ηχητικών ροών γίνεται με τη βοήθεια εξωτερικής κονσόλας, ενώ το λογισμικό εξασφαλίζει μόνο τη σωστή /επιθυμητή μετάβαση από τη λίστα αναπαραγωγής στους ομιλητές και αντίστροφα (μέσω αυτοματισμών cross-fade), πρακτική ιδιαίτερα συνηθισμένη στη «ραδιοφωνική πραγματικότητα». Στο σενάριο αυτό, παρατίθεται ένας ακόμη επιλογέας (button) για την καταχώρηση του εκάστοτε ομιλητή, ο οποίος επηρεάζει μόνο τη διεργασία επισημείωσης και όχι τη μετάδοση. Ωστόσο, είναι δυνατή η αποφυγή αυτής της επιπλέον επιλογής, που ενδέχεται να αυξήσει την πολυπλοκότητα του όλου χειρισμού. Έτσι, ο παραγωγός (/ηχολήπτης) περιορίζεται σε ρυθμίσεις που αφορούν αποκλειστικά και μόνο τη μετάδοση, ενώ ο διαχωρισμός των ομιλητών μπορεί να γίνει σε μεταγενέστερο χρόνο μέσω ημι-αυτόματων διαδικασιών μη εποπτευόμενης ταξινόμησης (clustering), επιτρέποντας την ενσωμάτωση διαθέσιμων εργαλείων και κώδικα σημασιολογικής επεξεργασίας ήχου που έχουν δοκιμασθεί επιτυχώς σε αντίστοιχα προβλήματα [1]-[4], [9]-[11]. Τέλος, η πρόσβαση σε μετρήσεις ακροαματικότητας (π.χ. Google analytics) καθώς και άλλα στοιχεία καταγραφής της αντίδρασης των χρηστών (π.χ. σχόλια, εικονίδια “emojicons” κλπ.) παρέχουν πρόσθετα σημασιολογικά μετα-δεδομένα (θεματική κατηγοριοποίηση, αξιολόγηση της ποιότητας εμπειρίας QoE, συναισθηματική απόκριση κοινού κ.ά.). Οι ετικέτες αυτές και ο συσχετισμός τους με το εκπεμπόμενο ηχητικό περιεχόμενο είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην λήψη ανατροφοδότησης αλλά και τη «συναισθηματική προσαρμογή» των παραγωγών, ως προς τις απαιτήσεις και ανάγκες του ακροατηρίου στόχευσης [15]-[17]. Παράλληλα, προσθέτουν επιπλέον παραμέτρους επισημείωσης στα δημιουργούμενα αποθετήρια δεδομένων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για τη μηχανική εκπαίδευση σύγχρονων και απαιτητικών ευφυών συστημάτων.

3. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα μοντέλο διαδικτυακού ραδιοφώνου, που επιτρέπει τον αυτοματισμό της παραγωγής /μετάδοσης αλλά και την άμεση εξαγωγή σημασιολογικών επισημάνσεων διαδοχής των ηχητικών συμβάντων. Η συνεισφορά του νέου αυτού περιβάλλοντος εντοπίζεται σε τρία επίπεδα. Καταρχάς, παρέχεται μια νέα εφαρμογή ανοικτού /ελεύθερου κώδικα (σύνδεσμος github: <https://github.com/M3C-auth/webradio-acoustics-2018>) για τη διευκόλυνση των διαδικασιών ραδιοφωνικής εκπομπής, συμβατικής και διαδικτυακής (με τη δεύτερη να παρέχει επιπλέον δυνατότητες αξιοποίησης της ανατροφοδότησης των χρηστών). Εξίσου και περισσότερο σημαντική θεωρείται η αυτόματη εξαγωγή μετα-δεδομένων σημασιολογικής κατάταξης των εκπομπών, που μπορεί να αξιοποιηθεί για την αρχειοθέτηση και τεκμηρίωση του υλικού στην πλευρά του παραγωγού. Το γεγονός αυτό έχει θετικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότερη αναζήτηση και ανάκτηση του περιεχομένου από δημοσιογράφους /παραγωγούς αλλά και απλούς χρήστες. Τέλος, η οργανωμένη καταγραφή των εκπεμπόμενων ροών και των αντίστοιχων ετικετών επισημείωσης επιτρέπει τη διαμόρφωση ψηφιακών αποθετηρίων (repositories) που

θα μπορούν να αξιοποιηθούν ως δεδομένα εκπαίδευσης αλγορίθμων μηχανικής και εμπειρικής μάθησης σε ιδιαίτερα απαιτητικά προβλήματα.

Συνοψίζοντας, με το προτεινόμενο μοντέλο, αφενός παρέχονται νέα εργαλεία διαδικτυακής μετάδοσης ραδιοφωνικών ροών (web-radio streaming), αφετέρου εξασφαλίζεται η άμεση επισημείωση του μεταδιδόμενου υλικού και η ταυτόχρονη δημιουργία σημασιολογικά επισημασμένων αποθετηρίων αληθείας (ground truth repositories). Όπως πρόσφατα παραδέχτηκε ο ιδρυτής του Facebook αναφερόμενος στο θέμα των ψευδών ειδήσεων, δυστυχώς δεν υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη έξυπνων μηχανών αποτελεσματικής αναγνώρισης περιεχομένου. Αν σκεφτεί κανείς ότι ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει συνεχώς (24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα) και ότι υπάρχουν πάρα πολλοί τέτοιοι διαδικτυακοί σταθμοί, καθίσταται σαφές ότι η νέα εφαρμογή θα μπορεί πολύ γρήγορα να δημιουργεί μεγάλα αποθετήρια δεδομένων (big data). Τα δεδομένα αυτά θα μπορούν να αξιοποιηθούν σε μια πληθώρα εφαρμογών ηχητικής (και οπτικοακουστικής) σημασιολογικής επεξεργασίας και ανάλυσης, με ποικιλόμορφο θεματικό περιεχόμενο.

4. Αναφορές

- [1] Kotsakis, R., Kalliris, G., & Dimoulas, C., “Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification”, *Speech Communication*, 54(6), 743-762, 2012.
- [2] Kotsakis, R., Kalliris, G., & Dimoulas, C., “Investigation of salient audio-features for pattern-based semantic content analysis of radio productions”, In *Audio Engineering Society Convention 132*, 2012.
- [3] N. Tsipas, L. Vrysis, C. Dimoulas, and G. Papanikolaou, “Efficient audio-driven multimedia indexing through similarity-based speech /music discrimination,” *Multimedia Tools and Applications*, 2017 (DOI 10.1007/s11042-016-4315-0).
- [4] Dimoulas C.A. and Symeonidis A.L., “Syncing Shared Multimedia through Audiovisual Bimodal Segmentation,” *IEEE MultiMedia* 22(3), 26-42, 2015.
- [5] Lopez-Otero, P., Docio-Fernandez, L., & Garcia-Mateo, C., “Ensemble audio segmentation for radio and television programmes.” *Multimedia Tools and Applications* 76(5) 7421-7444, 2017.
- [6] C.O.B. Weerathunga, K.L. Jayaratne, and P.V.K.G. Gunawardana, “Classification of Public Radio Broadcast Context for Onset Detection”, *KL Jayaratne - GSTF Journal on Computing (JoC)*, 2018.
- [7] Yang, X. K., Qu, D., Zhang, W. L., & Zhang, W. Q. “An adapted data selection for deep learning-based audio segmentation in multi-genre broadcast channel”, *Digital Signal Processing*. 2018 (doi.org/10.1016/j.dsp.2018.03.004).
- [8] Dimoulas C., “Machine Learning”, in Bruce Arrigo (Ed.), *The SAGE Encyclopedia of Surveillance, Security, and Privacy*, Sage Publications Inc., pp. 591-592, 2018, DOI: <http://dx.doi.org/10.4135/9781483359922.n267>
- [9] Vrysis, L., Tsipas, N., Dimoulas, C., & Papanikolaou, G., “Crowdsourcing audio semantics by means of hybrid bimodal segmentation with hierarchical classification,” *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 64, No. 12, pp. 1042-1054, Dec. 2016.
- [10] Tsipas N., Vrysis L., Dimoulas C. & Papanikolaou G., “Content-Based Music Structure Analysis using Vector Quantization”, *Proceedings of the 138th AES Convention*, pp. 419 - 424, 2015.

- [11] Tsipas N., Dimoulas C., Kalliris G., Papanikolaou G., “Collaborative annotation platform for audio semantics”, *Proceedings of the 134th AES Convention*, pp. 218-222, 2013.
- [12] S. H. Shum, N. Dehak, R. Dehak, and J. R. Glass, “Unsupervised methods for speaker diarization: An integrated and iterative approach,” *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 21, no. 10, pp. 2015–2028, 2013.
- [13] I. D. Gebru, S. Ba, X. Li, and R. Horaud, “Audio-visual speaker diarization based on spatiotemporal bayesian fusion,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 40, no. 5, pp. 1086–1099, 2018.
- [14] Tsipas N., Zapartas P., Vrysis L. & Dimoulas C. “Augmenting Social Multimedia Semantic Interaction through Audio-Enhanced Web-TV Services”, *Proceedings of the 10th Audio Mostly*, ACM, 2015.
- [15] N. Vryzas, L. Vrysis, R. Kotsakis and C. Dimoulas, “Speech Emotion Recognition Adapted to Multimodal Semantic Repositories,” in *Proceedings of the SMAP 2018 workshop*, Zaragoza, 2018.
- [16] Kotsakis R., Dimoulas C., Kalliris G., Veglis A., “Emotional Prediction and Content Profile Estimation in Evaluating Audiovisual Mediated Communication”, *Int J Monit Surveill Technol Res*, 2(4), 62-80, 2014.
- [17] Kalliris G., Matsiola M., Dimoulas C. & Veglis A., “Emotional Aspects and Quality of Experience for Multifactor Evaluation of Audiovisual Content”, *Int J Monit Surveill Technol Res*, 2(4), 40-61, 2014
- [18] Kalliris G., Dimoulas C., & Matsiola M, “Post-production I: Media Management, Sound Editing and Mixing”, in Michael Filimowicz (Ed.), *Foundations in Sound Design for Linear Media*, Taylor & Francis/Routledge, 2018.
- [19] Dimoulas C., “Audio Editing”, in Merskin, Debra, Golson, J. Geoffrey (Eds.), *The SAGE International Encyclopedia of Mass Media and Society*, Jan 2019.
- [20] <https://jazler.gr/Default.asp>
- [21] <https://spacial.com/sam-broadcaster-pro/>
- [22] <https://www.radiojar.com/>
- [23] Margaritiadis V., “Web-Radio Automation Technologies in the Era of Semantic Web,” diploma thesis (Supervisor C. Dimoulas), *Master of Digital Media, Communication and Journalism (specialization on Digital Media, Culture and Communication)*, Thessaloniki, 2018.
- [24] <https://www.liquidsoap.info>
- [25] <http://icecast.org>

Μελέτη και εφαρμογή της μεθόδου φασματικής τοποθέτησης πόλων στην ισοστάθμιση ακουστικών

Γαβριήλ Καμάρης¹
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός,
Υποψήφιος Διδάκτορας
gpkamaris@upatras.gr

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου¹
Ε.ΔΙ.Π.
phatziantoniou@upatras.gr

Μιχάλης Ατσάλης¹
Προπτυχιακός Φοιτητής
ece7742@upnet.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος¹
Καθηγητής
mourjop@upatras.gr

¹Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Εργ. Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αναπαραγωγή ηχητικών σημάτων με ακουστικά εμφανίζει, συχνά, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου, υποβάθμιση της ποιότητας ακρόασης λόγω αλλοιώσεων στη φασματική απόκριση, χρωματισμών και τονισμού ή ακύρωσης σε διαφορετικές συχνότητες ή περιοχές συχνότητων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, σε αυτή την εργασία μελετάται η εφαρμογή της πρακτικά εύχρηστης μεθόδου ισοστάθμισης με τοποθέτηση πόλων στις φασματικές αποκρίσεις τριών μοντέλων ακουστικών με χρήση τριών αποκρίσεων στόχου ισοστάθμισης. Η υποκειμενική και αντικειμενική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αποδεικνύει τη διόρθωση των αποκρίσεων των ακουστικών σε ικανοποιητικό βαθμό με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος.

Study and application of the pole-fitting method in headphones equalization

ABSTRACT

The reproduction of audio signals with headphones often degrades due to spectral response deteriorations, colorization and attenuation or cancellation of different frequencies or frequency ranges, depending on the technical characteristics of each model. To address this problem, the practical application of the well-defined equalization method with pole fitting in the spectral responses of three different headphones using three equalizer target functions, is studied in this work. The subjective and objective evaluation of the results demonstrates the satisfactory correction of the responses of the headphones with relatively low computational costs.

Εισαγωγή

Η αναπαραγωγή ηχητικών σημάτων με ακουστικά καθώς και η αξιολόγηση της ποιότητας της ακρόασης από τους χρήστες, απασχολούν την ακουστική κοινότητα εδώ και πολλές δεκαετίες [1]. Μάλιστα, τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη στις τεχνολογίες ακουστικών είναι θεαματική, αφού εμφανίζονται στην αγορά ολοένα και περισσότερες κατηγορίες ακουστικών με εξειδικευμένα χαρακτηριστικά, προκειμένου να προσαρμοστούν στις υποκειμενικές προτιμήσεις κάθε χρήστη [2]. Ανάλογα με την κατηγορία του κάθε μοντέλου και τα συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του, η φασματική απόκριση των ακουστικών επιφέρει διαφορετικές αλλοιώσεις στο αρχικό σήμα, εισάγει χρωματισμούς και τονίζει ή ελαττώνει κάθε φορά το πλάτος του σήματος σε διαφορετικές συχνότητες ή περιοχές συχνοτήτων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχουν αναπτυχθεί ψηφιακές τεχνικές ισοστάθμισης, με σκοπό τη διόρθωση του μέτρου του φάσματος αναπαραγωγής των ακουστικών, προκειμένου να διορθωθούν οι ανομοιομορφοί τονισμοί που είναι εύκολα αντιληπτοί στον ακροατή και ακουστικά ανεπιθύμητοι. Η εύχρηστη μέθοδος της φασματικής τοποθέτησης πόλων που βασίζεται σε σχετικά μικρής τάξης φίλτρα διόρθωσης, εξετάζεται στην παρούσα εργασία[3,4,5].

1. Ισοστάθμιση με τη μέθοδο της φασματικής τοποθέτησης πόλων

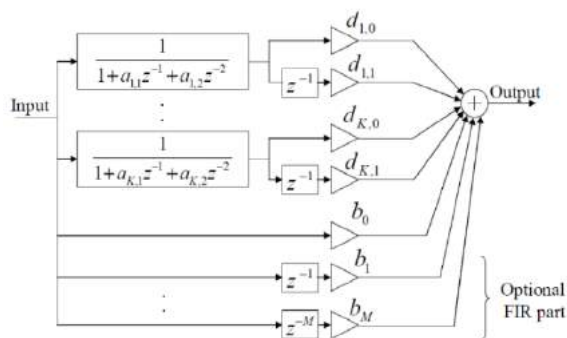
Η μέθοδος της φασματικής τοποθέτησης πόλων (pole-fitting) [6,7,8] αποτελεί μια από τις τεχνικές σχεδίασης φίλτρων ισοστάθμισης ακουστικών αποκρίσεων, χρησιμοποιεί IIR φίλτρα δεύτερης τάξης με σταθερούς πόλους, τα οποία υλοποιούνται παράλληλα, και σχηματίζουν έτσι μια δομή παράλληλων φίλτρων όπως αυτή που παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 1.1.

Οι συντελεστές $a_{k,1}$ και $a_{k,2}$ είναι πραγματικοί αριθμοί που υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$a_{k,1} = -(p_k + p_{k+1}) \quad (1.1)$$

$$a_{k,2} = p_k p_{k+1} \quad (1.2)$$

όπου p_k και p_{k+1} είναι συζυγείς μιγαδικοί αριθμοί και αποτελούν τους πόλους του k -οστού φίλτρου, ενώ οι $d_{k,0}$, $d_{k,1}$ και (αν προαιρετικά υπάρχει τμήμα FIR) b_m τα μηδενικά του.



Εικόνα 1.1 Δομή παράλληλων φίλτρων δεύτερης τάξης

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου που εξετάζεται είναι ότι καταφέρνει να δημιουργήσει ένα αντίστροφο σήμα με ευθύ τρόπο, χωρίς να απαιτεί την αντιστροφή της αρχικής απόκρισης, αποφεύγοντας, έτσι, διάφορα προβλήματα που δημιουργούνται από την αντιστροφή (προβλήματα ευστάθειας και πολύ μεγάλες τάξεις αντίστροφων φίλτρων).

Η μέθοδος απαιτεί την επιλογή κατάλληλων συχνοτήτων για την τοποθέτηση πόλων που αντισταθμίζουν τα βυθίσματα της αρχικής φασματικής απόκρισης. Επίσης, επιλέγεται μια συνάρτηση (απόκριση) στόχου (target-function) και έτσι το πρόβλημα σχεδίασης του φίλτρου αφορά πλέον στην εύρεση των ελεύθερων συντελεστών του φίλτρου (βάρη του κέρδους των πόλων) και είναι γραμμικό.

2. Μεθοδολογία υλοποίησης ισοστάθμισης ακουστικών

2.1 Πειραματική διάταξη μετρήσεων και αξιολόγηση των αποκρίσεων

Για τις ακουστικές μετρήσεις απόκρισης των ακουστικών χρησιμοποιήθηκε ανδρείκελο προσομοιωτής κεφαλής και κορμού (“Head and Torso Simulator”) που φαίνεται στην Εικόνα 2.1 (α). Οι διαστάσεις του πτερυγίου των αυτιών είναι ευρωπαϊκού μεγέθους και οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στην είσοδο του καναλιού του αυτιού με φραγή αυτού (Εικόνα 2.1(β)). Το ανδρείκελο είναι ο KEMAR της G.R.A.S. Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε σήμα λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου (log-sin. sweep) με εύρος [20 Hz, 20 kHz] και διάρκεια 5 sec, με συχνότητα δειγματοληψίας 48 kHz.



(α)



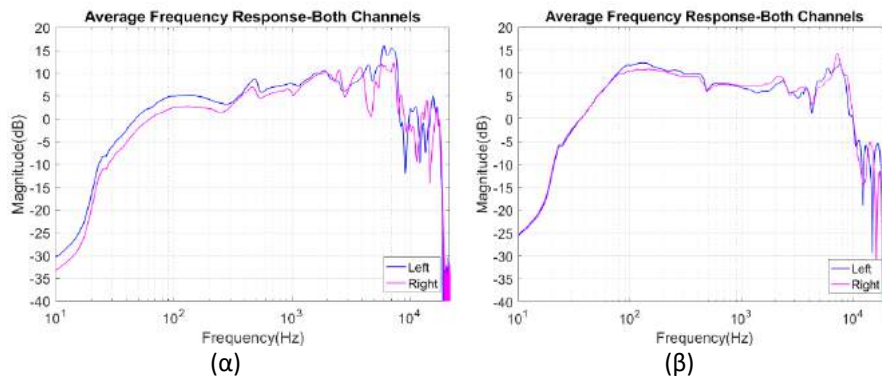
(β)

Εικόνα 2.1 (α) Προσομοιωτής κεφαλής και κορμού (β) Τοποθέτηση παντοκατευθυντικών πυκνωτικών μικροφώνων στις εισόδους των λοβών

Πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις για κάθε μέτρηση με επανατοποθέτηση των ακουστικών στο ανδρείκελο και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των κρουστικών αποκρίσεων για κάθε κανάλι (αριστερό και δεξί) και για κάθε ένα ζεύγος ακουστικών που εξετάστηκαν και με κατάλληλο παράθυρο περιορίστηκαν στα 25000 σημεία, μήκος που κρίθηκε ικανοποιητικό για ικανοποιητική ακρίβεια στις χαμηλές συχνότητες. Τα μοντέλα των ακουστικών που μετρήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.1 και ενδεικτικές αποκρίσεις συχνότητας φαίνονται στην Εικόνα 2.2.

Πίνακας 2.1 Λίστα ακουστικών που μετρήθηκαν.

A/A	Κατασκευαστής	Μοντέλο	Τύπος
1	Ultrasone	Pro 750	close-back
2	AKG	K240	semi-open
3	AKG	K240	semi-open



Εικόνα 2.2 Φασματική απόκριση ακουστικών (α) Ultrasone pro 750 (β) AKG K240.
Μπλε γραμμή : Αριστερό κανάλι. Ροζ: Δεξί κανάλι.

2.2 Ισοστάθμιση με τη μέθοδο τοποθέτησης πόλων

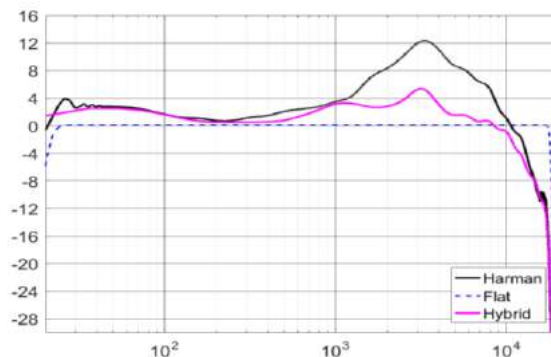
2.2.1 Επιλογή απόκρισης στόχου (target)

Στην εργασία έγινε μελέτη τριών περιπτώσεων αποκρίσεων στόχου-που δίνονται στην Εικόνα 2.3:

Απόκριση στόχου επίπεδου φάσματος (FT-Flat Target): πρόκειται για ιδανική απόκριση, δηλ. ένα ζωνοπερατό φίλτρο με ζώνη διάβασης [20 19000] Hz (Εικ. 2.3, διακεκομμένη μπλε γραμμή). Αποφεύγονται έτσι ανεπιθύμητες αντισταθμίσεις του φασματικού μέτρου στα άκρα του φάσματος όπου θα ενισχυόταν μόνο ο θόρυβος.

Απόκριση στόχου με προσέγγιση της καμπύλης Harman (T-Harman Target)[1,9,10,11] όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικ. 2.3 με τη μαύρη γραμμή.

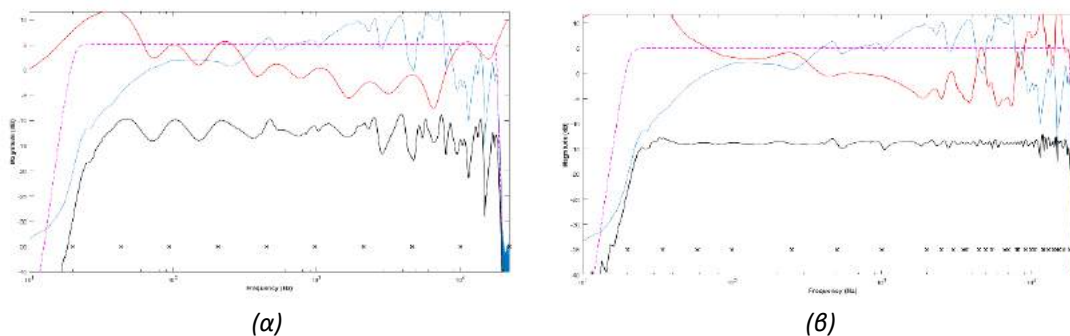
Υβριδική απόκριση στόχου (CT- Custom Target): Πρόκειται για πρόταση της εργασίας αυτής για μια καμπύλη μεταξύ των δύο προηγούμενων εξομοιώνοντας σε ένα βαθμό την καμπύλη Harman χωρίς να εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις από την επίπεδη απόκριση στόχου (Εικόνα 2.3 ροζ καμπύλη).



Εικόνα 2.3: Οι τρεις καμπύλες απόκρισης στόχου για την ισοστάθμιση των ακουστικών

2.2.2 Τοποθέτηση πόλων και υπολογισμός συντελεστών φίλτρου

Το κρίσιμο στάδιο για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι η σωστή τοποθέτηση των πόλων p_k που περιλαμβάνει δύο επιμέρους βήματα: (α) την απόφαση για το πλήθος (k) των πόλων που θα τοποθετηθούν και (β) την επιλογή κατάλληλων θέσεων (συχνοτήτων) f_k για την τοποθέτησή τους. Βασικά κριτήρια γι' αυτές τις επιλογές αποτελούν τόσο η αποτελεσματικότητα των ισοσταθμίσεων όσο και το κόστος υλοποίησης των αντίστροφων φίλτρων. Η διαδικασία γίνεται με δοκιμές (trial and error) χωρίς κάποια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται ενδεικτικά ένα φίλτρο 10 πόλων τοποθετημένων σε ίσες λογαριθμικά αποστάσεις (Εικ. 2.4(α)) και ένα φίλτρο 30 πόλων με επικαλυπτόμενα διαστήματα. Σε αυτή την εικόνα οι θέσεις των πόλων σημειώνονται με “x” στο κάτω μέρος του διαγράμματος. Επίσης, με διακεκομμένη γραμμή διαγράφεται η απόκριση στόχου, με μπλε η απόκριση προς διόρθωση, με κόκκινο η απόκριση του αντίστροφου φίλτρου και με μαύρο η διορθωμένη απόκριση.



Εικόνα 2.4 Αποτελέσματα ισοστάθμισης με αντίστροφο φίλτρο (α) 10 πόλων σε ίσα λογαριθμικά διαστήματα (β) 30 πόλων σε επικαλυπτόμενα διαστήματα

2.3 Αξιολόγηση των μεθόδων

2.3.1 Αντικειμενική αξιολόγηση

Για την αντικειμενική αξιολόγηση των μεθόδων χρησιμοποιήθηκαν η τυπική απόκλιση όπως αυτή ορίζεται στη Σχέση 2.1 (std - standard deviation) και η φασματική ομαλότητα όπως αυτή ορίζεται στη Σχέση 2.2 (spectral flatness) [13]. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων υπολογίστηκαν πριν και μετά την διόρθωση

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.1)$$

$$Flatness = \frac{\sqrt{\prod_{i=0}^{N-1} x_i}}{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i}{N}} \quad (2.2)$$

όπου $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ είναι οι τιμές του μέτρου του φάσματος \bar{x} η μέση τιμή του μέτρου του φάσματος και N το πλήθος των διακριτών συχνοτήτων.

2.3.2 Υποκειμενική αξιολόγηση

Για την υποκειμενική αξιολόγηση των ισοσταθμίσεων με τη μέθοδο τοποθέτησης πόλων υλοποιήθηκε ένα πείραμα ακρόασης τύπου MUSHRA (“MUltiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor”), στο οποίο 18 ακροατές κλήθηκαν να βαθμολογήσει μια σειρά σημάτων μουσικής μέσω ακρόασης με τα ακουστικά. Τα σήματα ήταν τα πρωτότυπα, χωρίς επεξεργασία, μουσικά κομμάτια και τις συνελίξεις μουσικών κομματιών με τα αντίστροφα φίλτρα που σχεδιάστηκαν για τις τρεις υπό μελέτη αποκρίσεις στόχου (FT-Flat Target, HT-Harman Target, CT-Custom Target) και για τα δύο διαφορετικά μοντέλα ακουστικών. Τα αρχεία μουσικής ήταν τμήματα διάρκειας 12-18 sec, από 5 διαφορετικά μουσικά κομμάτια στις κατηγορίες «τζαζ», «σόλο πιάνο κλασική μουσική», «ποπ-γυναικεία φωνή», «σαξόφωνο» και «ηλεκτρονική μουσική».

Έτσι δημιουργήθηκαν 60 σήματα (3 διαφορετικά φίλτρα για 2 κανάλια σε 2 ζεύγη ακουστικών σε 5 διαφορετικά είδη μουσικής). Τα σήματα ομαδοποιήθηκαν σε δύο κατηγορίες με βάση το ζεύγος ακουστικών και κατά συνέπεια το πείραμα χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος οι ακροατές βαθμολόγησαν 30 σήματα φορώντας τα ακουστικά Ultrasonne και στο δεύτερο μέρος τα υπόλοιπα 30 φορώντας τα ακουστικά AKG. Κάθε μέρος αποτελούνταν από 5 τεστ, όσες και οι μουσικές κατηγορίες και κάθε τεστ περιλάμβανε 4 αρχεία προς βαθμολόγηση: 1) αρχικό αρχείο (θα αναφέρεται ως OR - Original), 2) αρχείο με φίλτρο FT 3) αρχείο με φίλτρο HT και 4) αρχείο με φίλτρο CT.

Η ερώτηση με βάση την οποία βαθμολόγησαν οι ακροατές τα παραπάνω σήματα ήταν: «Ποιο αρχείο ακούγεται καλύτερα κατά τη γνώμη σας; (100 – τέλεια ποιότητα, 0 – κακή ποιότητα)» ενώ παράλληλα παρακινήθηκαν να χρησιμοποιήσουν όλη την κλίμακα βαθμολόγησης ώστε να αφήνεται στην κρίση του ακροατή να ορίσει τα κριτήρια με τα οποία θα επιλέξει το ακουστικά καλύτερο σήμα για αυτόν-ην. Η σειρά εμφάνισης των τεστ ήταν τυχαία όπως επίσης τυχαία ήταν και η θέση των σημάτων προς βαθμολόγηση σε κάθε τεστ. Στα αποτελέσματα των τεστ εφαρμόστηκαν 1-WAY-ANOVA και 2-WAY-ANOVA για να γίνει η στατιστική ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

3. Αποτελέσματα

3.1 Σχεδιασμός φίλτρων και σύγκριση των μεθόδων ισοστάθμισης

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα σχεδιασμού φίλτρων ισοστάθμισης για ένα κανάλι από ένα ζεύγος ακουστικών. Γενικά παρατηρούμε ότι η αύξηση του αριθμού των πόλων δεν συνεπάγεται αποτελεσματικότερο φίλτρο ισοστάθμισης και απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα πόλων στις χαμηλές συχνότητες κάτω από τα 100 Hz, και στο διάστημα [3000, fs/2]. Επίσης για αποτελεσματικότερη ισοστάθμιση, χρειάζονται επιπλέον τοπικές βελτιώσεις και όχι αύξηση του αριθμού των πόλων στα «προβληματικά διαστήματα». Τα καλύτερα αποτελέσματα γενικά παρατηρήθηκαν με ανομοιόμορφη τοποθέτηση επιπλέον πόλων μόνο σε επικαλυπτόμενες προβληματικές φασματικές περιοχές (Εικόνα 2.4(β)).

3.2 Αντικειμενική αξιολόγηση μεθόδων

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά συγκριτικά αποτελέσματα για τη μεταβολή της τυπικής φασματικής απόκλισης (Σχέση 2.1) για τις 3 αποκρίσεις στόχου για τα ακουστικά Ultrasone Pro750. Για τις αποκρίσεις στόχου τύπου Harman όπως και την υβριδική απόκριση στόχου παρατηρούνται επίσης συστηματικά μεγαλύτερες τιμές τυπικής απόκλισης στις περιοχές με φασματικές κορυφές. Μετά τη διόρθωση, η φασματική ομαλότητα (Σχέση 2.2.) (Εικόνα 3.2) είναι πολύ κοντά στη μονάδα σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων, σε αντίθεση με τις αρχικές αποκρίσεις.

3.3 Υποκειμενική αξιολόγηση

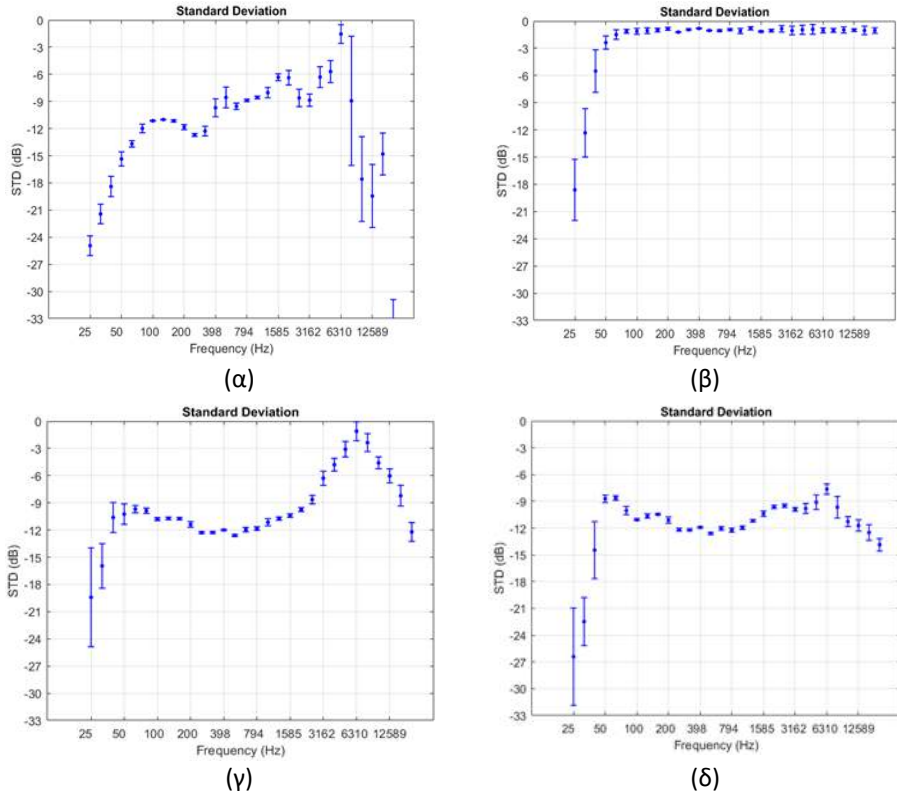
Στην Εικόνα 3.3 (α) παρουσιάζεται ο μέσος όρος της βαθμολογίας των ακροατών σε συνάρτηση με την απόκριση στόχου και το είδος μουσικής. Όπως διαπιστώνεται οι ακροατές προτιμούν τα φίλτρα της υβριδικής καμπύλης σε όλα τα είδη μουσικής, με εξαίρεση το μουσικό αρχείο κλασικής μουσικής με σόλο πιάνο, στο οποίο υπάρχει προτίμηση της καμπύλης Harman. πιθανώς λόγω της έντονης ενίσχυσης της καμπύλης Harman στα 3 kHz που βελτιώνει την συγκεκριμένη ηχογράφιση.

4. Συμπεράσματα

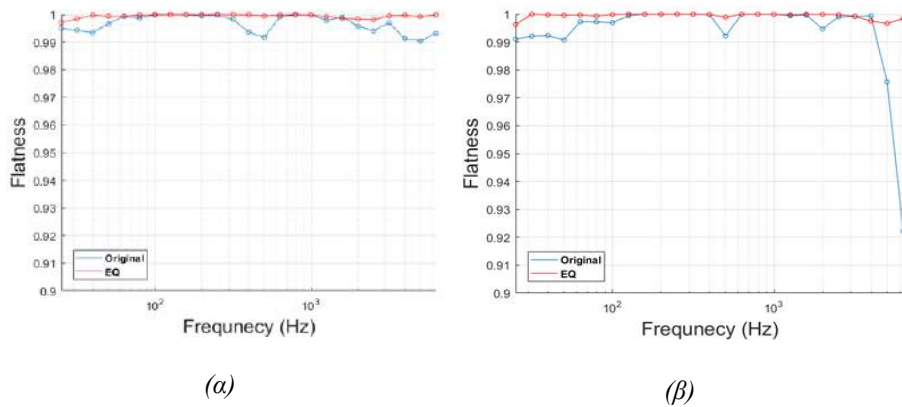
Τα αποτελέσματα ανέδειξαν τη σημασία προσεκτικής τοποθέτησης πόλων σε επικαλυπτόμενα διαστήματα συχνοτήτων, καθώς επίσης και ο αριθμός των πόλων και της μορφής της απόκρισης στόχου.

Από την αντικειμενική ανάλυση των μεθόδων συμπεραίνεται ότι πολύ ικανοποιητικά αντίστροφα φίλτρα μπορεί να σχεδιασθούν ανεξάρτητα από την καμπύλη στόχου τα οποία διόρθωσαν σχεδόν πλήρως τις αρχικές αποκρίσεις και ιδιαίτερα τα φίλτρα σχετικά μεγάλης τάξης, με 30-35 πόλους.

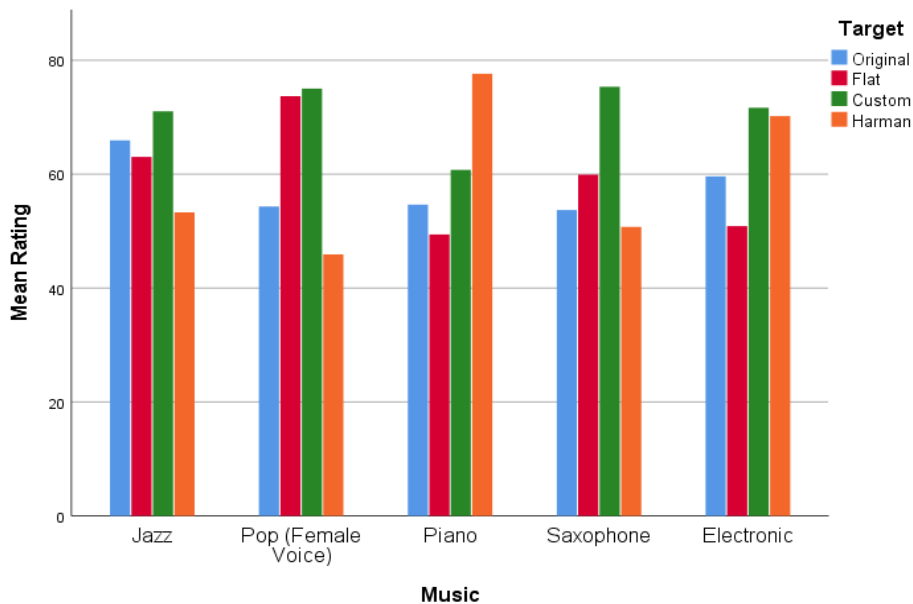
Από τα αποτελέσματα του υποκειμενικού τεστ, η προτεινόμενη υβριδική καμπύλη από συνδυασμό της ιδανικής επίπεδης απόκρισης με την απόκριση της καμπύλης Harman, φαίνεται να προτιμάται από τη συντριπτική πλειοψηφία των ακροατών



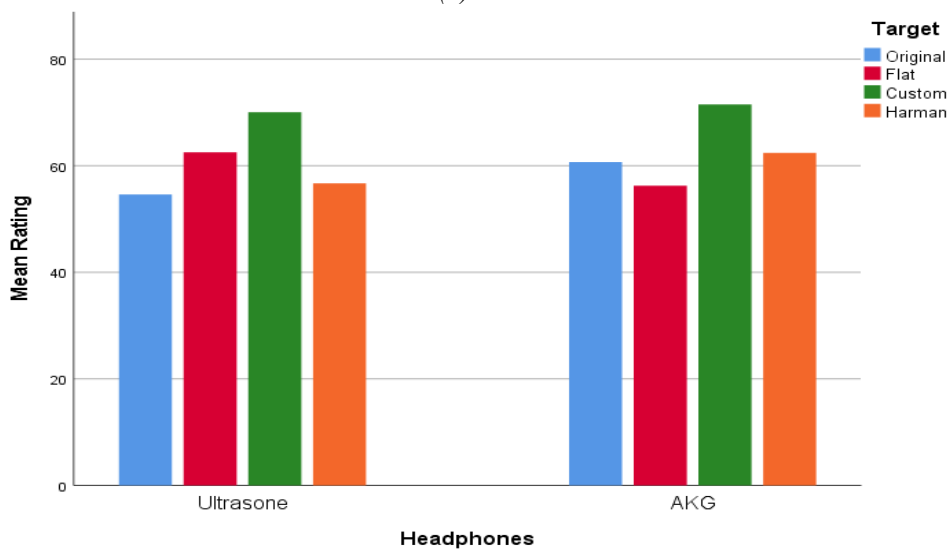
Εικόνα 3.1 Η τυπική απόκλιση για ένα κανάλι ακουστικών Ultrasono, (α) αρχικές μετρήσεις, (β) εφαρμογή επίπεδης απόκρισης στόχου με μεγάλης τάξης φίλτρο, (γ) καμπύλη στόχου Harman με μεγάλης τάξης φίλτρο και (δ) Υβριδική καμπύλη στόχου με μεγάλης τάξης φίλτρο.



Εικόνα 3.2 φασματική ομαλότητα της ισοστάθμισης στο αριστερό κανάλι των ακουστικών (α) Ultrasono φίλτρο 29 πόλων (β) AKG B τύπου με φίλτρο 30 πόλων



(α)



(β)

Εικόνα 3.3 Μέσοι όροι βαθμολογίας των ακροατών με βάση (α) την απόκριση στόχου. (β) το είδος μουσικής.

5. Βιβλιογραφία

[1] Borwick, John, ed. Loudspeaker and headphone handbook. CRC Press, 2012.

[2] Olive, S., Welti, T., McMullin, E. «Listener preferences for in-room loudspeaker and headphone target responses» in *Proceedings of the 135th Convention of the Audio Engineering Society*, New York, NY, USA, 17–20 October 2013.

[3] Ν. Μεμελετζόγλου, «Επεξεργασία αποκρίσεων ηχείων-χώρων για την βελτιστοποίηση της ακουστικής τους συμπεριφοράς», Διπλωματική Εργασία <http://hdl.handle.net/10889/10351>

[4] Ε.Πάσχου, «Υλοποίηση επεξεργασίας ήχου και ακουστικών αποκρίσεων με τη μέθοδο της τοποθέτησης πόλων», Διπλωματική Εργασία <http://hdl.handle.net/10889/10578>

[5] Μ. Ατσάλης, «Υλοποίηση χρονοσυχνοτικών μεθόδων ανάλυσης ηχητικών σημάτων με έμφαση στην ισοστάθμιση ακουστικών», Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Πατρών.

[6] B. Bank. «Direct Design of Parallel Second-Order Filters For Instrument Body Modeling» in *Proc. International Computer Music Conference Copenhagen*, Denmark, Aug. 2007.

[7] B. Bank. «Audio Equalization with Fixed-Pole Parallel Filters: An Efficient Alternative to Complex Smoothing» in *J. Audio Eng. Soc.* **61.1/2**, pp. 39–49 (Jan. 2013).

[8] B. Bank. “Perceptually Motivated Audio Equalization Using Fixed-Pole Parallel Second-Order Filters” in *IEEE Signal Processing Letters* **15**, pp. 477–480 (2008).

[9] P. Hatziantoniou, J. Mourjopoulos «Errors in real-time room acoustics dereverberation» in *J. Audio Eng. Soc.* **52** (9), pp. 883-899 (2004).

[10] Toole, Floyd, *Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms*, Focal Press, 2008.

[11] Olive S.E., Welti T., and McMullin E., «Listener Preference For Different Headphone Target Response Curves» *presented at the 13th Audio Eng. Soc. Convention*, preprint no. 8867, (2013 May).

[12] Fleischmann, F., Silzle, Andreas, and Plogsties, Jan, «Identification and Evaluation of Target Curves for Headphones», *presented at the 133rd Audio Eng. Soc. Convention*, preprint 8740, (Oct.2012).

[13] E. Georganti, J. Mourjopoulos. “Statistical Relationships of Room Transfer Functions and Signals”. in *Forum Acousticum*. Aalborg, Denmark, June 2011.

Ανοιχτή οπτικό-ηλεκτρονική πλατφόρμα δημιουργίας και αναπαραγωγής ήχων μέσω χειρονομιών.

Κωνσταντίνος Κιόσης^{1,2}, Βασίλης Μουζακίτης^{1,2}, Άγγελος Φλώρος¹,
Δημήτρης Ανεστόπουλος^{2,3}

¹Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Πλατεία Τσιριγώτη 7,
TK-49100 Κέρκυρα, Ελλάδα

²ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων, TK-
28200 Στυλιανού Τυπάλδου, Αηξούρι – Κεφαλληνίας, Ελλάδα

³Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Επιστημών Χημικών
Μηχανικών, ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ, Οδός Σταδίου, Πλατάνι, TK-26504 Πάτρα, Ελλάδα
kkiosis231@gmail.com , anestopd@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με το πέρασμα στην ψηφιακή εποχή και την τεράστια εξέλιξη στους μικροεπεξεργαστές, πολλοί καλλιτέχνες στράφηκαν στην ηλεκτρονική μουσική. Στην εργασία μας παρουσιάζεται μια ανοιχτή πλατφόρμα (διάταξη) μουσικής δημιουργίας μέσω οπτικό-ηλεκτρονικών διεπαφών (αισθητήρων). Εκμεταλλεύεται την κινησιολογία του ανθρώπου συνδυάζοντας δέσμες laser και διεπαφές όπου, μέσω ενός μικροελεγκτή, δημιουργεί ή αναπαράγει πληθώρα μουσικών αρθρώσεων σαν ένας πραγματικός γενικός ελεγκτής MIDI. Μελετήθηκαν ως αισθητήρες μεταλλικά αγώγιμα υλικά, αγώγιμες χρωστικές ουσίες καθώς και πολύ λεπτά, διαφανή και εύκαμπτα φιλμ γραφενίου ή υλικών που σχετίζονται με το γραφένιο. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά με υψηλές αποκρίσεις. Η ευκολία δημιουργίας και αναπαραγωγής, μέσω της πλατφόρμα αυτής, θα μπορούσε να την καταστήσει ως ένα εργαλείο εκμάθησης και ψυχαγωγίας, καθώς και ίσως ως ένα εργαλείο μουσικοθεραπείας.

Open optical-electronic platform for creating and reproducing sounds through gestures.

ABSTRACT

With the passage to the digital age and the tremendous evolution in microprocessors, many artists turned to electronic music. In our work, an open platform (set-up) of music creation through optical-electronic interfaces (sensors) is presented. It exploits man's kinesiology by combining laser beams and interfaces whereby, through a microcontroller, it creates or reproduces a multitude of musical joints as a real MIDI general controller. Sensors of metallic conductive materials, conductive pigments, as well as ultra-thin, transparent and flexible graphene films or graphene-related materials were studied. The results are quite satisfactory with high responses. The ease of creation and reproduction through this platform could make it a learning and entertainment tool, and maybe a music therapy tool.

Εισαγωγή

Όταν η τεχνολογία συνάντησε την τέχνη, ένα από τα αποτελέσματα της ήταν η δημιουργία μια τεράστιας μουσικής βιομηχανίας ραγδαία αναπτυσσόμενης. Αφού τα υπάρχοντα μουσικά μέσα είχαν πλέον εξαντλήσει τις δυνατότητες τους, καινούρια όργανα έπρεπε να δημιουργηθούν για την ανάπτυξη μιας νέας εκφραστικής γλώσσας που θα προσέφερε νέες μορφοποιητικές και ηχοχρωματικές δυνατότητες. Με το πέρασμα στην ψηφιακή εποχή και την τεράστια εξέλιξη στους μικροεπεξεργαστές, πολλοί καλλιτέχνες στράφηκαν στην ηλεκτρονική μουσική. Ολόκληρη η μουσική τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς προσφέροντας στους μουσικούς μεγαλύτερο εύρος δημιουργικότητας και επεξεργασίας, περισσότερη ευελιξία, άνεση και ασφάλεια.

Οι μικροελεγκτες και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία γίνονται πιο αποδοτικά και όλο και πιο προσιτά, το ίδιο και η γνώση πάνω σε αυτά. Με αποτέλεσμα να ανθεί το DIY (Do it Yourself), τάση η οποία προσθέτει την διάσταση της συλλογικής δημιουργικότητας στην επινόηση ηλεκτρονικών οργάνων, όπως φαίνεται και από διαγωνισμούς που λαμβάνουν χώρα την τελευταία δεκαετία σε διεθνές επίπεδο π.χ. το Margaret Guthman New Musical Instrument Competition, το music creativity & technology, κ.α. Εμφανίζονται νέες διεπαφες παραγωγής ήχου που έχουν σαν βάση τους αισθητήρες που επιτρέπουν την έκφραση και τον έλεγχο, εκμεταλλευόμενοι τις αρχές λειτουργία τους (απόστασης, ταχύτητας, κάμψης, περιστροφής κ.α.). Με αποτέλεσμα να δίνονται καινοτόμες ιδέες για τη βελτίωση των μουσικών οργάνων καθώς και για την δημιουργία εντελώς νέων τρόπων ελέγχου και παραγωγής μουσικών ήχων. Επίσης παρέχεται η δυνατότητα για την αξιοποίηση περισσότερων παραδοσιακών μορφών διεπαφης μουσικού-οργάνου.

Διαφανή ηλεκτρόδια, κυρίως από ΙΤΟ (Indium tin oxide), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αισθητήρες, φωτοανιχνευτές, επίπεδες οθόνες, συσκευές αφής κ.α. λόγω της χαμηλής επιφανειακής αντίστασης και της υψηλής οπτικής διαφάνειας. Ωστόσο, το ΙΤΟ είναι εύθραυστο και ασταθές και καθίσταται όλο και πιο ακριβό λόγω της περιορισμένης αφθονίας του ινδίου. Έτσι, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για νέα διαφανή αγώγιμα υλικά με χαμηλό κόστος και υψηλή μηχανική ευκαμψία.

Στην εργασία μας παρουσιάζεται μια ανοιχτή πλατφόρμα (διάταξη) μουσικής δημιουργίας μέσω οπτικό-ηλεκτρονικών διεπαφών (αισθητήρων). Εκμεταλλεύεται την κινησιολογία του ανθρώπου, εκτελώντας τις κινήσεις που πραγματοποιεί ένας μουσικός κρουστών οργάνων. Συνδυάζει δέσμες laser και διεπαφές όπου, μέσω ενός μικροελεγκτή, αναπαράγει μουσικές αρθρώσεις σαν ένας πραγματικός γενικός ελεγκτής MIDI. Ως διεπαφές (αισθητήρες) αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά φύλλα Αλουμινίου για τον συγχρονισμό των λειτουργιών τους καθώς και για τον έλεγχο της απόκρισης και της ευαισθησίας του συστήματος μας. Μέσω ανοιχτού κώδικα και midi πρωτόκολλου, δίνεται η ελευθερία δημιουργίας και αναπαραγωγής ήχων από κάθε μουσικό όργανο καθώς και σύνολο ήχων π.χ. ρυθμικά, ηχοτοπία, κ.α.

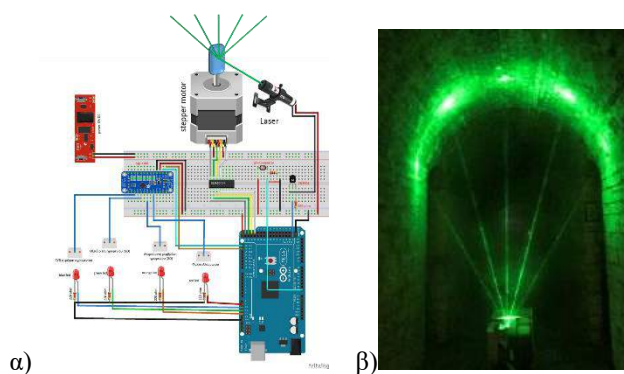
Επίσης, μέσω της διάταξή μας μελετήθηκαν και χαρακτηρίστηκαν διαπαφές με βάση το γραφένιο και υλικά του γραφενίου, ως ηλεκτρόδιο. Κατασκευάστηκαν σε μεγάλη κλίμακα πολύ λεπτά, διαφανή και εύκαμπτα φιλμ γραφενίου με 2 διαφορετικές τεχνικές: από οξειδίου του γραφενίου (GO) και από χημική εναπόθεση ατμών (CVD τεχνική). Μελετήθηκε η απόδοση και η ευαισθησία τους σε σχέση με το πάχος του γραφενίου, σε συνθήκες κάμψης, σε διάφορα υποστρώματα καθώς επίσης και ελεύθερα αιρούμενο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις διεπαφές

γραφηνίου τόσο ως αισθητήρες αφής όσο και ως πυκνωτικοί είναι πολύ ικανοποιητικά με υψηλές αποδόσεις, καθιστώντας το αρκετά ελπιδοφόρο ηλεκτρόδιο για το μέλλον.

1. Οπτικό-ηλεκτρονική πλατφόρμα δημιουργίας και αναπαραγωγής ήχων

1.1. Κατασκευή οπτικο-ηλεκτρονικής διάταξης

Η διάταξη αποτελείται από δυο μέρη που συνδυάζονται και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Στο πρώτο υπάρχει το οπτικό μέρος και στο δεύτερο οι αισθητήρες. Το πρώτο μέρος αποτελείται αρχικά από ένα συνεχές laser (ισχύς 200 mW τροφοδοσίας 12V) και έναν ελεγκτή ttl ώστε να το ανοιγοκλείνει ελεγχόμενα μέσω ενός transistor 2n3904 (Σχ. 1.1α). Η δέσμη του laser κατευθύνεται σε έναν καθρέφτη επιφάνειας 3cm x 3cm και ανακλάται. Ο καθρέφτης είναι τοποθετημένος σε ένα βηματικό μοτέρ το οποίο έχει βήμα 7,5 μοίρες (48 βήματα ανά κύκλο). Το βηματικό μοτέρ ελέγχεται από ένα ολοκληρωμένο το uln2004a το οποίο τροφοδοτείται με 12V και δέχεται εντολές από τον μικρό ελεγκτή. Μέσω του ολοκληρωμένου επιλέγεται το μοτέρ να πάλλεται πολύ γρήγορα μέσα σε γωνία 37,5 μοιρών και ενδιάμεσα να κάνει 5 στάσεις χρονικής διάρκειας 15ms. Το laser επιλέγεται μέσω του ελεγκτή ttl να είναι ανοιχτό κατά την διάρκεια των στάσεων και κλειστό κατά την κίνηση του ενδιάμεσα. Έτσι πετυχαίνετε η δημιουργία 5 δεσμών laser ευδιάκριτες στον αέρα (Σχ. 1.1β). Ανακόπτοντας μια δέσμη με ένα αδιάφανο μέσο (π.χ. το χέρι) η ανάκλαση του φωτός, από το μέσο, ανιχνεύεται από μια φωτοαντίσταση η οποία είναι συνδεδεμένη με τον μικροελεγκτή. Ο μικροελεγκτής μπορεί να αναγνωρίσει ποια δέσμη έχει ανακοπή τη συγκεκριμένη στιγμή συντονίζοντας, μέσω εντολών, laser, βηματικό μοτέρ και φωτοαντίσταση. Η κάθε δέσμη laser δίνει διαφορετικά ηλεκτρικά σήματα-εντολές στον μικροελεγκτή. Ο αριθμός των δεσμών, η ταχύτητα απόκρισης και η ευαισθησία των φωτοαντιστάσεων καθορίζονται και ελέγχονται από τον ανοιχτό κώδικα του μικροελεγκτή.



Σχήμα 1.18 α) Συνδεσμολογία κυκλώματος, β) Πραγματική εικόνα 5 δεσμών laser

Το δεύτερο μέρος της διάταξης αποτελείται από τις διεπαφές (αισθητήρες) οι οποίες είναι είτε αφής είτε πυκνωτικού τύπου (μεταβλητής δυναμικότητας) που είναι συνδεδεμένοι σε πλακέτα adafruit cap 1188 και επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή με το πρωτόκολλο I2C. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά φύλλα αλουμινίου για τον

συγχρονισμό των λειτουργιών τους καθώς και για τον έλεγχο της απόκρισης και της ευαισθησίας του συστήματος μας. Όταν ο κάθε αισθητήρας ενεργοποιείται έχει την δυνατότητα ή να στέλνει εντολές απευθείας ή να αλληλοεπιδρά με το πρώτο μέρος αλλάζοντας τις εντολές, που αρχικά είχαν οριστεί, στην κάθε δέσμη Laser και πλέον όταν ανακόπτονται να εξάγουν νέες. Έτσι δίνεται η δυνατότητα πολύ μεγαλύτερου αριθμού εξερχόμενων εντολών από την οπτικο-ηλεκτρονική διάταξή μας.

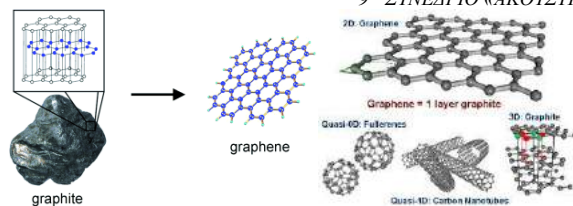
1.2. Δημιουργία και αναπαραγωγή ήχων

Η παραπάνω οπτικο-ηλεκτρονική διάταξη μπορεί ουσιαστικά να λειτουργήσει ως ένας ελεγκτής (controller). Οι εντολές που εξέρχονται τελικά από τον μικροελεκτη, είναι δεκαεξαδικου και δεκαδικού κώδικα σε μορφή MIDI. Με σειριακή θύρα στέλνονται στο υπολογιστή όπου μέσω ειδικού προγράμματος (π.χ. Hairless MIDI to Serial Bridge)[1] αναγνωρίζονται και καθοδηγούνται σε οποιοδήποτε πρόγραμμα που μπορεί να αναγνωρίσει MIDI πρωτόκολλο.[2] Στην παρούσα εργασία η οπτικο-ηλεκτρονική διάταξη χρησιμοποιείται ως ελεγκτής σε πρόγραμμα δημιουργίας επεξεργασίας και αναπαραγωγής ήχου. Έτσι δίνεται η ελευθερία σε κάποιον να δημιουργεί ή να αναπαράγει μουσικές αρθρώσεις (ήχους), να επιλεγεί όποιο μουσικό όργανο επιθυμεί και κάνοντας την κατάλληλη βαθμονόμηση στους αισθητήρες να μπορεί να ελέγχει την αλλαγή παλμικού βήματος, την αλλαγή της έντασης, κ.α. Εκμεταλλεύεται την κινησιολογία του ανθρώπου, εκτελώντας τις κινήσεις που πραγματοποιεί ένας μουσικός κρουστών οργάνων. Επιπλέον οι αρθρώσεις μπορούν να περιλαμβάνουν ηχοτοπία, δηλαδή σύνολο ήχων που παράγονται σε ένα οικοσύστημα, είτε ανθρωπογενών (μουσική, ανθρώπινη συμπεριφορά, ήχοι που παράγονται από τα μέσα μεταφοράς, τις βιομηχανίες, κ.α.) είτε φυσικών (όπως ήχοι ζώων, καιρικών και γεωλογικών φαινομένων). Επίσης, το σύστημα μας έχει το πλεονέκτημα επέκτασης με επιπλέον αισθητήρες προσφέροντας μεγαλύτερη διαδραστικότητα. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ελεγκτής σε πρόγραμμα φώτων, βίντεο, πολυκάναλο ηχοσυστήματος και για τη διάχυση των ήχων σε αυτό.

2. Μελέτη διεπαφών με βάση το γραφένιο

2.1. Γραφένιο (Υλικό του μέλλοντος) - Ιδιότητες

Το γραφένιο, είναι ένα νέο δισδιάστατο (2D) υλικό ατομικού πάχους (~0.35 nm) που βρέθηκε το 2004 (Νόμπελ Φυσικής το 2010) και αποτελεί την δομική μονάδα του γραφίτη, των νανοσωλήνων άνθρακα και των φουλερενίων (Σχ. 2.1) [3]. Αποτελείται από ένα ενιαίο στρώμα ατόμων άνθρακα, που συνδέονται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς εντός του στρώματος σχηματίζοντας εξαγωνικό κρυσταλλικό πλέγμα. Ως νανομεμβράνη έχει εκπληκτικές μηχανικές [4-7] και ηλεκτρικές ιδιότητες [8, 9] που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για την σύγχρονη τεχνολογία. Μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης και της ευαισθησίας πολλών ηλεκτρονικών συστημάτων όπου γίνονται ολοένα και πιο απαιτητικά, λόγω της ανάγκης για ηλεκτρονικά συστήματα πολύ μικρών διαστάσεων, ικανά να προσαρμόζονται σε φορητές ή ασύρματες συσκευές ηλεκτρονικής επικοινωνίας.

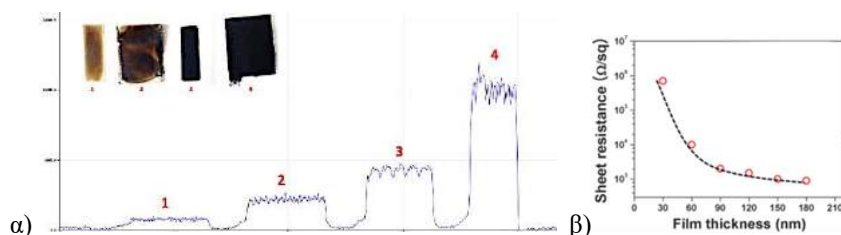


Σχήμα 2.19 Αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα

Παρά το εξαιρετικά λεπτό πάχος και τη μικρή μάζα του, το γραφένιο έχει μέτρο ελαστικότητας $\sim 1\text{TPa}$ και μηχανική αντοχή $\sim 130\text{ GPa}$, ιδιότητες που το καθιστούν ως την πιο ανθεκτική μεμβράνη στη φύση [10]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γραφένιο έχει αντοχή θραύσης 42 Nm^{-1} , ~ 200 φορές μεγαλύτερη από μια υποθετική χαλύβδινη μεμβράνη του ίδιου πάχους και εξαιρετική ευκαμψία (μηδενική αντίσταση στην κάμψη). Υπόκειται σε θραύση όπως το γυαλί σε εφελκυστικές παραμορφώσεις της τάξης του 30% [11]. Είναι εξαιρετικά διαφανές με διαπερατότητα στο λευκό φως $\sim 97,7\%$. Επίσης, η νανομεμβράνη γραφενίου εμφανίζει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα με υψηλότερη ηλεκτρική κινητικότητα φορέων που προσεγγίζει $\sim 200000\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$ όπου διατηρούνται ακόμη και μετά από παραμόρφωση [12]. Κατά συνέπεια, οι εξαιρετικές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του γραφενίου το καθιστούν ως ένα ιδανικό, λεπτό, διαφανές, αγωγίμο υλικό που μπορεί να αξιοποιηθεί ως εύκαμπτο ηλεκτρόδιο [13]. Το χαρακτηρίζουν ως “πλαστικό ηλεκτρονικό” υλικό και τα τελευταία χρόνια έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

2.2. Διεπαφές από οξειδίου του γραφενίου (GO)

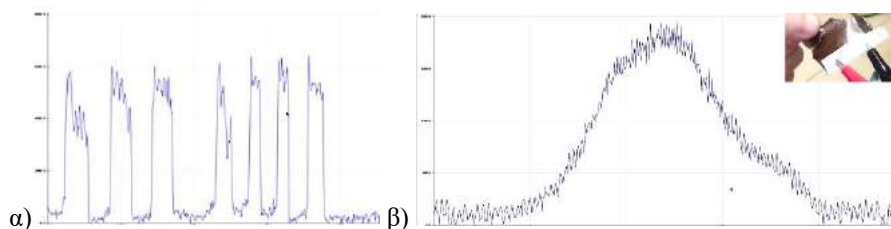
Αρχικά κατασκευάστηκαν διεπαφές με βάση το γραφένιο από υδατικό διάλυμα οξειδίου του γραφενίου (GO) με συγκέντρωση 2 mg / mL σε γυάλινα και πλαστικά υποστρώματα. Το διάλυμα GO επικαλύπτεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του υποστρώματος. Μετά από εξαέρωση του διαλύματος σε 48 ώρες σχηματίζεται μία ομοιόμορφη μεμβράνη GO πάνω στο υπόστρωμα. Φτιάχτηκαν δείγματα διεπαφών διαφορετικού πάχους γραφενίου, συνδέθηκαν με την διάταξη και μελετήθηκε η απόκριση τους ως προς το πάχος για τη χρήση τους ως ηλεκτρόδιο (Σχ. 2.2.α).



Σχήμα 2.2 α) Η απόκριση του σήματος σε σχέση με το πάχος του γραφενίου (ένθετο διαφορετικού πάχους GO διαφορετικού πάχους), β) Η μεταβολή της επιφανειακής αντίστασης σε συνάρτηση με το πάχος του γραφενίου

Παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται το πάχος του γραφενίου, η διεπαφή παρουσιάζει υψηλότερη απόκριση. Αυτό εξηγείται λόγω του ότι η αύξηση του πάχους της μεμβράνης οδηγεί σε χαμηλότερη επιφανειακή αντίσταση (Σχ. 2.2.β) άρα μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και συνεπώς μικρότερη απώλεια ισχύος [14]. Επίσης η ηλεκτρική του συμπεριφορά παραμένει και υπό συνθήκες κάμψης.

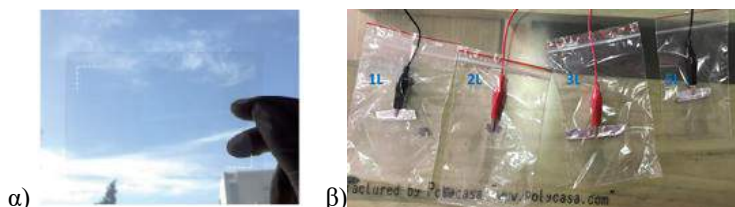
Μελετήθηκε επίσης η ηλεκτρική συμπεριφορά ελεύθερα αιωρούμενης μεμβράνης γραφενίου (GO) χωρίς υπόστρωμα, πρώτα ως αισθητήρας αφής, και τα αποτελέσματα δείχνουν υψηλές αποδόσεις και σταθερότητα στην απόκριση σε επαναλαμβανόμενες επαφές του χεριού μας με την μεμβράνη (Σχ. 2.3 α). Κατόπιν, ως πυκνωτικός αισθητήρας, αφού τοποθετήθηκε μέσα σε πλαστικό περίβλημα, παρατηρήθηκε σταδιακή άνοδος στο σήμα καθώς το χέρι μας πλησίαζε την μεμβράνη και στη συνέχεια σταδιακή πτώση κατά την απομάκρυνση (Σχ. 2.3 β), όπως ορίζει και η θεωρία ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

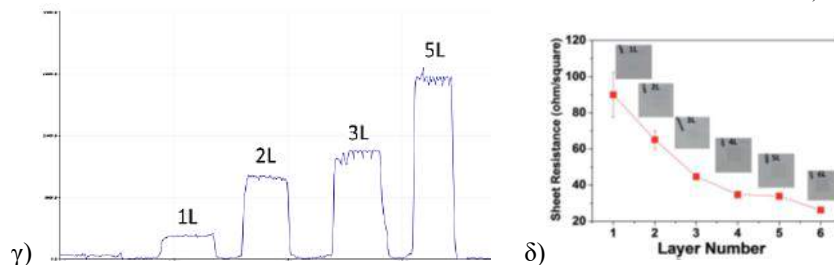


Σχήμα 2.3 α) Η απόκριση για επαναλαμβανόμενες επαφές με την ελεύθερα αιωρούμενη μεμβράνη γραφενίου (GO), β) Η μεταβολή της απόκρισης σε σχέση με την απόσταση από την ελεύθερα αιωρούμενη μεμβράνη γραφενίου (GO) (ένθετο η αιωρούμενη μεμβράνη γραφενίου (GO))

2.3. Διεπαφές από στρώματα γραφενίου μέσω CVD

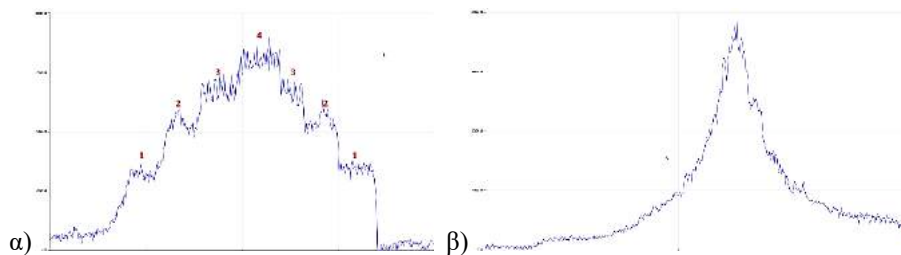
Τέλος, κατασκευάστηκαν διεπαφές από λεπτά στρώματα γραφενίου υψηλής ποιότητας που παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο CVD σε φύλλο χαλκού και μεταφέρθηκαν με καθορισμένη διαδικασία πάνω σε υπόστρωμα τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο PET. Μελετήθηκε η απόκριση τους, ως ηλεκτρόδιο, για διαφορετικό αριθμό στρωμάτων γραφενίου των 1, 2, 3, και 5 (Σχ. 2.4 α, β). Από το Σχήμα 2.4 γ. παρατηρείται ότι η απόκριση του σήματος ενισχύεται με την αύξηση των στρωμάτων γραφενίου. Αυτό όπως και προηγούμενα οφείλεται στο ότι η αύξηση των στρωμάτων γραφενίου επιφέρει χαμηλότερη επιφανειακή αντίσταση (Σχ. 2.4δ) και κατά συνέπεια υψηλότερη κινητικότητα φορέων.[15] Έτσι, η διεπαφή με βάση το 5-στρωματικό γραφένιο είχε την υψηλότερη απόκριση που οφείλεται στη μικρότερη απώλεια ισχύος.





Σχήμα 2.4 α) Διαφανές μονοστρωματικό γραφένιο σε PET. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις άκρες της μεμβράνης γραφενίου β) Δείγματα διαφορετικού αριθμού στρωμάτων γραφενίου 1, 2, 3, και 5 γ) Η απόκριση του σήματος για διαφορετικό αριθμό στρωμάτων γραφενίου, δ) Η επιφανειακή αντίσταση σε συνάρτηση με τον αριθμό στρωμάτων γραφενίου

Επίσης μελετήθηκε η απόκρισή τους, ως πυκνωτικοί αισθητήρες τόσο σε σχέση με την το εμβαδόν της επιφάνειας του ενός σπλισμού (χέρι μας) όσο και σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των σπλισμών. Μεταβάλλουμε την επιφάνεια του χεριού μας πλησιάζοντας διαδοχικά τα δάχτυλα (1, 2, 3 και 4) σε σταθερή απόσταση από την μεμβράνη γραφενίου και παρατηρούμε μια ανάλογη αύξηση στο σήμα με την αύξηση των δαχτύλων και ανάλογη μείωση κατά την μείωσή τους (Σχ. 2.5 α). Ενώ για σταθερή επιφάνεια καθώς πλησιάζουμε και απομακρύνουμε αργά το χέρι μας από την μεμβράνη γραφενίου το σήμα σημειώνει σταδιακή άνοδο και πτώση, αντίστοιχα, (Σχ. 2.5 β). Συνεπώς, τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σε απόλυτη συμφωνία με την θεωρία για την χωρητικότητα των πυκνωτών, όπου είναι ανάλογη ως προς την επιφάνεια των σπλισμών του και αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης. Επίσης η ηλεκτρική τους συμπεριφορά παραμένει και υπό συνθήκες κάμψης.



Σχήμα 2.5 α) Η μεταβολή της απόκρισης ως προς τον αριθμό των δαχτύλων που πλησιάζουν τη μεμβράνη γραφενίου (για σταθερή απόσταση), β) Η απόκριση του σήματος ως προς την απόσταση από τη μεμβράνη γραφενίου (για σταθερή επιφάνεια)

3. Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε μια ανοιχτή πλατφόρμα (διάταξη) μουσικής δημιουργίας μέσω οπτικό-ηλεκτρονικών διεπαφών (αισθητήρων). Συνδυάζει δέσμες laser και διεπαφές όπου, μέσω ενός μικροελεγκτή, αναπαράγει μουσικές αρθρώσεις σαν ένας πραγματικός γενικός ελεγκτής MIDI. Χρησιμοποιήθηκαν ως αισθητήρες μεταλλικά

αγώγιμα υλικά καθώς και πολύ λεπτά, διαφανή και εύκαμπτα φιλμ γραφενίου (οξειδίου του γραφενίου (GO) και στρωμάτων γραφενίου από CVD τεχνική). Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά με υψηλές αποκρίσεις, πιστοποιώντας τις εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες του γραφενίου για την χρήση του ως ηλεκτρόδιο. Η πλατφόρμα μας εκμεταλλεύεται την κινησιολογία του ανθρώπου, εκτελώντας τις κινήσεις που πραγματοποιεί ένας μουσικός κρουστών οργάνων. Η ευκολία με την οποία δημιουργείται και αναπαράγεται η μουσική, μέσω της πλατφόρμα αυτής, θα μπορούσε να την καταστήσει ως ένα εργαλείο εκμάθησης και ψυχαγωγίας για ανθρώπους κάθε ηλικίας (κυρίως παιδιά) που δεν απαιτεί μουσική γνώση, καθώς και ίσως ως ένα εργαλείο μουσικοθεραπείας, λόγω του ότι συνδυάζει διαφορετικές μορφές έκφρασης όπως είναι η κίνηση, ο λόγος και η μουσική ή ηχητική δημιουργία, μέσω του μουσικού αυτοσχεδιασμού.

4. Αναφορές

- [1] <http://projectgus.github.io/hairless-midiseria/>
- [2] <https://ttapa.github.io/PDF/Arduino-MIDI.pdf>
- [3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S., et al. «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films» *Science* 306, pp 666-669, (2004).
- [4] K. Papagelis, O. Frank, et al. «Axial deformation of monolayer graphene under tension and compression», in *Carbon Nanostructures Series*, Ed. L. Ottaviano and M. Vittorio, Springer-Verlag (2012)
- [5] Z. Li, I. A. Kinloch, R. J. Young, K. S. Novoselov, et al. «Deformation of Wrinkled Graphene» *ACS NANO* 9(4) , pp 3917-3925 (2015).
- [6] Otakar F., Tsoukleri G., et al. «Development of a universal stress sensor for graphene and carbon fibres» *Nature Comms*. DOI: 10.1038/ncomms1247, (2011)
- [7] Lee, C., Wei, X., et al. «Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene.» *Science* 321, pp 385–388 (2008)
- [8] Geim AK, «Graphene: Status and Prospects» *Science* 324 (5934) pp 1530–1534. doi:10.1126/science.1158877, (2009)
- [9] A. K. Geim and K. S. Novoselov, «The rise of graphene» *Nat. Mater.*, 6, pp 183–191, (2007)
- [10] Lee C, Wei X, Kysar JW and Hone J, «Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.» *Science* 321 pp 385–8, (2008)
- [11] Kim KS, Zhao Y, et al. «Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. » *Nature* 457 pp 706–10, (2009)
- [12] Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos, et al. «100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene. » *Science*, 327, pp 662. (2010)
- [13] Marcelo A. Kuroda, et al. «Conductance through Multilayer Graphene Films» *Nano Lett.* 11(9) pp 3629–33, (2011)
- [14] Keun-Young Shin, et al. «Flexible and transparent graphene films as acoustic actuator electrodes using inkjet printing» *Chem. Commun.*, 47, pp 8527–8529, (2011)
- [15] He Tian, Yi Yang, et al. «A flexible, transparent and ultrathin single-layer graphene earphone» *RSC Adv.*, 5, pp 17366–17371, (2015)

Real-Time detection, classification and DOA estimation of Unmanned Aerial Vehicle

Konstantinos Polyzos,
Evangelos Dermatas
Dept. of Electrical Engineering &
Computer Technology
University of Patras
ece8481@upnet.gr
dermatas@upatras.gr

ABSTRACT

The present work deals with a new passive system for real-time detection, classification and direction of arrival estimator of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The proposed system composed of a very low cost hardware components, comprises two different arrays of three or six-microphones, non-linear amplification and filtering of the analog acoustic signal, avoiding also the saturation effect in case where the UAV is located nearby to the microphones.

Advance array processing methods are used to detect and locate the wide-band sources in the near and far-field including array calibration and energy based beamforming techniques. Moreover, oversampling techniques are adopted to increase the acquired signals accuracy and to also decrease the quantization noise. The classifier is based on the nearest neighbor rule of a normalized Power Spectral Density, the acoustic signature of the UAV spectrum in short periods of time. The low-cost, low-power and high efficiency embedded processor STM32F405RG is used for system implementation. Preliminary experimental results have shown the effectiveness of the proposed approach.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται και αξιολογείται ένα νέο παθητικό σύστημα εντοπισμού, εκτιμητή κατεύθυνσης και αναγνώρισης ταυτότητας μη επανδρωμένων ιπτάμενων αντικειμένων (UAVs) σε πραγματικό χρόνο. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από εξαρτήματα υλικού πολύ χαμηλού κόστους, που περιλαμβάνουν την δυνατότητα εγκατάστασης δύο διαφορετικών συστοιχιών τριών ή έξι μικροφώνων, μη γραμμική ενίσχυση και φιλτράρισμα του αναλογικού ακουστικού σήματος, για την εξάλειψη του κορεσμού στα όρια της δυναμικής περιοχής για το αναλογικό σήμα σε περίπτωση που το UAV βρίσκεται κοντά στο μικρόφωνα.

Προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων συστοιχιών αισθητήρων χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό των πηγών σήματος ευρείας ζώνης των UAV στο εγγύς και μακρινό πεδίο, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών βαθμονόμησης των συστοιχιών και εύρεσης της κατεύθυνσης του UAV βασισμένου στην ενέργεια του σήματος που καταγράφεται στα μικρόφωνα. Επιπλέον, υιοθετούνται τεχνικές υπερδειγματοληψίας για την αύξηση της ακρίβειας των αποκτώμενων σημάτων και για τη μείωση του θορύβου κβαντισμού που εισάγει ο αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέα. Η αναγνώριση του UAV βασίζεται στον κανόνα του πλησιέστερου γείτονα

της κανονικοποιημένης πυκνότητας ισχύος, συγκρινόμενη με την ακουστική υπογραφή του φάσματος γνωστών UAV σε σύντομα διαστήματα χρόνου. Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιείται ο επεξεργαστής STM32F405R8 που έχει τα πλεονεκτήματα χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και υψηλής υπολογιστικής απόδοσης. Προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Introduction

Recently, a great number of organizations or individuals have shown increasing interest in flying Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or drones for surveillance, scientific and reconnaissance purposes or video recordings acquired by UAVs for entertainment [1,2,14,15]. This activity introduces several issues when the UAVs are flying over city centers, official buildings, airport areas, military or nuclear installations. In real-life environment, the detection and tracking them can be a difficult task using traditional techniques. Typical signal processing methods, based on RF data link signatures [3], Radars, cameras [11], proved low reliability methods due to the UAVs RF very low data communication rates or complete navigation autonomy, small vehicles size and low altitude flights. For this reason, there have been copious efforts of trying to find reliable techniques suitable for detection and classification of the acoustic signals generated by the UAVs [7]. An introductory review of the recent advances in detection, tracking and interdiction of UAVs can be found in [12].

Following the well-known and very popular method of linear prediction coding (LPC) [8], which has been used extensively to exploit the time dependence of the signal samples in short periods of time, the UAVs are detected through LPC classification [4]. In [18], an inexpensive array with dynamically placed microphones is used to detect and locate far-field broadband sources implementing array calibration and beamforming methods. In a short set of experiments, remotely controlled airplanes in an open field are located.

A system composed of a 120-element microphone array and a video camera is presented in [1], and it aims to acoustically detect and track small moving objects, such as drones or ground robots. The acoustic imaging algorithm determines, in real-time, the sound power level coming from all directions, using the phase of the sound signals. Consequently, a beamforming algorithm selectively extracts the sound coming from each tracked sound source. It was determined that drones can be tracked up to 160 to 250 meters, depending on their type and background noise. The experiments were carried out in both, laboratory environments and outdoor conditions.

In [13], an effective feature extraction method for unmanned aerial vehicle (UAV) detection is proposed and verified. The feature vector is composed of a mean and standard deviation of difference value between fundamental frequency and mean variation of their frequency. Qualitative measures based on Fisher scores, show outstanding discrimination of measured UAV signals with low signal to noise ratio (SNR) for these frequency-based features. Detection performance with simulated interference signal is compared to the very popular in speech technology MFCC and shows 37.6% of performance improvement.

One very important subject in acoustics is an accurate estimation of the Direction of Arrival (DOA) of any signal. In this case an array of microphones acquires simultaneous signals, and usually phase information and the far-field hypothesis introduces direction estimators such as Periodogram, MUltiple Signal Classification (MUSIC), iterative Sparse Asymptotic Minimum Variance (SAMV) etc. [5].

In this paper a new complete passive method and implementation for real-time detection, classification and DOA estimator of UAVs is presented and assessed. The proposed system composed of a very low-cost commercial hardware components, includes an array of three to six-microphones, non-linear analog amplification and digital filtering used to avoid saturation effects in the analog signals, in case where the UAV is located near to the microphones, and to increase the detection accuracy when the UAV is flying at long distances. Array processing methods are used to detect and locate the wide band sources in both near and far-field conditions, including array calibration and beamforming techniques, a mandatory part of the system due to the adopted very low-cost hardware implementation. Moreover, oversampling techniques are adopted to increase the acquired signals accuracy, eliminating also the quantization noise introduced by the Analog-to-Digital Conversion process (ADC). The classifier is built on the nearest neighbor rule of a feature set characterizing in detail the UAV spectrum in short periods of time. The features are estimated by performing real-time Fast Fourier Transform (FFT) [6].

In our implementation, the highly optimized DSP software library, provided by the ST Microelectronics, is used in a low-cost CortexM4 microcontroller. Preliminary experiments carried out in three different small size drones, show accurate detection estimation of the quadcopter position and type classification.

1. UAV Detection and DOA estimator

Several UAV detection methods have already been proposed and evaluated [13-15,]. In real-life applications three at least microphones offer not only the chance to detect the presence of a drone, but through beamforming and triangulation they can also find its position in 2D-space. Typically, more microphones were used for detection in 3D-space, i.e. estimating the Euclidean distance, azimuth and elevation. In addition, the coherent detection enabled by beamforming also increases the SNR ratio, which consequently increases the detection range, recognition rate and tracking accuracy [19].

In our design, two array configurations were tested, consisting of three and six low-cost condenser omnidirectional miniature microphones. The microphones position can be arbitrary, requiring a calibration procedure to determine their locations each time the system is starting to operate [16]. The calibration process consists of ten short time acoustic pulses generated in arbitrary positions nearby to array. Taking into account the time differences of the pulses arrived at the microphones, their relative positions in the 3D space can be estimated using the multi-dimensional scaling (MDS) method. Detailed presentation of related MDS methods can be found in [19-20].

After array calibration, where both microphones relative position and overall gain parameters are estimated [16,17,18], the system starts the normal operation: In real-time, if the signals power at any microphone exceeds an experimentally derived threshold, the UAV classification process is activated and if an UAV is detected, the

corresponding DOA is estimated, in case of three microphones, using the signals energy computed every 200 msec, i.e. 5 positions per second are estimated. If more accuracy is desired the delay and sum beamformer algorithm between pairs of sensors can be easily applied in the frequency domain and the weighted FFT can be calculated as $H(\omega) = P_{ss}(\omega) / (P_{ss}(\omega) + P_{nn}(\omega))$, where $P_{ss}(\omega)$ is the power spectral density of the signal and $P_{nn}(\omega)$ is the power spectral of the background noise, a convenient formula in cases where the background noise cannot be *ignored*.

2. UAV classification

In the available flash memory of the CortexM4 processor, the data of 32 normalized spectrum data of UAVs signatures can be stored. The classification process uses the nearest neighbor rule to estimate the closest similarity between the recorded normalized spectrum distribution over frequency and time and the library data stored in the micro-controller flash memory. If the minimum weighted-Euclidean distance identifies, for two consequent seconds, the same UAV and it is lower than a pre-defined threshold, the system detects the specific UAV presence.

In the training process, the mean value and the standard deviation at each frequency bin are estimated from real or recorded UAV sounds and are stored in the microcontroller flash memory. Both classification and training procedure can be implemented and run directly in the actual processor in real-time.

3. System implementation

3.1 Analog signal processing

In our design and implementation, low-cost commercial and popular analog and digital electronic components were used. The hardware consists of three or six condenser microphones, and the amplification/filtering system of each analog channel consists of four operational amplifiers integrated in a single MCP604 chip manufactured by the Microchip. Each amplifier provides a gain bandwidth of 2.8 MHz, low operating current of 230uA, low bias current, high-speed operation, high open-loop gain and rail-to-rail output swing and acceptable, in our application, input voltage noise density of 29 nV/sqrt(Hz). The MCP604 operates with a single supply voltage that can be as low as 2.7V. The amplifiers are connected in series, performing isolation of the microphone signal, high-pass filtering at 80Hz, analog logarithmic amplification, and in the final stage, a linear low-gain amplification stage, extending the analog signal in the range of 0-3.3V, to obtain maximum digitization accuracy for the three ADCs included in the chip of the embedded processor.

Each microphone costs 2.5 Euros and the MCP604, a very popular operational amplifier in low-frequency, low-power and low-cost applications, costs less than 1 Euro.

3.2 Digital signal processing

Among the great number of embedded processors, the most recent generation of low-cost, high performance CortexM4 ARM processors (Armv7E-M Harvard architecture) for embedded systems are adopted in our implementation. The Cortex-

M4 core features a floating point unit (FPU), single precision which supports all ARM single-precision data processing instructions and data types. The accelerated single precision Floating-Point Unit (FPU) offers up to ten times faster computations over the equivalent integer software library [10]. More specifically, the small-size development board STM32H405 (manufactured by Olimex Ltd [9], at 15 Euro) is used, including the power supply of the analog and digital circuits, and the STM32F405RG ARM Cortex-M4 processor (1.25 DMIPS/MHz). This processor provides a low-cost chip that meets the needs of a microcontroller unit (MCU) with reduced pin count and low-power consumption, while delivering high computational performance and an advanced system response to interrupts, three independent analog-to-digital converters (ADCs) and an efficient Direct Memory Access system. . The development board can be powered from the USB type B connector or using an external power supply at +5V DC.

The processor system clock was set to its maximum frequency of 168MHz and the three ADCs operate at ADCCLK=21MHz and 12 bits resolution (successive approximation converter) which is increased by oversampling implemented by software. Taking into account a conversion rate of $12+3=15$ cycles per sample, each ADC has a conversion rate of $21M/15cyc=1.4Msp$ s. Each ADC is sampling the analog signal from one microphone in the three microphones configuration. In the case of six microphones, each ADC is sampling continuously the analog signals of two microphones.

To minimize the CPU workload, the three/six digital signals are transferred to the RAM through a DMA channel. After $3*64$ ADC conversions ($6*32$ ADC conversions for the six microphones configuration) and DMA transfer actions, an interrupt signal is generated by the hardware and the CPU is directed to process the new digital signals, i.e. every $64/1.4Msp$ s= 45.71μ secs or 21875 times per second. Taking into account the logarithmic amplification in the analog domain, the inverse process performs in the digital domain, i.e. each digital sample is non-linear transferred to the equivalent linear space by computing the corresponding exponent value, and the oversampling process is applied by low-pass filtering and accumulating the 64 consecutive values. This action increases the sampling accuracy by 6 bits, giving an overall sampling accuracy of $12+6=18$ bits and the sampling frequency drops to 21.875 KHz, which is a reasonable value for both typical UAV power spectrum and microphones bandwidth. The final sampling frequency satisfies the Nyquist criterion for both typical UAV acoustic signals and microphones specifications.

The downsampled signals are stored into RAM and every 2048 samples, (and thus $21.875/2048=10.681$ ms), the power and the phase distribution over frequency of the three/six signals are estimated continuously in real time using the fast Fourier transform (FFT). The adopted implementation is very accurate, providing frequency accuracy of approximately 10Hz per bit. In the CortexM4 processor, three signals FFT of 2048-samples and the power spectrum estimation are completed within 1.21msecs, which is less than 10% of the processor computing capabilities Typical current consumption for the complete system including analog hardware is 130mA at 3.6V, which is quite satisfactory for battery powered devices.

The software is designed, downloaded (and debugging is also made) when running in the embedded processor using the System Workbench toolchain called SW4STM32, available from www.openstm32.org, which is a free, multi-OS software development environment based on Eclipse, supporting the full range of STM32

microcontrollers and a great number of associated boards. In a laptop running Ubuntu 16.04-LTS OS, the gcc compiler embedded toolchain 5.4, the standard peripheral library V1.8.0 and the DSP highly optimized library Revision: V.1.4.5, provided by the ST microelectronics was installed and used for the implementation of the complete system including peripheral programming, i.e. GPIOs, ADC, DMA, System clocks, USART communication to main computer, interrupt and signal processing functions and power spectrum estimation.

4. Power spectral density of 3 different types of UAVs

In Figures 1,2,3, the power spectral density up to 15KHz and a photo of three different types of UAVs, are shown; the Quadcopter DJI P3, Quadcopter CX10, and the Quadcopter Sennheiser MKH 8040. The acoustic signal is sampled at 44.1 KHz. The spectral density is significantly different between Quadcopters, following two principles: smaller propeller and quadcopter size leads to greater power at higher frequencies and the quadcopters introduce wide-band spectral density.

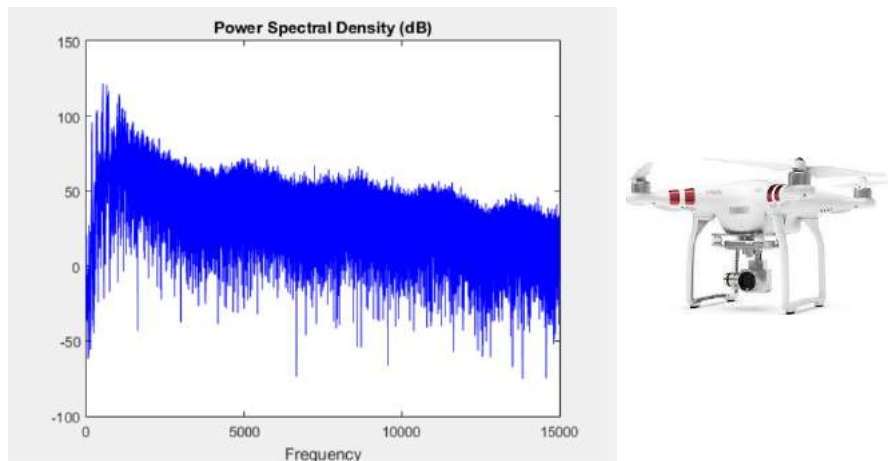


Figure 1: Power Spectral Density of Quadcopter DJI P3

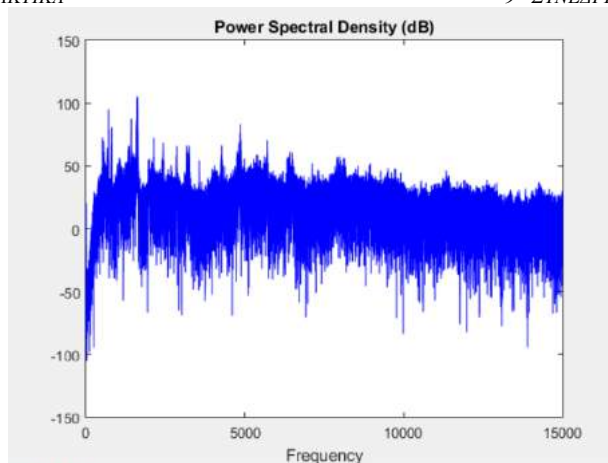


Figure 2: Power Spectral Density of Quadcopter CX 10

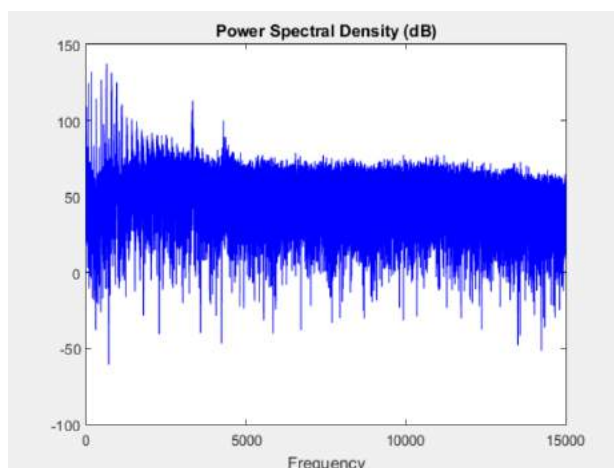


Figure 3: Power Spectral Density of Sennheiser MKH 8040

5. Conclusion

A complete autonomous low-cost, battery powered acoustic and recognition type system of detection and tracking regarding UAVs, based on a small number of condenser omnidirectional microphones, has been developed and assessed. Detection and tracking algorithms were implemented using an energy-based beamforming algorithm, a weighted distance function for quantitative measure of similarities between the normalized power spectral density of an audio fingerprint database of known quadcopters and the flying UAV. A detailed presentation of the implementation, including both analog and digital processing of microphone signals is given. In preliminary experiments, the detection and the classification module never

fail in noise-free environment. The total cost of the complete hardware in end-user prices is less than 30 Euros. Further experiments in more realistic environment will be carried out, improving also the location and tracking accuracy using the MDS framework.

6. References

- [1] J. Busset, F. Perrodin, P. Wellig, B. Ott, K. Heutschi, T. Rühl, T. Nussbaumer, "Detection and tracking of drones using advanced acoustic cameras" Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XI, and Advanced Free-Space Optical Communication Techniques and Applications Proceedings V. 9647, (2015) SPIE Security+Defence, Toulouse, France, 2015
- [2] S. Boddhu, M. McCartney, O. Ceccopieri, R. Williams, "A collaborative smartphone sensing platform for detecting and tracking hostile drones", Proceedings Volume 8742, Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR IV, SPIE Defense, Security, and Sensing, Baltimore, Maryland, United States, 2013
- [3] M. Peacock, "Detection and control of small civilian UAVs", Bachelor thesis, Edith Cowan University, 2014
- [4] J. Vilimek, and L. Burita, " Ways for Copter Drone Acoustic Detection" , International Conference on Military Technologies (ICMT), 2017
- [5] R. Adve, "Direction of Arrival Estimation" , Notes, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2017
- [6] J. Sunu, A. Percus, "Dimensionality reduction for acoustic vehicle classification with spectral embedding", *Sensing and Control (ICNSC)*, IEEE, 2018
- [7] L. Hauzenberger, and E. Holmberg Ohlsson, "Drone Detection using Audio Analysis" , Master's Thesis, LTH, Lund University, June 2015
- [8] L. Grama, E. Buhus, and C. Rusu, "Acoustic Classification using Linear Predictive Coding for Wildlife Detection Systems" , IEEE, 2017
- [9] <https://www.olimex.com/Products/ARM/ST/STM32-H405/>
- [10] <https://developer.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4>
- [11] Shuowen Hu, Geoffrey H. Goldman, and Christoph C. Borel-Donohue, "Detection of unmanned aerial vehicles using a visible camera system," *Appl. Opt.* **56**, B214-B221, 2017
- [12] I. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh, M. L. Sichitiu and D. Matolak, "Detection, Tracking, and Interdiction for Amateur Drones," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 75-81, APRIL 2018.
- [13] K. Juho, L. Kibae, B. Jinho, and L. Chong Hyun, "Feature Extraction Algorithm for Distant Unmanned Aerial Vehicle Detection", *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers* Volume 53, Issue 3, pp.114-123, 2016.
- [14] G. C. Birch, J. C. Griffin, and M. K. Erdman, "UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey," prepared by Sandia Nat'l. Labs, 2015.
- [15] M. Benyamin and G. H. Goldman, "Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array," Army Research Lab. tech. rep. (ARL-TR-7086), DTIC Doc., Sept. 2014.
- [16] K. Yao, R.E. Hudson, C.W. Reed, D. Chen, & F. Lorenzelli, "Blind Beamforming on a Randomly Distributed Sensor Array System", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 16th ed. 1555-1567, 1998

[17] Birchfield S., Subramanya, A. "Microphone Array Position Calibration by Basis-Point Classical Multidimensional Scaling. *Speech and Audio Processing*", *IEEE Transactions on*. 13. 1025 – 1034, 2005

[18] S. T. Birchfield, "Geometric microphone array calibration by multidimensional scaling," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03)*, Hong Kong, pp. V-157, 2003

[19] E. Case, A. Zelnio and B. Rigling, "Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking," *IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, OH, pp. 110-113, 2008

ΣΥΝΕΔΡΙΑ 12 Κτιριακή Ακουστική II

Η ακουστική της Αίθουσας Άρη Γαρουφαλή στο Ωδείο Αθηνών

Gottfried Schubert, schubert.athens@gmail.com

Χάρης Μωραΐτης, xmor@otenet.gr

Παναγιώτης Καραμπατζάκης, info@nestos.net

Σύμβουλοι Ακουστικής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την τεχνική προσέγγιση καθώς και τα αποτελέσματα της ακουστικής μελέτης που εκπονήθηκε για την αίθουσα «Άρη Γαρουφαλή» του ιστορικού κτιρίου Ωδείου των Αθηνών. Λαμβάνοντας υπόψη την διατήρηση τους ιστορικού χαρακτήρα του χώρου και τηρούμενοι με ευλάβεια τις υποδείξεις της οριστικής αρχιτεκτονικής μελέτης, οι μινιμαλιστικές επεμβάσεις που υποδείχθηκαν κρίθηκαν αναγκαίες για την ακουστική βελτίωση της αίθουσας. Πλήθος ακουστικών μετρήσεων διενεργήθηκαν για να καταγράψουν τα στάδια της ακουστικής βελτίωσης αλλά και ταυτόχρονα να αναδείξουν σημαντικά ζητήματα που μπορούν να προκύψουν από πιθανές μεταβολές και αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη σημασία επιλογής των καθισμάτων της αίθουσας καθώς και στις επιπτώσεις που μπορεί να έχει η εσφαλμένη εφαρμογή ακουστικών επιφανειών αποδεικνύοντας εξόχως τη σημαντική επιρροή τους στους βασικότερους δείκτες ακουστικής ποιότητας. Τέλος, η εργασία παρουσιάζει την «αναπόφευκτη» σύγκριση του μοντέλου ακουστικής πρόβλεψης με τα πραγματικά αποτελέσματα μέτρησης καθώς η διαδικασία μοντελοποίησης της αίθουσας αποτέλεσε ουσιαστικό κομμάτι της μελετητικής προσέγγισης.

The acoustics of Aris Garoufalidis Hall at the Athens Conservatoire

ABSTRACT

The current paper examines the technical approach as well as the results of the acoustic study conducted for the "Aris Garoufalidis" hall of the historical Conservatory of Athens. Due to architectural design limitations, minimal but necessary construction interventions were proposed. Numerous acoustical measurements were performed in order to capture the project's progress level and to highlight key issues that eventually emerged as a result of design deviations from the original plan. Particular emphasis was placed on the importance of the choice of the seats in the room as well as on the impact of the incorrect application of acoustic surfaces, demonstrating their considerable influence on the main indicators of acoustic quality. Finally, the paper demonstrates the "inevitable" comparison of the acoustic prediction model with

Εισαγωγή

Το κτίριο του Ωδείου Αθηνών στην οδό Ρηγίλλης & Βασιλέως Γεωργίου Β' στην Αθήνα είναι έργο του πολυβραβευμένου αρχιτέκτονα Γιάννη Δεσποτόπουλου.

Το κτίριο αυτό είχε πρόχειρα παραδοθεί στο Ωδείο πριν από περίπου 60 χρόνια και είχε παραμείνει ημιτελές μέχρι πρότινος. Ένα τμήμα του κτιρίου, η Αίθουσα Άρης Γαρουφαλής, ολοκληρώθηκε τέλος του 2017 χάρις στην χορηγία του Ιδρύματος «Φίλων της Αλικής Βατικιώτη για τη Μουσική και τις Τέχνες».

Η μελέτη της ολοκλήρωσης της αίθουσας, πραγματοποιήθηκε από το αρχιτεκτονικό γραφείο «Α66 Δημήτρης & Σουζάνα Αντωνακάκη» και ήταν τιμή μας να συνεργαστούμε ως σύμβουλοι σε θέματα ακουστικής.

Η Αίθουσα Άρης Γαρουφαλής είναι ένας χώρος για μουσικές εκδηλώσεις. Το πρώτο βήμα της μελέτης ήταν η διακρίβωση της ακουστικής της αίθουσας στην τότε υφιστάμενη κατάσταση. Ακολούθησε εμπειριστατωμένη μελέτη της ακουστικής του χώρου, η οποία έπρεπε να σεβαστεί αρχικά σχέδια αλλά και τις υποδείξεις της οριστικής αρχιτεκτονικής μελέτης περάτωσης. Στην φάση αυτή, στόχος της εργασίας μας ήταν η διαμόρφωση μιας αίθουσας συναυλιών. Δυσκολίες προέκυψαν εξαιτίας της απόφασης χρήσης κινητών καθισμάτων με τα γνωστά προβλήματα της περιορισμένης ηχοαπορροφητικής ικανότητας που τα χαρακτηρίζουν. Η ακουστική μελέτη προέβλεψε, με την χρήση μικρής έκτασης απορροφητικών στοιχείων, τιμές του χρόνου αντήχησης λίγο επάνω από τα όρια μιας αίθουσας συναυλιών.

Μετά από την ολοκλήρωση των κατασκευών, πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις που αποτύπωσαν μια σημαντική υπέρβαση των τιμών του χρόνου αντήχησης της μελέτης για την περίπτωση της αίθουσας χωρίς ακροατήριο. Η ακουστική της αίθουσας με ακροατήριο αποδείχθηκε άριστη. Επειδή όμως το Ωδείο χρησιμοποιεί την αίθουσα καθημερινά ως αίθουσα πρόβας και διδασκαλίας, χωρίς ή με μικρό ακροατήριο, τα υψηλά επίπεδα του χρόνου αντήχησης δημιουργούν σοβαρές λειτουργικές δυσκολίες με αποτέλεσμα η εκπόνηση μιας μελέτης βελτίωσης της ακουστικής του χώρου με μόνιμα αλλά και κινητά απορροφητικά στοιχεία, να κρίνεται απαραίτητη. Σκοπός της περαιτέρω μελέτης είναι η αίθουσα να μπορέσει να αποκτήσει ένα διττό λειτουργικό ρόλο ως αίθουσα πρόβας (rehearsal room) αλλά και ως αίθουσα συναυλιών, έχοντας καλή ακουστική συμπεριφορά, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα.

11. Η παλαιά μορφή της αίθουσας

Στην φωτογραφία που ακολουθεί, φαίνεται η παλαιά μορφή της αίθουσας.

Τα υλικά των τελικών επιφανειών είναι τα ακόλουθα:

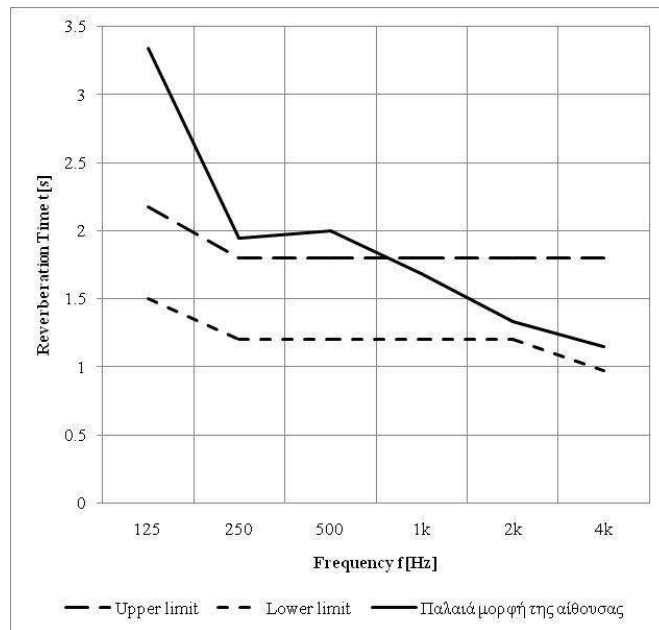
- οροφή επάνω από την σκηνή → βαμμένο σκυρόδεμα,
- οροφή επάνω από το ακροατήριο → απορροφητικά πανέλα Deweton,
- δοκάρια → βαμμένο σκυρόδεμα,
- πλευρικοί τοίχοι, τοίχος σκηνής → επίχρισμα,
- παράθυρα πλευρικών τοίχων → με διπλό υαλοπίνακα,

- παράθυρο τοίχου σκηνής → με μονό υαλοπίνακα,
- εξέδρα σκηνής → κόντρα πλακέ με μοκέτα,
- πλάτη εξέδρας → κόντρα πλακέ,
- πίσω τοίχος → εμφανής τουβλοδομή,
- πόρτες → ξύλινες πόρτες
- δάπεδο → μοκέτα



Σχήμα 1.20 Στην φωτογραφία φαίνεται η παλαιά μορφή της αίθουσας

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου αντήχησης της αίθουσας χωρίς ακροατήριο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις απαιτούμενες τιμές σύμφωνα με το DIN18041 [1] για μια αίθουσα μουσικής με όγκο 1500m³.



Σχήμα 1.2 Στο διάγραμμα φαίνεται ο χρόνος αντήχησης της παλαιάς αίθουσας και συγκρίνεται με το αποδεκτό πεδίο σύμφωνα με το DIN 18041 [1]

2. Πρόταση μελέτης

Σκοπός της μελέτης ήταν η διαμόρφωση της αίθουσας με απόλυτο σεβασμό στα αρχικά σχέδια αλλά και τις υποδείξεις της οριστικής αρχιτεκτονικής μελέτης περάτωσης. Στην φάση αυτή, στόχος της εργασίας μας ήταν η διαμόρφωση μιας αίθουσας συναυλιών.

Τα στοιχεία της αίθουσας είναι τα ακόλουθα:

Όγκος της άδειας αίθουσας	$V = 1500 \text{ m}^3$
Αριθμός καθισμάτων	$N_1 = 160 - 180$
Ορχήστρα(άτομα)	$N_2 = 20$
Όγκος ανά άτομο	$V/N = 7.5 - 8.3 \text{ m}^3$

Η πρώτη εκτίμηση του αναμενόμενου χρόνου αντήχησης της αίθουσας έγινε σύμφωνα με τις υποδείξεις του C. Cremer, H. Mueller [2] με τις οποίες ο χρόνος αντήχησης μίας αίθουσας, στην οποία, σημαντική ηχοαπορρόφηση, έχει, μόνο το ακροατήριο, είναι περίπου ένα τέταρτο του δείκτη V/N .

Πρώτη εκτίμηση χρόνου αντήχησης $T (500\text{Hz}) = 1.88 - 2.08\text{s}$

Για να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά της ακουστικής της άδειας αίθουσας και της αίθουσας με ακροατήριο δόθηκαν οι ακόλουθες προδιαγραφές για τα καθίσματα.

Άδειο κάθισμα:

$f[\text{Hz}]$	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,35	0,55	0,55	0,65	0,75	0,75

Κάθισμα με ακροατή:

$f[\text{Hz}]$	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,60	0,75	0,80	0,85	0,90	0,85

Η μελέτη ανατράπηκε με την απόφαση του Ωδείου ότι τα καθίσματα της αίθουσας πρέπει να είναι κινητά με δυνατότητα να στοιβάζονται. Έτσι, τα καθίσματα δεν μπορούσαν να έχουν ιδιαίτερες ηχοαπορροφητικές ιδιότητες.

Λόγω της χαμηλής απορρόφησης των καθισμάτων πρέπει να ορίζονται ηχοαπορροφητικές επιφάνειες στην αίθουσα, για την ρύθμιση του χρόνου αντήχησης της άδειας αίθουσας (κατάσταση πρόβας) ή της αίθουσας με μικρό ακροατήριο. Οι ηχοαπορροφητικές επιφάνειες πρέπει να είναι οι ελάχιστες για να αποφευχθούν πολύ χαμηλές τιμές του χρόνου αντήχησης κατά την διάρκεια της συναυλίας.

Η τελική διαμόρφωση της αίθουσας φαίνεται στην ακόλουθη τομή του χώρου, όπου τα ηχοαπορροφητικά στοιχεία φαίνονται με κόκκινο χρώμα και στην φωτογραφία. Το πράσινο χρώμα δείχνει πανέλα με κάποια διαχυτική ικανότητα.

Οι απορροφητικές επιφάνειες είναι τύπου Sto Silent Panel με την ακόλουθη γεωμετρία:

Τοίχος / οροφή	
Ορυκτοβάμβακας 40kg/m^3	100mm
Ηχοαπορροφητικό πανέλο Sto Silent Panel	15mm
Επίχρυσμα Super Fine	

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα (α) της κατασκευής είναι:

f[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
α	0.3	0.5	0.75	0.7	0.6	0.75

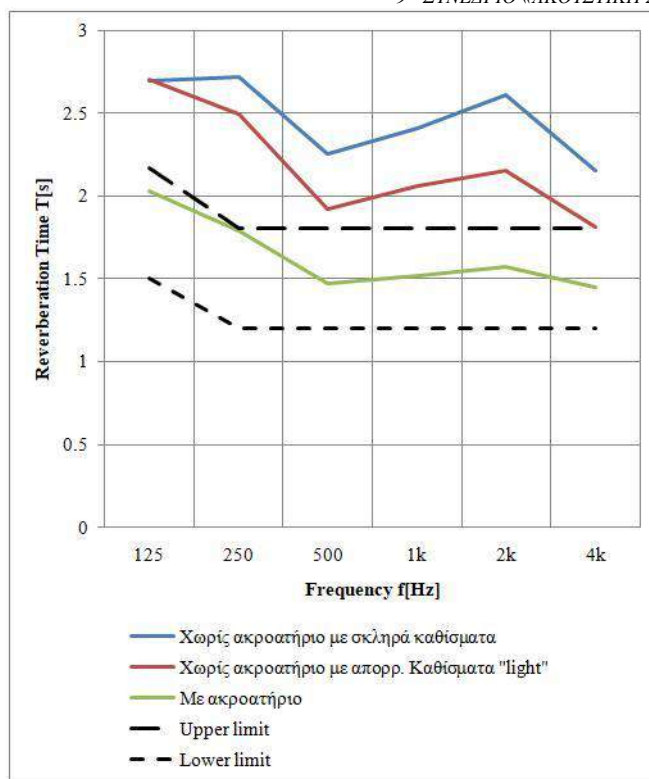


Σχήμα 2.1 Διανομή των ηχοαπορροφητικών (κόκκινο) επιφανειών και των διαχυτικών επιφανειών (πράσινο)



Σχήμα 2.2 Τελική εικόνα της αίθουσας (φωτογραφία tense architecture network)

Οι υπολογισμοί του χρόνου αντήχησης της αίθουσας φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα. Οι υπολογισμοί έγιναν με την απλή μέθοδο του Sabine.

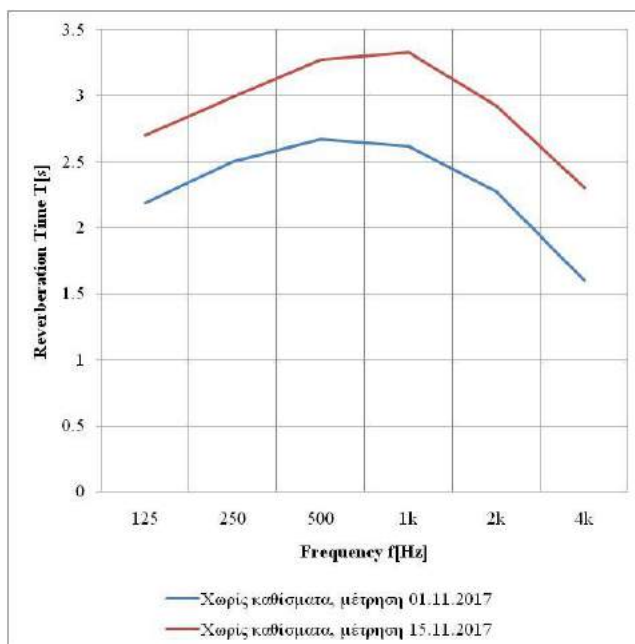
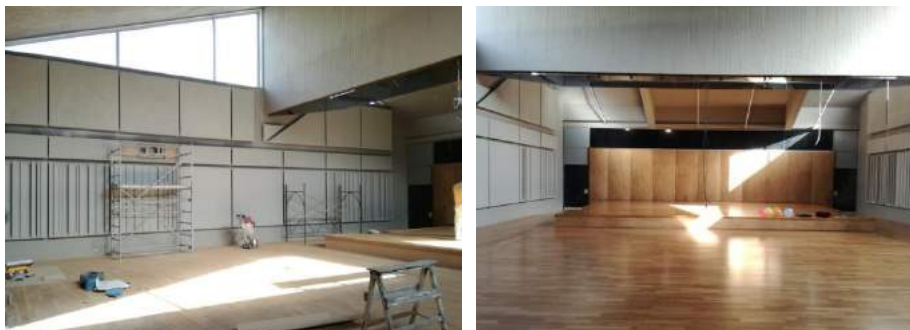


Σχήμα 2.3 Αποτελέσματα του υπολογισμού του χρόνου αντήχησης

Τα αποτελέσματα σχολιάζονται ως εξής: Ο χρόνος αντήχησης είναι υψηλότερος από την ιδανική τιμή χωρίς να δημιουργείται σημαντικό πρόβλημα για τους μουσικούς στην περίπτωση χρήσης ακουστικά σκληρών καθισμάτων. Στην περίπτωση τοποθέτησης ελαφρά ηχοαπορροφητικών καθισμάτων αναμένεται ο χρόνος αντήχησης να πλησιάζει το ανώτατο προτεινόμενο όριο. Αυτό σημαίνει για τα καθίσματα ότι κάθε ηχοαπορρόφηση (υφάσματα, μαξιλάρια κλπ) είναι ευπρόσδεκτη. Ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας με ακροατήριο βρίσκεται στην ιδανική περιοχή σύμφωνα με το DIN18041 [1].

3. Μετρήσεις του χρόνου αντήχησης μετά από την αποπεράτωση των εργασιών

Ο χρόνος αντήχησης μετρήθηκε στην άδεια αίθουσα λίγο πριν από την αποπεράτωση των εργασιών (01.11.2017) και μετά από αυτήν (15.11.2017). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα και η κατάσταση του χώρου φαίνεται στις φωτογραφίες.

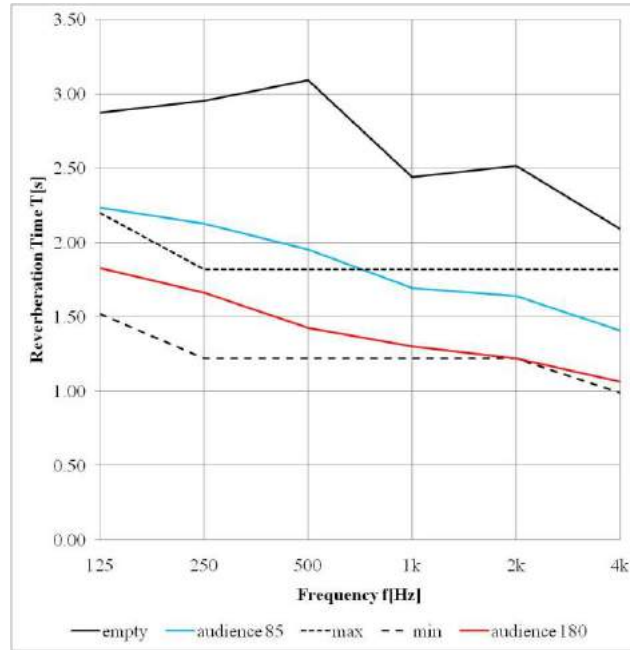


Σχήμα 3.1 Αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης στην άδεια αίθουσα λίγο πριν από την αποπεράτωση των εργασιών και μετά από αυτήν, επάνω αριστερά η κατάσταση της αίθουσα 01.11.2017, δεξιά 15.11.2017

Η μεγάλη διαφορά της τιμής του χρόνου αντήχησης για όλες τις συχνότητες δεν μπορεί να οφείλεται στις εργασίες καθαρισμού της αίθουσας και στο βάψιμο του παρκέ. Με τις εργασίες αυτές αναμένεται μια μικρή αύξηση του χρόνου αντήχησης στις υψηλότερες συχνότητες. Έτσι οι μετρήσεις είναι μια ισχυρή ένδειξη ότι τα απορροφητικά στοιχεία Sto Silent Panel δεν έχουν την πιστοποιημένη ηχοαπορρόφηση και η απορρόφηση μειώθηκε επιπλέον στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δυο μετρήσεων εξαιτίας επεμβάσεων στην τελική επιφάνεια των πανέλων.

4. Χρόνος αντήχησης της αίθουσας με καθίσματα και ακροατήριο

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας με καθίσματα και με ακροατήριο. Στην φωτογραφία φαίνεται η κατάσταση της αίθουσας.



Σχήμα 4.1 Αποτελέσματα των μετρήσεων του χρόνου αντήχησης της αίθουσας με καθίσματα και με ακροατήριο



Σχήμα 4.2 Φωτογραφία της αίθουσας με ακροατήριο και λεπτομέρεια των καθισμάτων

Η επίδραση των καθισμάτων που φέρουν μια δερμάτινη επένδυση αποτυπώνεται στην παραμόρφωση του φάσματος στις συχνότητες 1kHz και 2kHz. Ο χρόνος αντήχησης για την γεμάτη αίθουσα βρίσκεται στην απαιτούμενη περιοχή κατά DIN18041 [1].

Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης δείχνουν μια σημαντική υπέρβαση των τιμών της μελέτης για την περίπτωση της αίθουσας χωρίς ακροατήριο. Η ακουστική της αίθουσας με ακροατήριο αποδείχθηκε άριστη. Επειδή όμως το Ωδείο χρησιμοποιεί την αίθουσα καθημερινά ως αίθουσα πρόβας και διδασκαλίας, χωρίς ή με μικρό ακροατήριο, τα υψηλά επίπεδα του χρόνου αντήχησης δημιουργούν σοβαρές λειτουργικές δυσκολίες με αποτέλεσμα η εκπόνηση μιας δεύτερης μελέτης της ακουστικής του χώρου με μόνιμα αλλά και κινητά απορροφητικά στοιχεία, να κρίνεται απαραίτητη.

5. Προσαρμογή της αίθουσας στις απαιτήσεις Αίθουσας Πρόβας

Οι υπολογισμοί της μελέτης προσαρμογής της αίθουσας έγιναν με το λογισμικό CATT/TUCT V9.1 (Computer Aided Theatre Technique/ The Universal Cone Tracer). Η τιμή του χρόνου αντήχησης που προκύπτει από τους υπολογισμούς συγκρίνεται με τις μετρήσεις στην αίθουσα χωρίς ακροατήριο με καθίσματα (Σχ. 4.1). Για να υπάρχει μια αποδεκτή αντιστοιχία μεταξύ των υπολογισμών και των μετρήσεων πρέπει να προσαρμοστούν οι τιμές της ηχοαπορροφητικής ικανότητας των απορροφητικών πανέλων (Sto Silent Panel, superfine, MF, 100mm) στους τοίχους και στην οροφή της αίθουσας (κόκκινο χρώμα στο μοντέλο).

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα $\alpha(f)$ των πανέλων είναι:

f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α (πιστοποίησης)	0.3	0.5	0.75	0.7	0.6	0.75
α (πραγματική τιμή)	0.18	0.29	0.27	0.31	0.26	0.20

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών συγκρίνονται με τις μετρήσεις:

f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
T (μέτρηση)	2.87	2.95	3.09	2.44	2.52	2.09
T (υπολογισμός)	2.88	3.07	3.22	2.48	2.63	2.14

Ο υπολογισμός έγινε με την πραγματική τιμή της ηχοαπορροφητικής ικανότητας των πανέλων.

Οι προτάσεις για την προσαρμογή της αίθουσας είναι:

Ηχοαπορροφητική κουρτίνα στον πίσω τοίχο της αίθουσας

Κουρτίνα της εταιρείας Gerriets, χωρίς κυματισμό, τύπου Absorber CS, απόσταση από τον τοίχο $\geq 290\text{mm}$, εμβαδόν $\approx 37\text{m}^2$. Η ηχοαπορροφητική ικανότητα της κουρτίνας είναι:

f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
α	0.20	0.60	0.70	0.75	0.80	0.80

Ηχοαπορροφητική επένδυση επάνω από τα παράθυρα πίσω από την σκηνή

Η επένδυση έχει την ακόλουθη γεωμετρία:

Δοκάρι οπλισμένου σκυροδέματος - Ορυκτοβάμβακας 80kg/m³, 50mm - Ορυκτοβάμβακας 30kg/m³, 30mm - Μαύρο υαλοφασμα- Ηχοπερατό τελικό ύφασμα. Το εμβαδόν της επένδυσης είναι ≈ 12.6m². Η ηχοαπορροφητική ικανότητα της επένδυσης είναι:

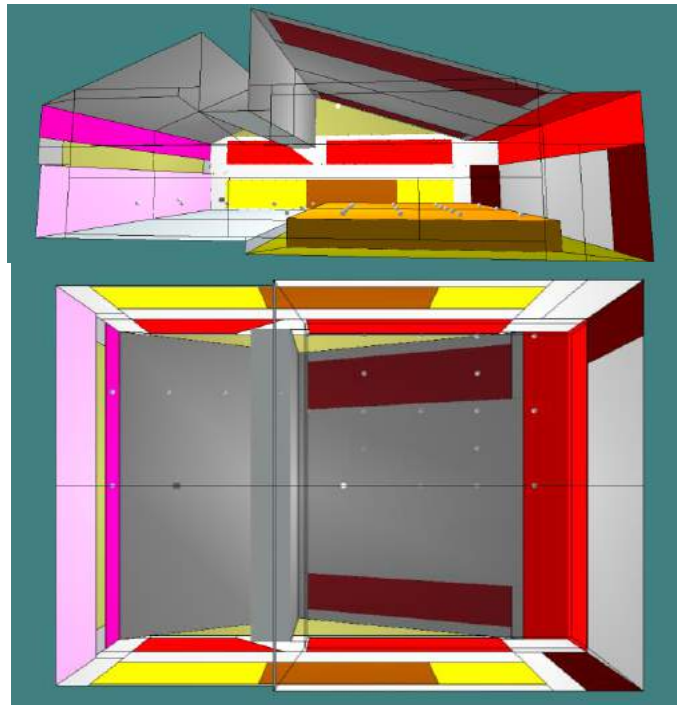
f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
a	0.30	0.65	0.99	0.99	0.99	0.99

Ηχοαπορροφητικά πάνελα οροφής

Τα ηχοαπορροφητικά πάνελα οροφής (16mm) είναι της εταιρείας n'Η Akustik τύπου Top Akustik 28/4 M, 7.5%, MF30mm με κενό 170mm. Το εμβαδόν της επένδυσης είναι ≈ 18m² στο νότιο φάτνωμα της οροφής και ≈ 24m² στο βόρειο φάτνωμα της οροφής. Η ηχοαπορροφητική ικανότητα είναι:

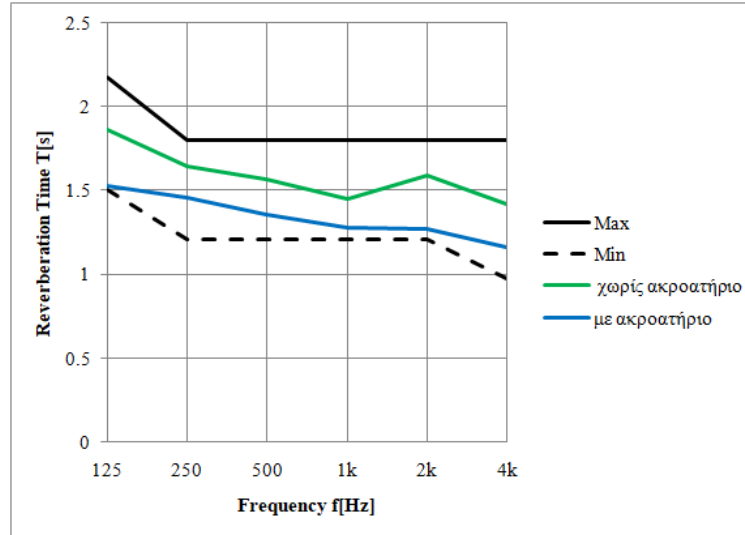
f[Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
a	0.57	0.88	0.92	0.71	0.52	0.45

Το ακουστικό μοντέλο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



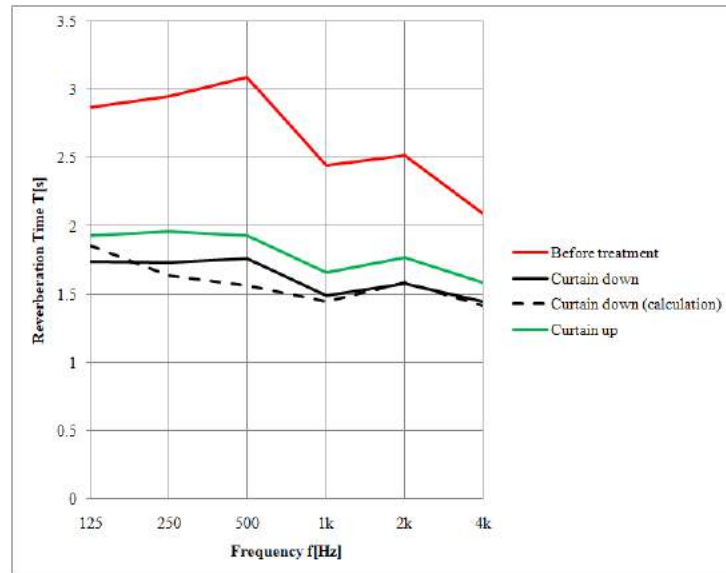
Σχήμα 5.1 Το ακουστικό μοντέλο της αίθουσας

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα5.2 Χρόνος αντήχησης μετά από την προσαρμογή σε αίθουσα πρόβας. Η κουρτίνα είναι ανοικτή στην περίπτωση της συναυλίας με ακροατήριο

Με την ολοκλήρωση των εργασιών έγιναν μετρήσεις του χρόνου αντήχησης στην αίθουσα χωρίς ακροατήριο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα5.3 Μέτρηση του χρόνου αντήχησης μετά από την ολοκλήρωση των εργασιών βελτίωσης

Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης μετά από την ολοκλήρωση των εργασιών βελτίωσης της ακουστικής της αίθουσας, επιβεβαιώνουν με αποδεκτή ακρίβεια τους

υπολογισμούς. Το Ωδείο Αθηνών διαθέτει τώρα μια αίθουσα μουσικής που είναι κατάλληλη όχι μόνο για συναυλίες αλλά και για μαθήματα και πρόβες χωρίς ακροατήριο. Η μέση τιμή του χρόνου αντήχησης (250Hz - 1kHz) κυμαίνεται μεταξύ 1.66s (κουρτίνα κάτω) και 1.85s (κουρτίνα επάνω).

6. Αναφορές

[1] DIN 18041, *Acoustic quality in small to medium sized rooms*, Beuth Verlag Berlin, (2004)

[2] L. Cremer, H. Müller, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*, Band 1, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, §32, (6,56) page 328 (1978)

Μετατροπή κτιριακού κελύφους του βιομηχανικού συγκροτήματος «Αλλατίνη» στη Θεσσαλονίκη σε αίθουσα μεταβλητής ακουστικής

Κωνσταντίνος Γεωργιάδης Φίλικας
Δρ., Μ.Α., Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός
georgiadisfkostas@gmail.com

Καλλιόπη Χουρμουζιάδου
M.Arch, PhD Αρχιτέκτων Μηχανικός
k.chourmouziadou@winodwslive.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται η μελέτη μετατροπής του διατηρητέου “Κτιρίου 24” του βιομηχανικού συγκροτήματος «Αλλατίνη» στη Θεσσαλονίκη σε αίθουσα εκδηλώσεων μεταβλητής ακουστικής συμπεριφοράς, ικανής να φιλοξενήσει δραστηριότητες μουσικής και ομιλίας. Πρόκειται για κτίριο ορθογωνικής κάτοψης με δυνατότητα μεταβλητής χωρητικότητας, μέσω της μετατροπής του σε επιμέρους αίθουσες, οι οποίες επιδεικνύουν κατάλληλες για τη χρήση τους συνθήκες ακουστικής συμπεριφοράς. Ο ακουστικός σχεδιασμός πραγματοποιείται με συνδυασμό γεωμετρικού σχεδιασμού ανακλαστήρων με την μέθοδο των ειδώλων και στατιστικών – ενεργειακών μεθόδων. Η μεταβλητή ακουστική συμπεριφορά επιτυγχάνεται με μεταβαλλόμενη ηχοαπορρόφηση στο εσωτερικό του κελύφους. Ο σχεδιασμός επικυρώνεται με ακουστική προσομοίωση με το λογισμικό CATT Acoustic.

Conversion of a building envelope of the industrial complex “Allatini” in Thessaloniki to a variable acoustics auditorium.

ABSTRACT

This paper presents the design of conversion of the reserved envelope of “Building 24” of the industrial complex “Allatini” in Thessaloniki into a variable acoustics auditorium, capable of accommodating both music and speech events. Its shoebox design demonstrates variable accommodation capacity by its conversion into two smaller auditoriums, with appropriate variable acoustic behavior. The acoustic design is performed based on the combination of geometrical design of reflectors with the method of images and the statistical – energy calculation method of reverberation time. The variable acoustics behavior is achieved by the use of variable sound absorption on the inner side of the building envelope. The design is being validated with an acoustic behavior simulation with the use of CATT Acoustic.

Εισαγωγή

Ο σύγχρονος ακουστικός και αρχιτεκτονικός σχεδιασμός νέων αιθουσών, απαιτεί από τις σχεδιαστικές προτάσεις την μέγιστη δυνατή προσαρμοστικότητα σε χωρητικότητα και ακουστική απόκριση του χώρου. Αν και η χρήση αιθουσών για διαφορετικούς σκοπούς δεν είναι κάτι καινούριο, ο συνειδητός σχεδιασμός των χώρων αυτών με στόχο την μεταβλητή ακουστική τους συμπεριφορά για διαφορετικούς τύπους εκδηλώσεων είναι μια σχετικά σύγχρονη τάση [1].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και ακουστική μελέτη της μετατροπής του παλαιού και κηρυγμένου ως διατηρητέου κελύφους του Κτιρίου 24 του βιομηχανικού συγκροτήματος Αλλατίνη στη Θεσσαλονίκη [2], ως μελέτη περίπτωσης για την αξιολόγηση της γεωμετρικής – ενεργειακής μεθοδολογίας αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού με τη χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων. Ο περιορισμός των σχεδιαστικών επιλογών και οι προκαθορισμένες διαστάσεις του κτιρίου, λόγω του μνημειακού χαρακτήρα του και της ανάδειξης του, αποτέλεσαν σχεδιαστική πρόκληση.

1. Υφιστάμενο κέλυφος – Ιστορικά στοιχεία

Ο μύλος Αλλατίνη, χαρακτηρισμένος ως ο μεγαλύτερος όλης της Ανατολής [3], κατασκευάστηκε το 1898 με βάση τις αρχές του εκλεκτικισμού από τον αρχιτέκτονα Vitaliano Poselli και λειτούργησε το 1902 [4]. Μέχρι το 1996, όπου το εργοστάσιο μεταφέρθηκε στη Σίνδο, κατασκευάστηκε πλήθος βοηθητικών κτιρίων, πολλά από τα οποία δεν βασίστηκαν στον αρχιτεκτονικό χαρακτήρα του συνόλου, ενώ από τις επιμέρους επεμβάσεις προκλήθηκαν ανεπανόρθωτες βλάβες στα παλιά κτίρια [3]. Για τους παραπάνω λόγους το συγκρότημα κηρύχθηκε διατηρητέο με δύο αποφάσεις του υπουργείου πολιτισμού ως σύγχρονο μνημείο της βιομηχανικής κληρονομιάς της Θεσσαλονίκης [5,6]. Το Κτίριο 24 που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελούσε αποθηκευτικό χώρο (SILO) του βιομηχανικού συγκροτήματος των μύλων Αλλατίνη, το οποίο με την πρώτη απόφαση [5] κηρύχθηκε καθολικά διατηρητέο ενώ με την δεύτερη [6] μόνο ως προς το κέλυφος του. Σήμερα αποτελεί ιδιωτική περιουσία, ενώ έχουν παρουσιαστεί διάφορες μελέτες αποκατάστασης του συγκροτήματος που έχουν απασχολήσει ιδιαίτερα την κοινωνία της Θεσσαλονίκης.

Το Κτίριο 24 αποτελείται από υπόγειο, ισόγειο και δύο ορόφους με δίριχτη στέγη. Είναι ορθογωνικής κάτοψης, διαστάσεων 46 επί 16m εξωτερικά, με ύψος από το δάπεδο του υπογείου έως την αρχή της στέγης 15.3m και στέγης 3.5m.

2. Μεθοδολογία και ακουστικός σχεδιασμός

2.1 Μεθοδολογία και στόχοι του σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός αιθουσών για μία μόνο χρήση θεωρείται αντιοικονομικός, ιδιαίτερα σε μεσαίου πληθυσμού δήμους που δεν μπορούν να υποστηρίξουν εξειδικευμένες αίθουσες. Αυτή την ανάγκη καλύπτει ο σχεδιασμός πολλαπλών χρήσεων, ο οποίος όμως προκαλεί ιδιαίτερες προκλήσεις στον ακουστικό σχεδιασμό. Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι [7]:

- Η ικανοποιητική αντιμετώπιση των απαιτήσεων τουλάχιστον μίας από τις χρήσεις του χώρου και κυρίως της πιο συνηθισμένης.

- Ο «μέσος όρος» αποφάσεων, όπου οι χρήσεις μοιράζονται, όπως για παράδειγμα στην επιλογή του βέλτιστου χρόνου αντήχησης.
- Η πρόβλεψη στον ακουστικό σχεδιασμό μεταβλητών παραμέτρων, όπως η δυνατότητα αλλαγής της διάταξης των ακροατών, η αυξομείωση του όγκου, τα μεταβλητά ηχοαπορροφητικά υλικά και η χρήση ηλεκτρονικών μέσων για τον έλεγχο της αντήχησης του χώρου.

Οι παραπάνω παράμετροι αποτελούν τον πυρήνα του ακουστικού σχεδιασμού με στοιχεία μεταβλητής ακουστικής. Ο όρος «μεταβλητή ακουστική» (variable acoustics) [7] περιγράφει την πρόνοια του ακουστικού σχεδιασμού, ώστε η αίθουσα να παρουσιάζει βέλτιστες ακουστικές συνθήκες ανάλογα με την χρήση (ομιλία ή μουσική) του χώρου, παρέχοντας δυνατότητα μεταβολής του όγκου ή/και της εσωτερικής ηχοαπορρόφησης ή της διάταξης των ακροατών.

Η βασική πρόκληση του σχεδιασμού αιθουσών πολλαπλών χρήσεων είναι η υποστήριξη μη ηλεκτρονικά ενισχυόμενης ομιλίας ή μουσικής [8]. Οι βασικές κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό των αιθουσών πολλαπλών χρήσεων συνοψίζονται από τον Long [9]:

- Υπερυψωμένη πηγή πάνω από το ακροατήριο, ώστε να υπάρχει άνεση θέας χωρίς οπτικά εμπόδια.
- Σχεδιασμός ηλεκτρακουστικού συστήματος, όπου απαιτείται, για τις χρήσεις της αίθουσας, ώστε να υποβοηθά την πηγή και να μην επηρεάζει την αντίληψη της θέσης της πηγής.
- Σχεδιασμός κατάλληλων ανακλαστικών επιφανειών για τις πηγές που δεν υποστηρίζονται από ηλεκτρακουστικό σύστημα.
- Μεταβλητός όγκος και απορρόφηση του χώρου, ώστε ο χρόνος αντήχησης να είναι κατάλληλος για τη χρήση του. Επίσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν επενδυμένα καθίσματα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μεταβολή της απορρόφησης της περιοχής του ακροατηρίου όταν η αίθουσα είναι κενή.
- Μικρός και ελεγχόμενος θόρυβος βάθους, ώστε να μην επηρεάζει το περιβάλλον ακρόασης.

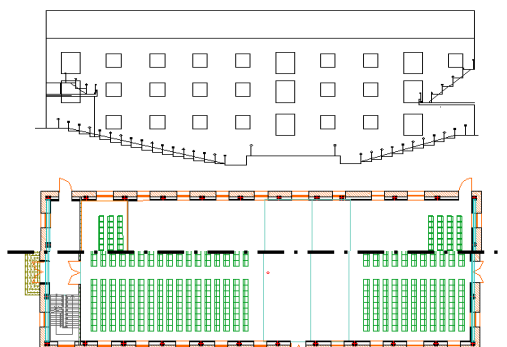
Στην παρούσα εργασία αρχικά αναλύεται και τεκμηριώνεται το συγκεκριμένο κέλυφος επί του οποίου εκτελείται ο σχεδιασμός. Καθορίζεται η δυνατότητα εφαρμογής των καλών πρακτικών του ακουστικού σχεδιασμού με βάση τη βιβλιογραφία και παράλληλα οι στόχοι και περιορισμοί του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Αρχικά διαχωρίζεται το κέλυφος σε αρχιτεκτονικά τμήματα που μπορούν να λειτουργήσουν ως αυτόνομες αίθουσες, οι οποίοι συνενωμένοι θα συνθέτουν μία ενιαία αίθουσα. Αυτός ο λειτουργικός διαχωρισμός μπορεί να εξυπηρετήσει επιμέρους εκδηλώσεις στον εκάστοτε χώρο, και παράλληλα να επιτρέψει την φιλοξενία του κοινού σε μία ενιαία αίθουσα με υβριδική διαρρύθμιση έγκεντρης αρένας και κουτιού παπουτσιών.

Οι όγκοι των αιθουσών που προκύπτουν ελέγχονται με στατιστικές – ενεργειακές μεθόδους, οι οποίες καθορίζουν τις επιμέρους και τις συνολικές απαιτήσεις μεταβολής του χρόνου αντήχησης. Ακολουθεί λεπτομερής σχεδιασμός με γεωμετρικές μεθόδους (μέθοδος των ειδώλων) [10], στόχος του οποίου είναι ο σχεδιασμός ευνοϊκών ανακλαστικών επιφανειών προς το ακροατήριο –κεντρικού κυρτού ανακλαστήρα πάνω από την σκηνή, σύμφωνα με την περιγραφόμενη θεωρία ανακλάσεων σε κυρτές επιφάνειες από τον Barron [8]. Ταυτόχρονα για την ορθή τοποθέτηση των ανακλαστήρων, ώστε να μην παράγουν δυσμενείς καθυστερημένες ανακλάσεις, χαράσσονται κατάλληλες ελλείψεις, ώστε η κύρια ανάκλαση πρώτης

τάξης να φτάνει με χρονική διαφορά μικρότερη των 35ms σε σχέση με τον απευθείας ήχο [2,8,11]. Μέσω επαναληπτικού σχεδιασμού καθορίζονται με λεπτομέρεια τα στοιχεία μεταβλητής ακουστικής, τα οποία βασίζονται στην μεταβολή της ηχοαπορρόφησης του εσωτερικού των αιθουσών, έτσι ώστε ο χρόνος αντήχησης να είναι ο επιθυμητός. Τέλος, τα αποτελέσματα του σχεδιασμού επικυρώνονται με ακουστική προσομοίωση με το λογισμικό CATT Acoustic [12] και αξιολογείται η επίδοση του γεωμετρικού – ενεργειακού ακουστικού σχεδιασμού.

2.2 Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός

Εξαιτίας του περιορισμένου διαθέσιμου πλάτους σε σύγκριση με το μήκος του κτιρίου, αξιοποιείται το σύνολο του πλάτους για την ανάπτυξη των θέσεων του κοινού. Η κίνηση των ατόμων γίνεται με τη βοήθεια ανάπτυξης εξωτερικού παράπλευρου διαδρόμου καθώς και κλιμακοστασίου στην μία πλευρά του κτιρίου. Για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας και της μεταβλητότητας της ενιαίας αίθουσας επιλέγεται μία διαμόρφωση έκκεντρης αρένας σε κουτί παπουτσιών (shoebox) 616 θεατών, με τοποθέτηση της σκηνής στο κέντρο και πρόβλεψη δυνατότητας διαχωρισμού της σκηνής σε δύο με τη χρήση κινητών διαχωριστικών τμημάτων, τα οποία επιτρέπουν την λειτουργία δύο ξεχωριστών αιθουσών. Στις δύο αίθουσες, μία μεγάλη 354 θέσεων, όγκου 5070m³, και μία μικρή με 262 διαθέσιμες θέσεις και όγκο 3504m³, προβλέπεται εξώστης με περιορισμένες θέσεις. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τρεις δυνατές διαμορφώσεις αιθουσών (Σχ. 2.1). Για την ανάπτυξη των βοηθητικών χρήσεων χρησιμοποιείται ο χώρος κάτω από τους θεατές.



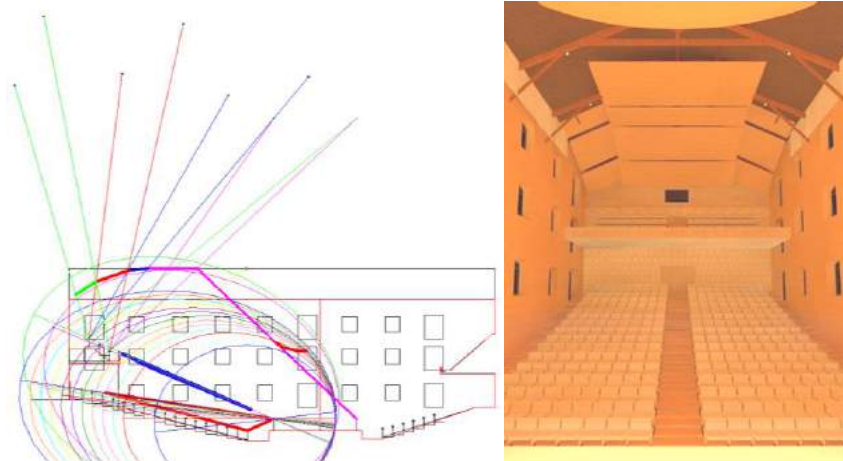
Σχ. 0.1. Κάτοψη και τομή της διάταξης κεντρικού χώρου θεατών και εξώστη.

2.3 Ακουστικός σχεδιασμός

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 2.2) παρουσιάζεται η χάραξη των ανακλαστήρων της μεγάλης αίθουσας, όπως προέκυψε από τον γεωμετρικό σχεδιασμό με την μέθοδο των ειδώλων [11], και η φωτορεαλιστική απεικόνιση των ανακλαστήρων.

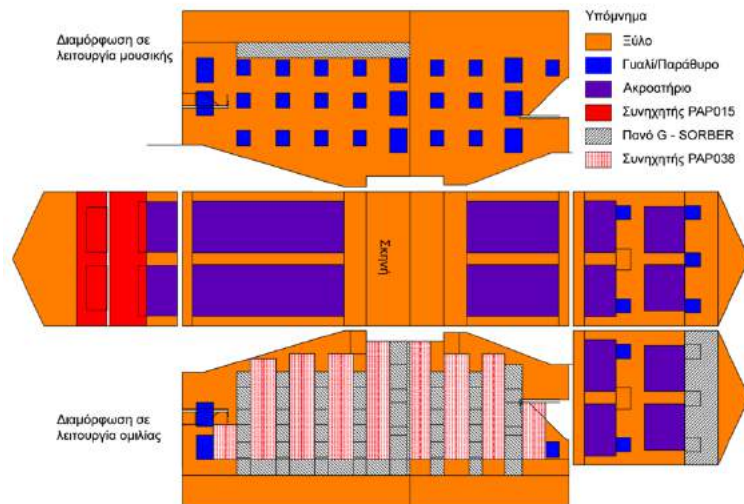
Οι τρεις διαμορφώσεις της αίθουσας (μεγάλη, μικρή και ενιαία) ελέγχονται με στατιστικές ενεργειακές μεθόδους για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης στις δύο ακουστικές τους λειτουργίες, μουσική και ομιλία. Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για κάθε μία από τις λειτουργίες υπολογίζεται με βάση το πρότυπο DIN 18041 [10]. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η μεταβολή του χρόνου αντήχησης θα επιτευχθεί με την

μεταβολή της ηχοαπορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών. Λόγω της ύπαρξης των ανακλαστήρων αλλά και της απαίτησης προστασίας και διατήρησης της στέγης και της μορφολογίας του κελύφους, δεν είναι δυνατή η μεταβολή των επιφανειών της οροφής, ενώ τα ανοίγματα του κελύφους παραμένουν διάφανα και δεν μπορούν να καλυφθούν με μόνιμες κατασκευές.



Σχ. 0.2. Αριστερά: Σχεδιασμός ανακλαστικών επιφανειών. Δεξιά: Φωτορεαλιστική απεικόνιση των ανακλαστήρων της μεγάλης αίθουσας.

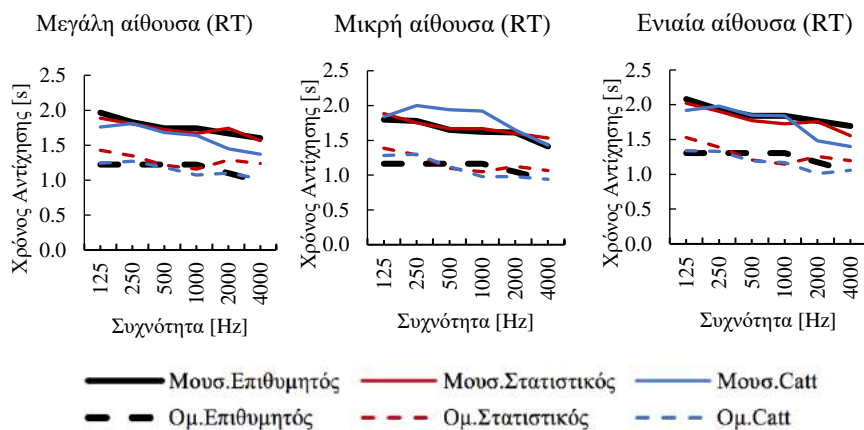
Στις παρακάτω εικόνες (Σχ. 2.3 και 2.4) παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ενιαίας αίθουσας και οι χρόνοι αντήχησης για όλες τις επιμέρους διαμορφώσεις και λειτουργίες.



Σχ. 0.3. Διάταξη μεταβαλλόμενων επιφανειών για την επίτευξη μεταβλητής ηχοαπορρόφησης.

Με βάση το καθορισμένο πεδίο των επεμβάσεων και μέσω επαναληπτικού σχεδιασμού καθορίστηκαν οι κατάλληλες επιφάνειες για την τοποθέτηση των ηχοαπορροφητικών και συνηχητών. Τα επιλεγθέντα ηχοαπορροφητικά κυκλοφορούν στο εμπόριο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα. Στον τοίχο πίσω από το κοινό της μεγάλης αίθουσας τοποθετείται σταθερός συνηχητής για όλες τις λειτουργίες. Στους πλευρικούς τοίχους ενδιάμεσα από τα ανοίγματα τοποθετούνται στο δευτερεύον εσωτερικό κέλυφος αποκαλυπτόμενοι συνηχητές με περιστροφή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα για την λειτουργία της ομιλίας. Επίσης τοποθετούνται πανό, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν κατακόρυφα μπροστά από τις στήλες των ανοιγμάτων για τη λειτουργία της ομιλίας.

Από τα διαγράμματα του χρόνου αντήχησης (Σχ. 2.4) φαίνεται ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αποδεκτές για την περίπτωση αιθουσών shoebox, είναι όμως προφανές ότι η ακουστική προσομοίωση παρέχει πρόσθετες πληροφορίες μέσω των οποίων μπορεί να γίνει η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού σε επίπεδο οριστικής μελέτης. Η υποεκτίμηση του χρόνου αντήχησης από την στατιστική μέθοδο ενδέχεται να οφείλεται σε παραμένουσες ανακλάσεις στο πεδίο της οροφής [13].



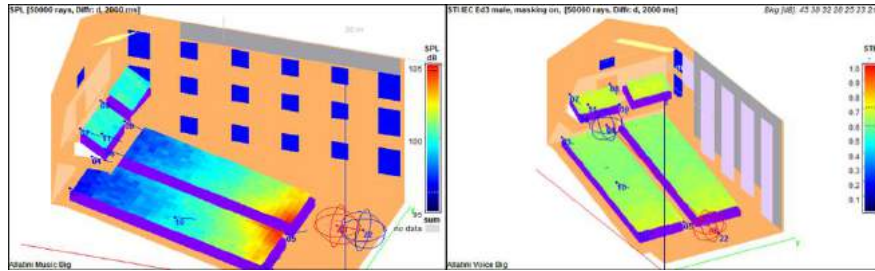
Σχ. 0.4. Χρόνος αντήχησης για κάθε μια από τις τρεις διαμορφώσεις και για τις δύο λειτουργίες μουσικής (Μουσ.) και ομιλίας (Ομ.).

3. Επικύρωση σχεδιασμού

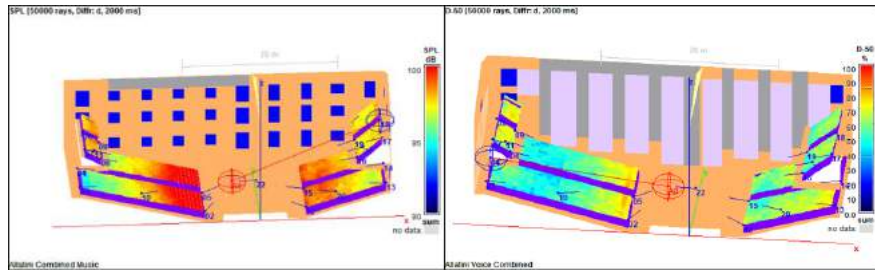
Για την επικύρωση του σχεδιασμού εκτελέστηκαν συνολικά έξι προσομοιώσεις για τις τρεις αίθουσες (μικρή, μεγάλη και ενιαία) και για τις δύο χρήσεις (μουσική και ομιλία). Σε όλες τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε η επίλυση με 50.000 ακουστικές ακτίνες με τον πρώτο αλγόριθμο για κλειστούς χώρους, ενώ λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της διάχυσης μέσω της εφαρμογής του αλγορίθμου τόσο για τις επιφάνειες όσο και για τις ακμές των ανακλαστικών επιφανειών. Στην περίπτωση της χρήσης μουσικής τοποθετείται μία παντοκατευθυντική πηγή που εκπέμπει λευκό θόρυβο 100 dB στο 1m από την πηγή. Στην περίπτωση της χρήσης ομιλίας τοποθετείται μια πηγή που εκπέμπει σήμα ομιλίας σύμφωνα με την βιβλιοθήκη πηγών του προγράμματος.

Από τις προσομοιώσεις υπολογίζονται μεταξύ άλλων, η στάθμη του ήχου, η ακουστική απολαβή (G), η ευκρίνεια C50 και C80, η διακρίσιμότητα D50, ο δείκτης καταληπτότητας ομιλίας STI και ο χρόνος αντήχησης.

Ενδεικτικά, στα Σχήματα 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις. Από το διάγραμμα της στάθμης SPL στον εξώστη της μεγάλης αίθουσας φαίνεται η ευεργετική ιδιότητα του σχεδιασμού πολλαπλών ανακλαστικών επιφανειών στην οροφή προς αυτόν.



Σχ. 0.5. Διαχωρισμός αίθουσας: Αριστερά η στάθμη SPL για μουσική, δεξιά ο δείκτης STI για ομιλία.



Σχ. 0.6. Ενοποιημένη αίθουσα: Αριστερά η στάθμη SPL για μουσική, δεξιά η D50 για ομιλία.

4. Συμπεράσματα

Ο στατιστικός – γεωμετρικός σχεδιασμός μπορεί να προσεγγίσει με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα των αναλυτικών προσομοιώσεων, όσον αφορά στον χρόνο αντήχησης ως μέση ποσότητα του χώρου. Αν και ο γεωμετρικός σχεδιασμός με την μέθοδο των ειδώλων είναι χωρικός σχεδιασμός, κατανέμοντας τον ήχο στους ακροατές στο κατάλληλο χρονικό διάστημα, απαιτείται η όσο το δυνατό μεγαλύτερη προσαρμογή του κελύφους, ώστε να διαθέτει ανακλαστικές επιφάνειες για να κατευθύνει την πλειοψηφία των ανακλάσεων. Για την επιτυχημένη εφαρμογή είναι σημαντικός ο έλεγχος του όγκου, ώστε να προκύπτουν οι μέγιστες δυνατές ωφέλιμες ανακλαστικές επιφάνειες, με το σύνολο των υπόλοιπων επιφανειών να φιλοξενεί τα ηχοαπορροφητικά υλικά.

Η εφαρμογή της μεθόδου σε ένα υφιστάμενο κτίριο με αρχιτεκτονικούς περιορισμούς, όπως το εξεταζόμενο διατηρητέο, και παράλληλα η απαίτηση επίτευξης μεταβλητής ακουστικής συμπεριφοράς χωρίς ηλεκτρακουστική ενίσχυση παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις, τόσο στον αρχιτεκτονικό όσο και στον ακουστικό σχεδιασμό. Σε αυτή την περίπτωση ο ακουστικός μηχανικός οφείλει να εμπλακεί στον σχεδιασμό από το στάδιο της προμελέτης, καθώς οι κύριες σχεδιαστικές επιλογές πρέπει να λαμβάνονται από κοινού με τον αρχιτέκτονα.

Η σύγχρονη απαίτηση για πολυμορφικές αίθουσες που υποτάσσονται στις εκάστοτε ανάγκες του κοινού και της χρήσης μπορεί να ικανοποιηθεί με την

μετατροπή υφιστάμενων κελυφών, συμβάλλοντας στην αναβάθμιση υποβαθμισμένων αρχιτεκτονικών συνόλων. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ο συνδυασμός διάταξης έκκεντρης αρένας και κουτιού παπουτσιών, ώστε να αντιμετωπιστεί το συνήθως μεγάλο μήκος των βιομηχανικών αιθουσών, αλλά και να δημιουργηθεί η δυνατότητα επιμερισμού της αίθουσας με περιορισμένο κόστος και κατασκευαστικές παρεμβάσεις. Σε αυτό συμβάλει και η επιλογή μεταβολής της ακουστικής μέσω των επιφανειών και όχι του όγκου της αίθουσας, γεγονός που περιορίζει τις απαιτήσεις μηχανολογικών εγκαταστάσεων.

Η ύπαρξη δίρριχτης στέγης που εστιάζει τις ανακλάσεις της οροφής στο ακροατήριο είναι μεν ευεργετική αλλά όχι ικανή από μόνη της να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εξαιτίας αυτού κρίθηκε απαραίτητος ο σχεδιασμός αναρτημένων ανακλαστών που κατευθύνουν τον ήχο πιο στοχευμένα. Επανεπιβεβαιώθηκε η δυσκολία ακουστικού σχεδιασμού κάτω από εξώστες, ιδιαίτερα όταν δεν είναι επιτρεπτή η κατασκευή κεκλιμένων πλευρικών ανακλαστών προς ενίσχυση των πλευρικών ανακλάσεων, λόγω της απαίτησης διατήρησης της μορφολογίας του κελύφους.

5. Αναφορές

- [1] M. Cairolì, «Architectural customized design for variable acoustics in a Multipurpose Auditorium», *Appl. Acoust.* **140**, pp 167–177 (2018)
- [2] Κ. Γεωργιάδης-Φίλικας, «Μετατροπή υφιστάμενου κτιριακού κελύφους σε αίθουσα μεταβλητής ακουστικής», *Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο*, (2017)
- [3] Π. Μακρίδης, Α. Τομπάζης, «Αποκατάσταση και επανάχρηση της βιομηχανικής κληρονομιάς. Η μετατροπή του βιομηχανικού συγκροτήματος Αλλατίνη σε συγκρότημα κατοικιών», in: *Ήπιες Επεμβάσεις Για Την Προστασία Των Ιστορικών Κατασκευών*, IANOS, Θεσσαλονίκη Σελίδες 181–190 (2009).
- [4] Β. Κολωνάς, Λ. Παπαμαθθαίου, *Ο αρχιτέκτονας Vitaliano Poselli*, 2η έκδοση, Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, 1980.
- [5] Ελληνική Κυβέρνηση, ΦΕΚ1001/Β/1991 Χαρακτηρισμός ως ιστορικών διατηρητέων μνημείων κτιρίων του Βιομηχανικού Συγκροτήματος ΑΛΛΑΤΙΝΗ στην Θεσσαλονίκη μαζί με τον περιβάλλοντα χώρο τους, (1991). www.et.gr.
- [6] Ελληνική Κυβέρνηση, ΦΕΚ 610/Β/2001 Βιομηχανικό Συγκρότημα “ΜΥΛΟΙ ΑΛΛΑΤΙΝΗ” στη Θεσσαλονίκη, (2001). www.et.gr.
- [7] Ν. Τσινίκας, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, 2η έκδοση, Univesrity Studio Press, Θεσσαλονίκη, (2005).
- [8] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Second Edi, Spon Press, Abingdon, (2010).
- [9] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier Academic Press, New York, 2006.
- [10] Φ. Κοντομίχος, Θ. Ζαρούχας, Π. Χατζηαντωνίου, *Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 2013.
- [11] Ν. Τσινίκας, «Ακουστικός σχεδιασμός ανακλαστών σε αίθουσες ακροατηρίου», in: *Ακουστική 2016*, Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής, Πειραιάς, 2016.
- [12] CATT, CATT-Acoustic, <http://www.catt.se/> (accessed October 30, 2015).
- [13] M. Barron, S. Kissner, «A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music» *Appl. Acoust.* **115** 42–49 (2017)

Ακουστική Βελτίωση Βιβλιοθήκης: Εφαρμογή για το Πολυτεχνείο Κρήτης

Νικόλαος Μ. Παπαδάκης, Επιστημονικός Συνεργάτης
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ρέθυμνο, Τ.Κ.74100, Κρήτη
nikrapadakis@isc.tuc.gr

Κωνσταντίνος-Αλκέτας Ουγγρίνης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Τ.Κ.73100, Κρήτη
kougrinis@isc.tuc.gr

Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης, Καθηγητής
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Τ.Κ.73100, Κρήτη
gestavr@dpem.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χρήσεις των ακαδημαϊκών βιβλιοθηκών τα τελευταία χρόνια έχουν διευρυνθεί προσαρμοζόμενες στις αλλαγές της τεχνολογίας και της κοινωνίας, γεγονός το οποίο δημιουργεί διαφορετικές ακουστικές απαιτήσεις οι οποίες συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία του σχεδιασμού τους. Η μελέτη αυτή διεξάγεται με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής του υφιστάμενου χώρου της βιβλιοθήκης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στον χώρο της βιβλιοθήκης έγιναν μετρήσεις κρουστικής απόκρισης σε τρία διαφορετικά επίπεδα και σε ένα άθροισμα έξι σημείων. Στην συνέχεια έγινε εξαγωγή του χρόνου αντίληψης. Στα ίδια σημεία έγινε καταγραφή ηχοστάθμης στο πεδίο του χρόνου με καταγραφή των κυριότερων πηγών θορύβου (βήματα, ομιλία κ.α.).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων δύο θεωρούνται τα σημαντικότερα προβλήματα των οποίων η λύση είναι πρώτης προτεραιότητας για την βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης: η μεταβαλλόμενη ηχοστάθμη και ο μεγάλος χρόνος αντίληψης. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών προτείνονται διάφορες λύσεις εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι: διαχωρισμός των χώρων σε ζώνες με τοποθέτηση κατάλληλων κουφωμάτων και η τοποθέτηση απορροφητικών στοιχείων.

Συμπερασματικά οι λύσεις οι οποίες προτείνονται για την βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης του Πολυτεχνείου Κρήτης και υφιστάμενων βιβλιοθηκών περιλαμβάνουν ένα πλαίσιο ακουστικών και μη παρεμβάσεων για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος.

Library Acoustics Improvement: Case Study for the Technical University of Crete

ABSTRACT

The use of academic libraries has expanded in recent years to adapt to changes in technology and society. Hence, different acoustic requirements are necessary which are often not taken into account in the design process. This study is carried out with the aim of improving the acoustics of the existing library of the Technical University of Crete.

In the library area, impulse response measurements were performed at three different levels and at a sum of six measurement points. Reverberation time was then calculated. Sound levels were recorded in the time domain as well with the main sources of noise (steps, speech etc.).

From the results of the measurements two are considered the most important problems whose solution is a priority for the improvement of the library acoustics: the fluctuating sound levels and the high reverberation time. To address these problems, several solutions are proposed, the most important of which are: segregation of spaces into zones with the fitting of suitable frames and the placement of absorbent materials.

In conclusion, the solutions proposed for the improvement of acoustics of the library of the Technical University of Crete and existing libraries include a framework of acoustic and non-interventions to achieve the best possible result.

Εισαγωγή

Μια ακαδημαϊκή βιβλιοθήκη είναι η βιβλιοθήκη των ιδρυμάτων της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης η οποία εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο τους φοιτητές και το διδακτικό προσωπικό των πανεπιστημίων και άλλων ιδρυμάτων της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης και υποστηρίζει το διδακτικό και ερευνητικό έργο που διεξάγεται σε αυτά [1]. Οι χρήσεις των βιβλιοθηκών τα τελευταία χρόνια έχουν επεκταθεί πέραν των παραδοσιακών τους λειτουργιών και συνεχίζουν να διευρύνονται. Εκτός από την λειτουργία της παροχής πρόσβασης σε γραπτή πληροφόρηση, περιλαμβάνουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, οπτικοακουστικές παρουσιάσεις, συναντήσεις και συνεργασίες ομάδων αλλά και κοινωνικοποίηση των φοιτητών [2].

Το γεγονός αυτό δημιουργεί διαφορετικές ακουστικές απαιτήσεις οι οποίες συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία του σχεδιασμού, όταν και είναι ευκολότερο να επιτευχθούν. Συχνά ο σχεδιασμός των βιβλιοθηκών αποτελείται από ένα ενιαίο χώρο ή χώρους που συνδέονται γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολη τη διαχείριση του θορύβου στο εσωτερικό τους [3]. Τα πιο συχνά ακουστικά προβλήματα που προκύπτουν είναι ο θόρυβος από εξωτερικούς ή εσωτερικούς ήχους, η μεγάλη αντήχηση και έλλειψη ιδιωτικότητας ομιλίας [4].

Η μελέτη αυτή διεξάγεται με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής του υφιστάμενου χώρου της βιβλιοθήκης στο Πολυτεχνείο Κρήτης, μετά από συνεχόμενα παράπονα όχλησης των χρηστών της. Οι προτάσεις για την επίτευξη των παραπάνω συνδυάζουν ένα σύνολο ακουστικών και μη παρεμβάσεων.

Το κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα για την μελέτη. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες λύσεις για την βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα συμπεράσματά της έρευνας εξάγονται στο τελευταίο κεφάλαιο.

1. Μετρήσεις - Αποτελέσματα

Η βιβλιοθήκη του Πολυτεχνείου Κρήτης βρίσκεται στο χώρο της Πολυτεχνειούπολης στα Χανιά. Η θέση της απέχει από σημαντικές πηγές ήχου (π.χ. δρόμους) με αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα θορύβου βάθους στον εξωτερικό της χώρο. Αποτελείται από τρία διαφορετικά επίπεδα με συνολικό εμβαδό 1480 m² στα οποία συνυπάρχουν θέσεις μελέτης των φοιτητών και βιβλιοθήκες.

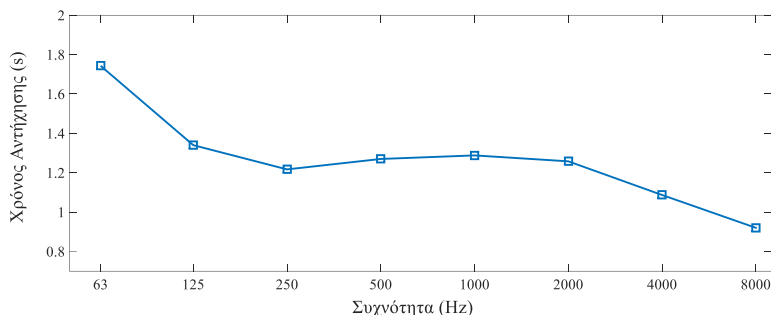
Για την εξακρίβωση του προβλήματος της ακουστικής της βιβλιοθήκης, έγιναν μετρήσεις κρουστικής απόκρισης με χρήση δωδεκαεδρικού ηχείου και παντοκατευθυντικού μικροφώνου. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Exponential Sine Sweep σε τρία διαφορετικά επίπεδα και σε ένα άθροισμα έξι σημείων. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε εξαιτίας του χαμηλού θορύβου βάθους στο εσωτερικό της βιβλιοθήκης [5]. Στην συνέχεια από τις κρουστικές αποκρίσεις έγινε εξαγωγή των χρόνων αντήχησης στις θέσεις μέτρησης.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον χρόνο αντήχησης σε οκταβικές μπάντες για τα τρία διαφορετικά επίπεδα και τις έξι διαφορετικές θέσεις. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος αντήχησης της βιβλιοθήκης για όλα τα επίπεδα. Στο σχήμα 2.2. παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος αντήχησης ανά επίπεδο.

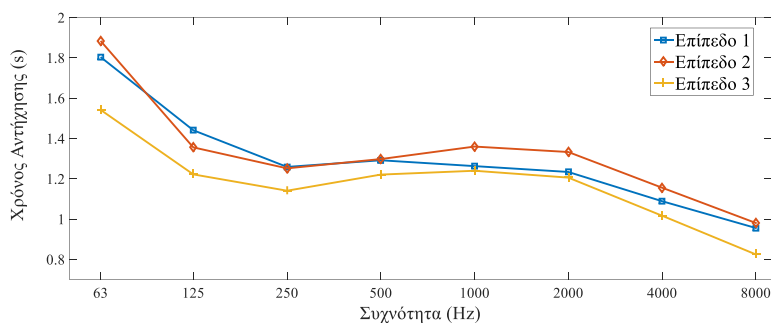
Πίνακας 2.1 Χρόνος αντήχησης σε οκταβικές μπάντες για τα τρία διαφορετικά επίπεδα (E1,E2,E3) και σε δυο διαφορετικές θέσεις ανά επίπεδο(Θ1,Θ2)

Συχνότητα (Hz)	Χρόνος Αντήχησης (s)					
	E1Θ1	E1Θ2	E2Θ1	E2Θ2	E3Θ1	E3Θ2
63	1.633	1.975	1.830	1.938	1.523	1.561
125	1.276	1.606	1.351	1.360	1.381	1.063
250	1.246	1.271	1.210	1.293	1.145	1.137
500	1.238	1.346	1.292	1.303	1.238	1.203
1000	1.185	1.340	1.362	1.358	1.250	1.230
2000	1.130	1.338	1.358	1.308	1.250	1.161
4000	1.053	1.125	1.138	1.173	1.007	1.027
8000	0.958	0.953	1.008	0.953	0.758	0.892

Στα ίδια σημεία έγινε καταγραφή θορύβου βάθους. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι μέσες στάθμες θορύβου σε οκταβικές μπάντες. Στη συνέχεια έγινε παρατήρηση και καταγραφή ηχοστάθμης στο πεδίο του χρόνου σε διάφορες συνθήκες, όπως περπατήματος (σε ξύλινο και μαρμάρινο πάτωμα, στη σκάλα), συνομιλίας φοιτητών κ.α. Μεγάλες μεταβολές στην ηχοστάθμη (έως και 15 dB) και με μεγάλη συχνότητα παρουσιάστηκαν σε μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 2.21 Μέσος χρόνος αντίληψης της βιβλιοθήκης



Σχήμα 2.22 Μέσος χρόνος αντίληψης της βιβλιοθήκης ανά επίπεδο για τα τρία διαφορετικά επίπεδα

Πίνακας 2.2 Μέσες στάθμες θορύβου βάθους της βιβλιοθήκης

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
L_{eq} (dB)	42.3	40.1	37.6	37.1	37.4	34.2	33.9	31.2

Τέλος έγινε παρατήρηση και συλλογή δεδομένων με σκοπό την εύρεση των τάσεων χρήσης της βιβλιοθήκης από τους φοιτητές ανά όροφο και περιοχές (ατομική μελέτη, ομαδική μελέτη, πρόσβαση στο διαδίκτυο κ.α.) [6]. Παρατηρήθηκε ότι κάθε επίπεδο της βιβλιοθήκης χρησιμοποιείται για όλους του προαναφερθέντες λόγους.

2. Συζήτηση-Λύσεις

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων δύο θεωρούνται τα σημαντικότερα προβλήματα των οποίων η λύση είναι προτεραιότητα για την βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης: η μεταβαλλόμενη ηχοστάθμη [7] και ο μεγάλος χρόνος αντίληψης. Οι πιο σημαντικοί λόγοι πρόκλησης των μεταβολών, σε συμφωνία με αντίστοιχες έρευνες [8], είναι ο θόρυβος από την ανθρώπινη συνομιλία και ο θόρυβος από βήματα κυρίως στο ξύλινο πάτωμα. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο μεταβαλλόμενος

θόρυβος μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη όχληση από ένα συνεχή θόρυβο [9]. Επίσης η κατασκευή του κτιρίου επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ ορόφων, κάτι το οποίο δυσκολεύει τον περιορισμό της ηχοστάθμης και των μεταβολών της. Παράλληλα αυτό συντελεί στον μεγάλο χρόνο αντήχησης κάτι το οποίο επιδεινώνει το πρόβλημα.

Οι λύσεις οι οποίες προτείνονται για την βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης, με σειρά προτεραιότητας, είναι οι εξής:

- Διαχωρισμός των χώρων σε διαφορετικές ζώνες με τοποθέτηση κατάλληλων κουφωμάτων: χρήση 2^{ου}, 3^{ου} επιπέδου σε χώρο προσωπικής μελέτης, χρήση ισογείου σε χώρο ομαδικής μελέτης. Ο απλούστερος και πιο αποτελεσματικός τρόπος περιορισμού του θορύβου από τις συνομιλίες είναι ο διαχωρισμός των χώρων χρήσης σε ζώνες [4, 10]. Η προτεινόμενη αυτή λύση θα περιορίσει τις μεταβολές στην ηχοστάθμη, ενώ θα μειώσει τον χρόνο αντήχησης σε κάθε ζώνη.
- Τοποθέτηση προσωπικών κουβουκλίων μελέτης στην περιοχή προσωπικής μελέτης. Προτείνεται η απομάκρυνση των κοινών τραπεζιών μελέτης αφού αυτό προάγει την κοινωνικοποίηση των φοιτητών και αυξάνει τα επίπεδα θορύβου [11]. Προσωπικά κουβούκλια μελέτης μπορούν να τοποθετηθούν και κατά μήκος της περιμέτρου για διασπορά του ήχου [3].
- Τοποθέτηση απορροφητικών στοιχείων σε κατάλληλες θέσεις για την μείωση του χρόνου αντήχησης στους χώρους προσωπικής μελέτης και ομαδικών συναθροίσεων.
- Χρήση μοκέτας ή ελαστικού τάπητα στους χώρους προσωπικής μελέτης και ομαδικών συναθροίσεων, ειδικά στις θέσεις όπου υπάρχει ξύλινο πάτωμα, για τον περιορισμό του θορύβου από τα βήματα [3].
- Τοποθέτηση πινακίδων που αναγράφουν ησυχία στους χώρους προσωπικής μελέτης, αφού αυτό έχει δείξει ότι έχει θετικό αποτέλεσμα στα επίπεδα θορύβου [12].
- Πρόσβαση σε παροχή ρεύματος στα προσωπικά κουβούκλια μελέτης διότι απουσία της έχει βρεθεί ότι περιορίζει την χρήση τους [3]. Η πρόσβαση σε ρεύμα διευκολύνει την χρήση προσωπικών υπολογιστών.
- Χρήση μοκέτας και απορροφητικών υλικών στον χώρο υποδοχής όπου η ομιλία είναι αναπόφευκτη [4].
- Χρήση ηλεκτρολογίων και ποντικών χαμηλού θορύβου για τους υπολογιστές που παρέχουν πρόσβαση στο internet.

2. Συμπεράσματα

Η βελτίωση της ακουστικής της βιβλιοθήκης του Πολυτεχνείου Κρήτης περιλαμβάνει μείωση των διαταραχών και των επιπέδων θορύβου σε περιοχές όπου η συγκέντρωση και η ήρεμη περισυλλογή απαιτούνται, με παράλληλη βελτίωση των ακουστικών συνθηκών για την αποτελεσματική επικοινωνία και την συνεργασία σε περιοχές όπου χρειάζεται. Οι προτάσεις για την επίτευξη των παραπάνω συνδυάζουν ακουστικές και μη παρεμβάσεις κατάλληλες για την χρήση κάθε περιοχής.

3. Αναφορές

- [1] Γ.Δ. Μπώκος *Εισαγωγή στην Επιστήμη της Πληροφόρησης* Παπασωτηρίου Αθήνα (2001).
- [2] S. Larsen «From Reference Area to Learning Common–Modernising University Library Space» *Bibliothek Forschung und Praxis* **34**(3), pp. 337-341 (2010).
- [3] J.E. Franks, D.C. Asher «Noise management in twenty-first century libraries: case studies of four US academic institutions» *New Review of Academic Librarianship* **20**(3), pp. 320-331 (2014).
- [4] D. Wrightson, J.M. Wrightson «Acoustical considerations in planning and design of library facilities» *Library hi tech* **17**(4), pp. 349-357 (1999).
- [5] S. Antoniadou, N.M. Papadakis, G.E. Stavroulakis «Measuring Acoustic Parameters with ESS and MLS: Effect of Artificially Varying Background Noises» *in Conference Proceedings of Euronoise 2018*. Heraclion, Crete, Greece (2018).
- [6] S.J. Bell «Stop having fun and start being quiet: noise management in the academic library» *Library Issues* **28**(4), pp. 1 (2008)
- [7] B. Markham «Acoustic comfort in libraries» *in Conference Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON 2004*. Institute of Noise Control Engineering (2004)
- [8] P. Rajagopalan, H.T.H. Nguyen, A. Carre «Acoustic performance of contemporary public libraries: an evaluation of public libraries in Melbourne, Australia» *Architectural Science Review* **60**(2), pp. 104-115 (2017).
- [9] A. Kjellberg «The effects of nonphysical noise characteristics, ongoing task and noise sensitivity on annoyance and distraction due to noise at work» *Journal of Environmental Psychology* **16**(2), pp. 123-136 (1996).
- [10] C. McCaffrey, M. Breen «Quiet in the Library: An Evidence-Based Approach to Improving the Student Experience» *Libraries and the Academy* **16**(4), pp. 775-791 (2016).
- [11] M.A. Crumpton, M.A. «Sounding off about noise» *Community & Junior College Libraries* **13**(4), pp. 93-103 (2007).
- [12] N. Abbasi, N. «Library spaces designed with students in mind: an evaluation study of University of Queensland libraries at St Lucia campus» *in Conference Proceedings of IATUL 2014*, (2014).

**Ο ρόλος του συμβούλου ακουστικής - Προβληματισμοί
και εμπειρίες από την ακουστική μελέτη και την
κατασκευή του Κέντρου Πολιτιστικού του Ιδρύματος
Σταύρος Νιάρχος**

Θεόδωρος Τιμαγένης
Αρχιτέκτων Μηχανικός – ΕΜΠ, MSc Un of London
Ιωάννης Τιμαγένης
MSc Architectural and Environmental Acoustics,
Dip Arch (RIBA 2), Ba (Hons) Architecture (RIBA 1)

Σύμβουλοι ακουστικής της κατασκευαστικής
κοινοπραξίας του έργου

Κ. Παλαιολόγου 5, Πειραιάς τηλ. 210 4119545
www.timagenis-acoustics.com,
ttimagenis@hol.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Κέντρο Πολιτιστικό Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος, λειτουργεί ήδη από το 2017, και αποτελεί ένα πολυδύναμο συγκρότημα, που στεγάζει την Εθνική Λυρική σκηνή και την Εθνική Βιβλιοθήκη. Ταυτόχρονα στον περιβάλλοντα χώρο έχει δημιουργηθεί μεγάλο πάρκο, το οποίο είναι ανοιχτό στο κοινό. Το συγκρότημα διαθέτει επίσης εκτεταμένους στεγασμένους χώρους στάθμευσης.

Το κτίριο της Λυρικής Σκηνής εκτός από την κεντρική αίθουσα της όπερας, διαθέτει και μικρότερη πειραματική αίθουσα πολλαπλών χρήσεων καθώς και εξειδικευμένες αίθουσες δοκιμών, ορχήστρας, χορωδίας, μπαλέτου, ατομικής εξάσκησης μουσικών κ.α'.

Κατά την διάρκεια της κατασκευής οι αυστηρές προδιαγραφές του συγκροτήματος, ιδιαίτερα δε όσον αφορά την ποιότητα του ήχου εντός των διαφόρων χώρων, την ηχομόνωση μεταξύ αυτών και την υψηλή ηχοπροστασία από εξωτερικούς θορύβους και θορύβους Η/Μ εγκαταστάσεων, σε συνδυασμό με το ασφυκτικό χρονοδιάγραμμα κατασκευής, καθιστούσαν το έργο όλων των εμπλεκόμενων ιδιαίτερα πολύπλοκο και υπεύθυνο.

Στην παρούσα εργασία, με αφορμή το ανωτέρω έργο περιγράφεται εν συντομία ο ρόλος του συμβούλου ακουστικής στην σύνταξη και ορθή εφαρμογή της ακουστικής μελέτης ενός μεγάλου έργου και παράλληλα γίνονται σχετικές αναφορές από την εμπειρία των συγγραφέων, οι οποίοι συμμετείχαν στην μελέτη και κατασκευή του έργου ως σύμβουλοι ακουστικής της κατασκευαστικής κοινοπραξίας, η οποία ανέλαβε το έργο του ΚΠΙΣΝ.

Λέξεις κλειδιά: Ακουστική, Ηχομόνωση, Ηχοπροστασία, Σύμβουλος Ακουστικής

ABSTRACT

The Stavros Niarchos Foundation Cultural Center has already opened since 2017 and acts a multidisciplinary landmark that accommodates the Greek National opera and the Greek National Library. This majestic complex resides in an ecological natural landscape hosting at the same time an extensive closed parking area.

Along with the main performance hall the SNFCC holds a second smaller multipurpose hall (experimental stage), rehearsal rooms for the choir, the orchestra as well as ballet rooms and numerous individual warm up rooms for the musicians.

During its design and construction the top notch specs infused in all the building's parts, required the continuous, meticulous and responsible contribution of every single person involved in the project. Adding to the above the challenging time scheduling, the implementation of the acoustic design guidelines consisted of very demanding tasks the throughout the entire duration of the project.

The present paper is discussing the role of the Acoustic Consultant in projects of such scale and function using examples from the personal experience of the authors who acted as the executive acoustic consultants of the project from conception to completion.

Key Words: *Acoustics, Sound insulation, Soundproofing, Acoustics Consultant*

Εισαγωγή

Η συνεργασία μας ως συμβούλων ακουστικής στο έργο αρχίζει από το 2012 οπότε το γραφείο μας ανέλαβε την καταγραφή της υπάρχουσας «ακουστικής» κατάστασης στην περιοχή του γηπέδου στο οποίο θα ανεγείρετο το συγκρότημα του ΚΠΙΣΝ.

Την εποχή εκείνη, διενεργήθησαν εκτεταμένες ηχομετρήσεις του κυκλοφοριακού θορύβου. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των ηχομετρήσεων παρεδόθησαν μαζί με συγκεκριμένες προτάσεις, που αφορούσαν στην χωροθέτηση των κτιρίων μέσα στο οικόπεδο.

Με την παράδοση της ανωτέρω μελέτης ολοκληρώθηκε σε εκείνη την φάση η συνεργασία του γραφείου μας με το ΚΠΙΣΝ. Όπως φάνηκε εκ των υστέρων από τα μέτρα ηχοπροστασίας που ελήφθησαν τα πορίσματα της ακουστικής αποτύπωσης και της μελέτης για την μελλοντική ακουστική κατάσταση του χώρου, ελήφθησαν σοβαρά υπ' όψη, όμως δεν αξιοποιήθηκαν σωστά, από αρχιτεκτονική άποψη καθώς τα μέτρα που ελήφθησαν αφορούσαν κυρίως στο εξωτερικό κέλυφος, και πολύ λίγο στην διάταξη του κτιρίου μέσα στον χώρο.

Αυτό είναι ενδεχομένως και ένας λόγος ένεκα του οποίου, τελικά τα κτήρια λίγη σχέση έχουν με το Φαληρικό θαλάσσιο μέτωπο, ένα από τα καλύτερα της Ευρώπης.

1. Αντικείμενο του συμβούλου ακουστικής

Η κατασκευή του έργου (με πολύ αυστηρές προδιαγραφές σε όλους τους τομείς) αναλήφθηκε μετά από διαγωνισμό από την Κ/Ξ Impregilo S.A. – ΤΕΡΝΑ Α.Ε.

Στο γραφείο μας, ανατέθηκαν τα καθήκοντα του συμβούλου ακουστικής, της Κ/Ξ για ολόκληρο το συγκρότημα (όπερα, εθνική βιβλιοθήκη, χώροι στάθμευσης, βοηθητικό κτήριο). Η ανάθεση έγινε μετά από κλειστό διεθνή διαγωνισμό, στον οποίο

κύριο κριτήριο ήταν η εμπειρία του γραφείου σε ανάλογα έργα και δευτερευόντως το ύψος της αμοιβής.

Εν συντομία το έργο του συμβούλου ακουστικής που αναλυτικά περιγράφεται στα σχετικά συμφωνητικά ήταν το ακόλουθο:

α- Έλεγχος όλων των αρχιτεκτονικών σχεδίων προκειμένου να εντοπισθούν λύσεις που βλάπτουν την ακουστική και προτάσεις για τυχόν απαιτούμενες τροποποιήσεις.

β- Μελέτη νέων κατασκευαστικών λεπτομερειών και ολοκλήρωση υπάρχουσών λεπτομερειών (επιλογή υλικών, υπολογισμοί, εξειδίκευση γενικών λεπτομερειών)

Οι ανωτέρω υποχρεώσεις (α) και (β) προέκυπταν από το γεγονός ότι η κοινοπραξία ήταν υπεύθυνη για το τελικό αποτέλεσμα όσον αφορά στην ικανοποίηση όλων των ακουστικών προδιαγραφών του έργου. Επομένως όφειλε να ελέγξει πλήρως τα αρχιτεκτονικά σχέδια (αν είναι συμβατά και με τα επιθυμητά ακουστικά αποτελέσματα) δεδομένου ότι στα συμβατικά τεύχη δεν περιλαμβανόταν (ούτε και ποτέ παραδόθηκε) τεύχος ακουστικής μελέτης, αλλά μόνον τεύχη προδιαγραφών.

Ως εκ τούτου έπρεπε να ελεγχθεί από τα αρχιτεκτονικά σχέδια η ακουστική και η ηχομόνωση όλων των χώρων και ιδιαίτερα των ειδικών χώρων καθώς και όλες οι αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, οι οποίες θα έπρεπε να συμπληρωθούν ή να διορθωθούν αναλόγως ώστε να ικανοποιούν τις ακουστικές απαιτήσεις του έργου.

γ- Μελέτη (υπολογισμοί – κατασκευαστικές λεπτομέρειες) ηχοπροστασίας των κτηρίων, του περιβάλλοντος χώρου από τον θόρυβο του συνόλου των Η/Μ εγκαταστάσεων ⁽¹⁾ (δικτύων κλιματισμού, μηχανισμών σκηνής, αντικραδασμικής προστασίας των κτηρίων από δονήσεις μηχανημάτων, σωληνώσεων, διελύσεων, ικανοποίησης προδιαγραφών του ΠΔ 1180/81).

δ- Καταγραφή – πρόβλεψη θορύβων παραγομένων από τις εργασίες κατασκευής και προτάσεις μέτρων για τον περιορισμό των θορύβων αυτών σύμφωνα με τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής μελέτης.

ε- Επίβλεψη κατά την διάρκεια της κατασκευής ώστε να επιβεβαιωθεί ότι το έργο μετά το πέρας αυτού θα ικανοποιεί τις ακουστικές απαιτήσεις. Στην υποχρέωση αυτή περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η «ακουστική» συμβολή στη προετοιμασία των δοκιμαστικών κατασκευών (mock-ups) ο (ακουστικός) εργαστηριακός έλεγχος ειδικών κατασκευών στο εργαστήριο ηχοτεχνίας (ακουστικής έρευνας) του ΕΜΠ ή άλλων εργαστηρίων του εξωτερικού και οι δοκιμαστικές ηχομετρήσεις επί τόπου του έργου.

στ- Ηχομετρήσεις ακουστικής – ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας μετά το πέρας της κατασκευής (παράδοση του έργου).

Προκειμένου η Κ/Ξ να αντεπεξέλθει στα άκαμπτα χρονοδιαγράμματα του έργου και στις ιδιαίτερα υψηλές απαιτήσεις αυτού, δημιούργησε εντός του εργοταξίου γραφείο υποστήριξης του έργου αποτελούμενο από δεκάδες μηχανικούς διαφόρων ειδικοτήτων.

Στα καθήκοντα του συμβούλου ακουστικής, περιλαμβανόταν η συνεχής παροχή επί τόπου οδηγιών σχεδίων και τεχνικών εκθέσεων προκειμένου οι μελέτες του ανωτέρω γραφείου να ικανοποιούν και τις ακουστικές απαιτήσεις, δεδομένου ότι

⁽¹⁾ Στις υποχρεώσεις της κατασκευαστικής Κ/Ξ περιλαμβανόταν και ο έλεγχος όλων των μελετών καθώς και η εξ ολοκλήρου σύνταξη της μελέτης ηχοπροστασίας από τους θορύβους των Η/Μ εγκαταστάσεων (δεδομένου ότι δεν υπήρχε τέτοια μελέτη)

σχεδόν το σύνολο των σχεδίων για όλους τους χώρους του συγκροτήματος, έπρεπε να τροφοδοτείται και να ελέγχεται με πληροφορίες που αφορούσαν την ακουστική. Είναι ευνόητο ότι στο συγκεκριμένο έργο (περισσότερο από άλλα έργα στα οποία απαιτείται συμμετοχή συμβούλου ακουστικής) η πίεση, και λόγω του χρονοδιαγράμματος, ήταν ιδιαίτερα υψηλή.

2. Υπάρχει η δυνατότητα παρέμβασης του συμβούλου ακουστικής στον σχεδιασμό ενός μεγάλου έργου και ιδιαίτερα στο έργο του ΠΚΙΣΝ;

Συχνά τίθεται το ερώτημα, κατά πόσον υπάρχει «η δυνατότητα παρεμβάσεων του συμβούλου ακουστικής σε ουσιαστικά, ζητήματα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού» [1]

Η απάντηση στο πιο πάνω ερώτημα είναι ασφαλώς θετική, όμως υπό ορισμένες προϋποθέσεις όπως π.χ. ότι ο σύμβουλος ακουστικής είναι σε θέση να αποδείξει ότι οι επεμβάσεις είναι αναγκαίες, ότι μπορεί να αναλάβει την ευθύνη αυτών των αλλαγών και κυρίως να προτείνει λύσεις αποδεκτές από τους υπόλοιπους συντελεστές του έργου και **κυρίως υλοποιήσιμες**. Διαφορετικά, είναι πολύ φυσικό απλές επισημάνσεις «λαθών» χωρίς αιτιολόγηση και συγκεκριμένες προτάσεις να μην πείθουν τους υπόλοιπους συντελεστές και τον κύριο του έργου.

Στο υπό συζήτηση συγκρότημα του ΠΚΙΣΝ, οι υποχρεώσεις του συμβούλου ακουστικής περιελάμβαναν μεταξύ άλλων και την υποβολή προτάσεων για αναγκαίες τροποποιήσεις. Τέτοιες προτάσεις, όπου απαιτείτο, ετέθησαν κατά την διάρκεια του έργου, πολλές δε από αυτές έγιναν αποδεκτές.

Εν τούτοις, θα πρέπει να είναι κατανοητό, ότι ένας σύμβουλος (οποιασδήποτε ειδικότητας) που επιλέγεται να συμμετάσχει στην κατασκευή ενός έργου αναλαμβάνει όλη την ευθύνη για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτού, εντός του καθορισμένου χρονοδιαγράμματος και προϋπολογισμού και πρέπει να έχει την σύνεση να μη προτείνει αλλαγές της μελέτης αν η μελέτη δεν έχει λάθη. Δεν είναι λογικό αλλά ούτε επιστημονικό να υποβάλλονται από τον σύμβουλο προτάσεις για τροποποιήσεις, μόνο και μόνον για να «βάλει και την δική του σφραγίδα» στο έργο ή να επιμένει για αλλαγές προκειμένου να αποδείξει ότι «υπάρχουν και διαφορετικές ή και (δήθεν) απλούστερες λύσεις». Η υποβολή τέτοιου είδους προτάσεων δείχνει πολλές φορές ότι ο σύμβουλος που αναλαμβάνει την μελέτη εφαρμογής δεν κατανοεί την αρχική μελέτη ή δεν μπορεί να την ερμηνεύσει σωστά και ότι ενδεχομένως είναι ανεπαρκής για το έργο.

Δυστυχώς, φαινόμενα όπως το ανωτέρω ευδοκούν στην χώρα μας, εμφανίστηκαν δε και στο συγκεκριμένο έργο από αναρμόδιους, οι οποίοι αυτοπροτάθηκαν να προσφέρουν υπηρεσίες στην επίβλεψη του έργου. Τέτοιες παρεμβάσεις αντιμετωπίζονται και πάλι με επαρκείς **επιστημονικές και τεκμηριωμένες** προτάσεις του συμβούλου.

Στο συγκεκριμένο έργο και κατά την εξέταση της ακουστικής απόδοσης όλων των ειδικών αιθουσών δεν παρουσιάστηκαν σφάλματα που θα μπορούσαν να δημιουργήσουν αποκλίσεις από τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Επομένως δεν θα ήταν λογικό ούτε συνεπές με βάση τις ανωτέρω αρχές να προταθούν αλλαγές για την τοπική διόρθωση π.χ. της διάχυσης του ήχου μέσα στην κύρια αίθουσα (PH1) κατά 2-3 dB πολύ δε περισσότερο όταν είναι γνωστό ότι η μελέτη της ακουστικής μιας αίθουσας, εξαρτάται ιδιαίτερα από την στατιστική συμπεριφορά του ήχου και

επομένως τέτοιες αποκλίσεις και αντιστοίχως «διορθώσεις» είναι άνευ πρακτικής σημασίας.

Κατά τα άλλα στο συγκεκριμένο έργο έγινε πληθώρα προτάσεων για τροποποιήσεις, οι οποίες έγιναν αποδεκτές.

Οι τροποποιήσεις αυτές, αφορούσαν κυρίως τα ακουστικά υλικά, την μάζα των υλικών, τις εσωτερικές επενδύσεις των χώρων καθώς και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, προκειμένου να καταστεί αποτελεσματική η εφαρμογή τους στο συγκεκριμένο έργο.

Συνοπτικά:

α- Όλες οι μελέτες που αφορούσαν στην ηχοπροστασία των εγκαταστάσεων (κτιριακών και θεατρικών) έγιναν αποδεκτές (εγκρίθηκαν με χαρακτηρισμό Α)⁽²⁾. Οι μελέτες αυτές ήταν εξ ολοκλήρου νέες μελέτες που δεν περιλαμβάνονται στα τεύχη του έργου. Ειδικότερα τα μέτρα ηχοπροστασίας από τους θορύβους των μηχανισμών της σκηνης, αποτελούσαν πρωτότυπες λύσεις, με τις οποίες επετεύχθησαν στάθμες θορύβου πολύ χαμηλότερες από ότι σε αντίστοιχες πολύ γνωστές σύγχρονες όπερες.

β- Όλες οι προτάσεις τροποποίησης, κατασκευαστικών λεπτομερειών έγιναν αποδεκτές

γ- Μια πρόταση διόρθωσης κατασκευαστικής λεπτομέρειας έγινε δεκτή αλλά τροποποιημένη (δηλ. όχι ακριβώς όπως υπεβλήθη από τον σύμβουλο ακουστικής)

3. Ο ρόλος του Συμβούλου ακουστικής σε ένα έργο

Σχετικά με τον «ευρύτερο ρόλο του συμβούλου ακουστικής, πέρα από το συγκεκριμένο έργο» – προβληματισμό χρήσιμο – που ετέθη από την επιτροπή κριτών [1], δημιουργούνται γενικά ορισμένα ερωτήματα [2] αρχών και επιλογών, που πρέπει να αντιμετωπίσει ο επαγγελματίας ακουστικός, αν θέλει η συμβολή του να είναι πράγματι αποτελεσματική. Ποιόν δηλαδή πρόκειται να εξυπηρετήσει. Τον αρχιτέκτονα που πιθανόν τον έχει επιλέξει και τον πληρώνει; Τον ιδιοκτήτη, που επίσης μπορεί να τον έχει επιλέξει και που πληρώνει τον λογαριασμό. Ή, μακροπρόθεσμα, τις χιλιάδες των χρηστών του έργου, που μπορεί να είναι οι θεατές

και οι καλλιτέχνες που θα περάσουν από κάποιο θέατρο ή οι εργαζόμενοι και οι περίοικοι ενός εργοστασίου κ.α

Ασφαλώς, κάθε υπεύθυνος μηχανικός θα πρέπει να διαλέξει το τρίτο, δηλαδή να εξυπηρετήσει το κοινωνικό σύνολο. Μια τέτοια επιλογή όμως είναι πολύ πιθανόν ότι θα φέρει αντιμετώπιση με τον κύριο του έργου για οικονομικούς λόγους αλλά και με άλλους από τους μελετητές του έργου, πιθανότερα δε με τον αρχιτέκτονα.

Κατά τον Paul S. Veneklasen [3] «η σύγκρουση μεταξύ αρχιτέκτονα και ακουστικού φαίνεται να αποτελεί μόνιμο φαινόμενο». Ο Veneklasen αποδίδει αυτή τη σύγκρουση σε διάφορους λόγους. Πρώτον «υπάρχει συνήθως μια ουσιαστική διαφορά στην παιδεία και το υπόβαθρο τους. Ο αρχιτέκτων αν και μηχανικός, συνήθως έχει θα λέγαμε καλλιτεχνική κατεύθυνση. **Αλλά και ο ακουστικός πρέπει να έχει υποδομή μηχανικού.** Ο ακουστικός κατά τη συμμετοχή του σε ένα έργο

⁽²⁾ A: Μελέτη αποδεκτή χωρίς παρατηρήσεις

B: Μελέτη αποδεκτή με παρατηρήσεις. Πρέπει να υποβληθεί ξανά διορθωμένη

C: Μελέτη απορριπτέα

συνήθως είναι προσηλωμένος σχεδόν με παρωπίδες σε έναν και μόνο σκοπό. Ο αρχιτέκτων πρέπει να συνδυάσει όλες τις λειτουργικές απαιτήσεις ενός κτιρίου που φαίνονται τελείως διαφορετικές μεταξύ τους. Ο αρχιτέκτων σπάνια έχει προηγούμενη εμπειρία από θέατρο. Πολλές φορές ο αρχιτέκτων θεωρεί ότι ένα έργο είναι ευκαιρία για να συνθέσει ένα έργο ζωής. Παρόμοιες, βέβαια, προθέσεις μπορεί να έχει και ο ακουστικός. Ο αρχιτέκτων θεωρεί ότι είναι αυτός που πρέπει να πάρει την τελική απόφαση μεταξύ των υπόλοιπων μελών της μελετητικής ομάδας. Κάθε επιμέρους μελετητής αισθάνεται υπεύθυνος όσον αφορά την επιτυχία του έργου, αλλά κυρίως όσον αφορά τη δική του καλή φήμη και το μέλλον».

Δεν θα είχαμε κανέναν λόγο να μη συμφωνήσουμε με τα όσα ο Αμερικανός ακουστικός παρατηρεί. Θα είχαμε όμως να προσθέσουμε και τη δική μας εμπειρία από τον Ελληνικό χώρο, που βέβαια παρουσιάζει ανάλογα προβλήματα, δηλ. πολλοί αρχιτέκτονες δεν έχουν συνήθως προηγούμενη πείρα από αίθουσες ακροατηρίου, αλλά επίσης δεν έχουν και προηγούμενη πείρα συνεργασίας με ακουστικό ή τουλάχιστον με ένα σωστό ακουστικό. Από την άλλη πλευρά, φαίνεται ότι οι ακουστικοί πολλές φορές παρουσιάζουν τους εαυτούς τους σαν μάγους, με υπερφυσικές ικανότητες, που από «καθέδρας» δίνουν κατευθύνσεις ανεξήγητες και λύσεις μοναδικές, παραβλέποντας ή και αγνοώντας ότι ο αρχιτέκτων γνωρίζει πάρα πολύ καλά τη λειτουργία, την κατασκευή, το κόστος και τα προβλήματα ενός κτιρίου, που πολλές φορές πολλοί ακουστικοί, χωρίς υπόβαθρο μηχανικού, αγνοούν τελείως, πράγμα που πολλές φορές δημιουργεί λανθασμένες απόψεις σχετικά με τον ρόλο, την αναγκαιότητα και την αξία ακουστικού και της ακουστικής μελέτης σε ένα έργο.

Αν εξαιρέσουμε τις περιπτώσεις όπου μια μελέτη είναι αρκετά προχωρημένη και με βασικά ακουστικά λάθη, σύγκρουση μεταξύ αρχιτέκτονα και ακουστικού θα δημιουργηθεί μόνον όταν ο αρχιτέκτων θεωρήσει ότι θίγονται οι υπόλοιπες λειτουργίες και η αισθητική του κτιρίου από τον ακουστικό που θα προσπαθήσει να επιβάλει δικές του διαφορετικές λύσεις, ενώ, αντίθετα, θα έπρεπε να προσαρμοστεί εκείνος στην αρχιτεκτονική σύνθεση.

4. Συμπέρασμα

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο ακουστικός είναι υποχρεωμένος να προχωρήσει όσο πιο πολύ γίνεται στη διερεύνηση των παράλληλων απαιτήσεων της ακουστικής και της αρχιτεκτονικής μελέτης για να δώσει στον αρχιτέκτονα έγκαιρα την μεγαλύτερη δυνατή ελευθερία να αναπτύξει το έργο του και λειτουργικά και αισθητικά, ώστε να μην του επιβάλει λύσεις τυποποιημένες.

Θα πρέπει επίσης να γνωρίζει, πώς να τροποποιήσει τις δικές τους προτάσεις, ώστε να ικανοποιήσει άλλες απαιτήσεις του έργου, αν αυτές τείνουν να συγκρουστούν με τις απαιτήσεις της ακουστικής μελέτης, αλλά επίσης θα πρέπει να **γνωρίζει τα όρια, η υπέρβαση των οποίων θα είχε ως αποτέλεσμα μη αποδεκτή ακουστική η ποιότητα του έργου.**

Γι' αυτόν τον λόγο, είναι ανάγκη να γνωρίζει ο ακουστικός με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται όλες τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές παραμέτρους ενός τεχνικού έργου. Και βέβαια, κάτι τέτοιο μπορεί να συμβαίνει μόνον όταν αυτός προέρχεται από τον χώρο των μηχανικών και μάλιστα εκείνων με υπόβαθρο που έχει ως κύριο αντικείμενο τις κτιριακές κατασκευές.

Ένας ακουστικός θα πρέπει να θεωρεί ότι η συμβολή του σε ένα έργο είναι επιτυχημένη όταν – και μόνο τότε – και οι υπόλοιποι συντελεστές του έργου είναι

απόλυτα ικανοποιημένοι από το αποτέλεσμα. Η συμβολή του αυτή είναι αξιόλογη μόνον όταν είναι σε θέση να δικαιολογήσει επιστημονικά τις προτάσεις του και να εξασφαλίσει λεπτομερειακά κατασκευαστικά σχέδια για όλους τους χώρους που έχει αρμοδιότητα.

5 Αναφορές

[1] Σχόλια της κριτικής επιτροπής των ανακοινώσεων (περιλήψεων) του Συνεδρίου:

«Η ανακοίνωση γίνεται αποδεκτή.

Θα ήταν ενδιαφέρον να δοθούν αναφορές στο τελικό κείμενο, όσον αφορά τη δυνατότητα παρεμβάσεων (ελέγχου, διόρθωσης, βελτίωσης) του συμβούλου ακουστικής, σε ουσιαστικά ζητήματα του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, όσον αφορά τη μορφή και τα λειτουργικά στοιχεία στις αίθουσες ειδικών απαιτήσεων.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο, αναφορικά με την πρωτοτυπία και την καθολικότητα των συμπερασμάτων της ανακοίνωσης, να αναδειχθεί ο ευρύτερος ρόλος ενός συμβούλου ακουστικής πέρα από τη συγκεκριμένη περίπτωση ενός «case study» για το Πολιτιστικό Κέντρο του ιδρύματος Σταύρος Νιάρχος»

[2] Θεόδωρος Ι. Τιμαγένης, «Αρχιτεκτονική και Ακουστική. Συνεργασία ή συνύπαρξη;» Αρχιτεκτονικά θέματα 22/1988 σ. 80

[3] Paul S. Veneklasen «Design Considerations from the View point of the Professional Consultant» Auditorium Acoustics edited by Robin Mockenzie Applied Science publishers Ltd – London 1975



Μελέτη ακουστικής συμπεριφοράς κλειστών χώρων με όρους στατιστικής ανάλυσης ακουστικών μετρήσεων

Ελένη Μπλαζουδάκη

Νικόλας-Αλέξανδρος Τάτλας, Στέλιος Μ. Ποτηράκης,

ΠΜΣ Ακουστικός Σχεδιασμός και
Ψηφιακός Ήχος
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
eleni@deltanet.gr

Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Πανεπιστημιούπολη 2, Θηβών 250, 12244, Αιγάλεω
{ntatlas, spoti}@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με την εκτίμηση του χρόνου ανάμειξης από την κρουστική απόκριση ενός κλειστού χώρου, με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης σήματος. Οι μέθοδοι που μελετώνται βασίζονται στην χρονική εξέλιξη των στατιστικών μέτρων της κανονικοποιημένης κύρτωσης, της πληροφορίας Fisher και των εντροπιών Shannon και Tsallis. Η ακρίβεια εκτίμησής τους αξιολογείται και οι συνθήκες αξιοπιστίας εφαρμογής τους συζητώνται στη βάση της ανάλυσης διαφορετικών κρουστικών αποκρίσεων και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους με αυτά που παράγουν μαθηματικά μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

Study of the acoustic behavior of rooms in terms of statistical analysis of acoustic measurements

ABSTRACT

The specific work deals with the estimation of the mixing time based on room impulse response measurements, using statistical analysis methods. The studied methods are based on the temporal evolution of the statistical measures of normalized kurtosis, Fisher information, Shannon entropy and Tsallis entropy. Their estimation accuracy is evaluated and the conditions for their reliable application are discussed on the basis of the analysis of different room impulse responses and the comparison of their results with those produced by mathematical models suggested by the literature.

Εισαγωγή

Ο ανακλώμενος ήχος εντός κλειστού χώρου συνήθως υποδιαιρείται σε πρώιμες και καθυστερημένες ανακλάσεις. Μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος από την εκπομπή ήχου ορισμένης διάρκειας η πυκνότητα των υπερτιθέμενων ανακλάσεων είναι πολύ υψηλή, ενώ παράλληλα η ενέργειά τους λόγω πολλαπλής ανάκλασης στις επιφάνειες του χώρου είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα οι επιμέρους ανακλάσεις να μην είναι δυνατό να διακριθούν. Να σημειωθεί ότι κάποιες φορές είναι επιθυμητό να περιοριστεί το μήκος της κρουστικής απόκρισης

ενός κλειστού χώρου έτσι ώστε να περιέχει μόνο τις πρώιμες ανακλάσεις. Έτσι, για παράδειγμα, διευκολύνεται ο υπολογισμός της απόκρισης του χώρου σε διάφορα σήματα (μικρότερο μήκος συνέλιξης) χωρίς την απώλεια των αντιληπτών πληροφοριών που αποτυπώνονται στις πρώιμες ανακλάσεις.

Αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον προσδιορισμό του μεταβατικού χρόνου μεταξύ των πρώιμων και των καθυστερημένων ανακλάσεων, που είναι γνωστός ως *χρόνος ανάμειξης (mixing time, t_m)* και πρακτικά καθορίζει τη στιγμή μετά την οποία ξεκινά η στοχαστική «ουρά» διάχυτης αντήχησης σε μια κρουστική απόκριση κλειστού χώρου. Σύμφωνα με τον Blesser [1] ο χρόνος ανάμειξης ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να μην υπάρχει πλέον «μνήμη» της αρχικής κατάστασης του συστήματος. Προσπάθεια των περισσότερων ερευνητών που ασχολούνται με το αντικείμενο, είναι να ποσοτικοποιήσουν το χρονικό όριο μεταξύ των πρώιμων και των καθυστερημένων ανακλάσεων ξεκινώντας από το γεγονός ότι τα δύο είδη παρουσιάζουν διαφορετικές στατιστικές ιδιότητες.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εκτίμηση του χρόνου ανάμειξης, με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης της κρουστικής απόκρισης κλειστού χώρου, μεταξύ συγκεκριμένων θέσεων πηγής και δέκτη. Αξιολογείται η ακρίβεια και συζητώνται οι συνθήκες αξιοπιστίας εφαρμογής των μεθόδων αυτών, με την ανάλυση διαφορετικών κρουστικών αποκρίσεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που παράγουν μαθηματικά μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία.

1. Μοντέλα εκτίμησης του χρόνου ανάμειξης

Οι Lindau et al. [2] έχουν παρουσιάσει μια ανασκόπηση εργασιών διαφόρων ερευνητών οι οποίοι υπολογίζουν τον χρόνο ανάμειξης $(t_m)_V$ ενός κλειστού χώρου όγκου V , με τη βοήθεια του παρακάτω γενικού μαθηματικού μοντέλου

$$(t_m)_V = \sqrt{\frac{dN}{dt} \cdot \frac{V}{4\pi c^3}} \quad (1)$$

όπου dN/dt είναι η πυκνότητα ανακλάσεων με προτεινόμενες τιμές (άλλη από κάθε ερευνητή) μεταξύ 400 s^{-1} και 10.000 s^{-1} , c είναι η ταχύτητα του ήχου σε $[\text{m/s}]$ και V ο όγκος του δωματίου σε $[\text{m}^3]$, ενώ το $(t_m)_V$ υπολογίζεται σε $[\text{ms}]$.

Με γνωστό τον όγκο ενός δωματίου και με αντικατάσταση στην Εξίσωση (1) των διαφόρων προτεινόμενων τιμών του dN/dt προκύπτουν αντίστοιχες εκτιμήσεις για τον υπολογισμό του χρόνου ανάμειξης οι οποίες μπορούν να χρησιμεύσουν ως μέτρο σύγκρισης για τις εκτιμήσεις που προκύπτουν με τη χρήση άλλων μεθόδων, όπως τις μεθόδους στατιστικής ανάλυσης σημάτων κρουστικής απόκρισης που αποτελούν το κύριο αντικείμενο αυτής της εργασίας.

2. Μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης σημάτων κρουστικής απόκρισης κλειστού χώρου

Οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης σημάτων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία βασίζονται αφενός στον υπολογισμό του περιγραφικού στατιστικού μέτρου της κύρτωσης [3], και αφετέρου τριών μέτρων πολυπλοκότητας, των εντροπιών Shannon και Tsallis καθώς και της πληροφορίας Fisher [4,5], σε συρόμενα χρονικά

«παράθυρα» συγκεκριμένης διάρκειας επί της κρουστικής απόκρισης κλειστού χώρου, οδηγώντας έτσι σε μια εκτίμηση της εξέλιξης των μέτρων αυτών στο χρόνο. Η μέθοδος της κύρτωσης έχει ήδη προταθεί για τον προσδιορισμό του χρόνου ανάμειξης [3] και ως χρόνος ανάμειξης θεωρείται η χρονική στιγμή ελαχιστοποίησής (μηδενισμού) της κανονικοποιημένης κύρτωσης, καθώς εξελίσσεται η κρουστική απόκριση.

Η πληροφορία Fisher [4,5] αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την διερεύνηση πολύπλοκων και μη στάσιμων σημάτων. Συμπεριφέρεται αντίστροφα από την εντροπία, δηλαδή αυξημένη τάξη (μειωμένη πολυπλοκότητα) χαρακτηρίζεται από αυξημένη πληροφορία Fisher και το αντίστροφο. Κατά τη χρονική εξέλιξη της πληροφορίας Fisher μιας κρουστικής απόκρισης κλειστού χώρου, η περίοδος πρώιμων ανακλάσεων χαρακτηρίζεται από μειωμένη πολυπλοκότητα (αυξημένη τάξη) και συνεπώς αυξημένη πληροφορία Fisher, ενώ καθώς κυριαρχούν οι καθυστερημένες ανακλάσεις η εικόνα αυτή αναστρέφεται και η πληροφορία Fisher ελαχιστοποιείται. Οι μέθοδοι που βασίζονται στον υπολογισμό των εντροπιών Shannon και Tsallis [4,5] λειτουργούν αντίστροφα από τις δύο προηγούμενες μεθόδους αφού η εντροπία μεγιστοποιείται όταν μεγιστοποιείται η πολυπλοκότητα (τυχαιότητα) και συνεπώς ελαχιστοποιείται η τάξη.

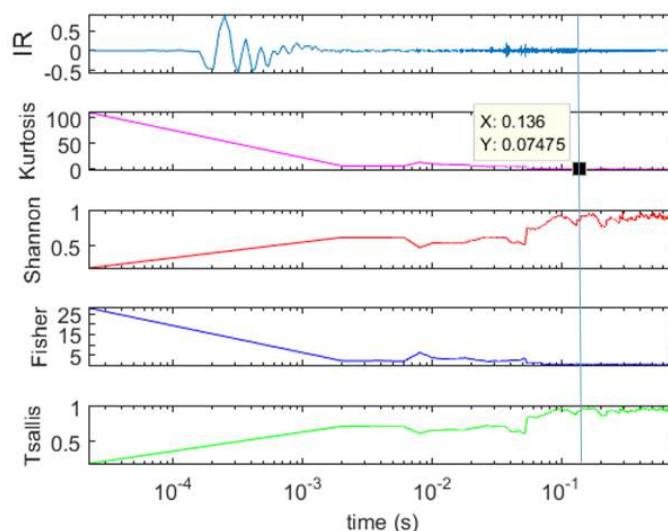
Με τις πιο πάνω τέσσερις μεθόδους είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο χρόνος ανάμειξης t_m κλειστού χώρου έχοντας διαθέσιμη μόνο την κρουστική απόκρισή του, χωρίς τη γνώση άλλων ακουστικών μετρήσεων και διαστάσεων του χώρου. Γνωρίζοντας την τιμή t_m και εφαρμόζοντας το τύπο $d_{t_m} = c \cdot t_m$ είναι επίσης δυνατό να υπολογιστεί μια «ισοδύναμη» διάσταση που αντιστοιχεί στο χρόνο ανάμειξης και θα καλούμε «διάσταση ανάμειξης», ώστε να έχουμε μια εκτίμηση για τη διανυθείσα από τον ήχο απόσταση που αντιστοιχεί στο χρόνο ανάμειξης (απόσταση διαδρομής της πιο καθυστερημένης διακριτής ανάκλασης). Όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου.

Στις επόμενες ενότητες οι πιο πάνω μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης σήματος εφαρμόζονται στις κρουστικές αποκρίσεις τριών διαφορετικών χώρων με γνωστό μόνον τον όγκο τους, καθώς και σε κρουστικές αποκρίσεις μιας αίθουσας συναυλιών που μετρήθηκαν σε διαφορετικά σημεία μέσα σ' αυτήν.

3. Εφαρμογή στατιστικών μεθόδων και πληροφορίας σε κρουστικές αποκρίσεις κλειστών χώρων διαφορετικού όγκου

Οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης σημάτων της Ενότητας 3 (κανονικοποιημένη κύρτωση, Fisher information, Shannon entropy και Tsallis entropy) αρχικά εφαρμόστηκαν σε τρία αρχεία ήχου που περιέχουν μετρημένες κρουστικές αποκρίσεις κλειστών χώρων διαφορετικού όγκου (10.000 m³, 1.870 m³ και 100 m³). Για διευκόλυνση στην μεταξύ τους σύγκριση, από τις μετρήσεις αυτές έχει αφαιρεθεί το αρχικό χρονικό διάστημα διάδοσης του σήματος από την πηγή στο δέκτη και είναι κανονικοποιημένες ως προς το πλάτος. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την επεξεργασία της εκάστοτε κρουστικής απόκρισης με τη βοήθεια ειδικού προγράμματος υπολογισμού που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό. Με επισκόπηση του αποτελέσματος οριοθετείται το σημείο καμπής. Το πρόγραμμα υπολογισμού που αναπτύχθηκε έχει την ευελιξία ορισμού σημείου έναρξης και σημείου λήξης, του προς επεξεργασία σήματος.

Σαν χαρακτηριστικό παράδειγμα των αποτελεσμάτων που υπολογίσαμε, στην Εικόνα 1 φαίνονται η κρουστική απόκριση του δωματίου με όγκο 10.000 m^3 καθώς και η αντίστοιχη εξέλιξη της κανονικοποιημένης κύρτωσης (Kurtosis), της πληροφορίας Fisher, της εντροπίας Shannon και της εντροπίας Tsallis. Από την Εικόνα 1 διαπιστώνουμε, για παράδειγμα, ότι οι μέθοδοι Kurtosis και Fisher ορίζουν ως χρόνο ανάμειξης τα σημεία $0,136 \text{ s}$ και $0,174 \text{ s}$ αντίστοιχα, ενώ παρατηρούμε ότι η πληροφορία Fisher παρουσιάζει απότομη διακύμανση σε σημεία μεμονωμένων συμβάντων σε σχέση με την μέθοδο Kurtosis (π.χ. στο σημείο $0,05002 \text{ s}$). Οι εκτιμηθέντες χρόνοι ανάμειξης για τους τρεις χώρους φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 1, όπου το $(t_m)_V$ συμβολίζει όρια των τιμών (ελάχιστη-μέγιστη) όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της Εξίσωσης (1).



Εικόνα 1. Αποτελέσματα όπως αυτά προκύπτουν μετά από την εφαρμογή μεθόδων στατιστικής και ανάλυσης στην κρουστική απόκριση του δωματίου με όγκο 10.000 m^3 .

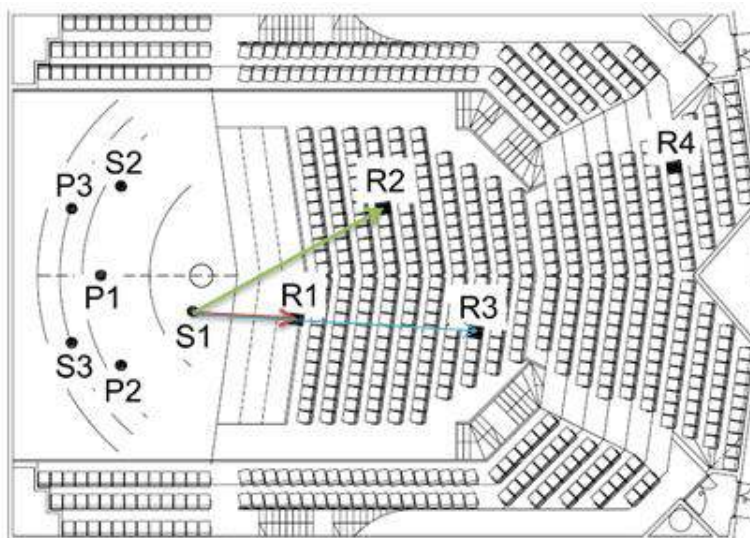
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1 φαίνεται ότι κάθε μέθοδος υπολογισμού δίνει κάπως διαφορετική εκτίμηση για το χρόνο ανάμειξης. Έτσι ο απόλυτος ορισμός του χρόνου ανάμειξης απαιτεί εμπειρία από τον ερευνητή, με συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων και των τεσσάρων μεθόδων που μελετήθηκαν. Με την επιφύλαξη ότι δεν υπάρχουν άλλες πληροφορίες για τα τρία δωμάτια που μελετήθηκαν (π.χ., RT60 ή άλλες πληροφορίες σχετικές με την ακουστική τους), διαπιστώνεται ότι μικρότερα σε όγκο δωμάτια δίνουν μικρότερους χρόνους ανάμειξης, σε σχέση με δωμάτια πολύ μεγάλου όγκου. Οι τιμές που εκτιμήθηκαν είναι γενικά στο εύρος των τιμών που προκύπτουν από τα μαθηματικά μοντέλα της Ενότητας 2. Με δεδομένο ότι τα μοντέλα αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη καμία άλλη παράμετρο του χώρου εκτός του όγκου, η εκτίμηση που προκύπτει από τη στατιστική επεξεργασία της κρουστικής απόκρισης θεωρείται ακριβέστερη.

Πίνακας 1 Αποτελέσματα τιμών του χρόνου ανάμειξης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του μεθόδων στατιστικής ανάλυσης

Χρόνος ανάμειξης (mixing time) (ms)	Δωμάτιο με όγκο 10.000 m ³	Δωμάτιο με όγκο 1870 m ³	Δωμάτιο με όγκο 100 m ³
$(t_m)_{Kurtosis}$	136	86	46
$(t_m)_{Shannon}$	220	148	68
$(t_m)_{Fisher}$	174	100	76
$(t_m)_{Tsallis}$	196	132	62
$(t_m)_v$	70-440	30,27 -190,27	7-44

4. Εφαρμογή μεθόδων στατιστικής ανάλυσης σε μετρούμενες κρουστικές αποκρίσεις σε σημεία του ίδιου κλειστού χώρου

Από τους Merimaa et al. [6] πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων στον χώρο του Consert Hall Promenadikeskus που βρίσκεται στην πόλη Porì της Φιλανδίας. Ο συγκεκριμένος χώρος έχει διαστάσεις (ΜxΠxΥ): (33x23x15) m και όγκο 9.300 m³. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν το διάστημα 2000-2002 με σκοπό όχι μόνο την εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών για την ακουστική του χώρου αλλά και την μέτρηση όσο γίνεται υψηλής ποιότητας κρουστικών αποκρίσεων. Οι μετρήσεις διατίθενται ελεύθερα στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/> και αποτελούν μέρος του project TAKU (Control of Closed Space Acoustics).



Εικόνα 2. Κάτοψη χώρου με εμφανή τα σημεία μέτρησης των κρουστικών αποκρίσεων καθώς και τις θέσεις των πηγών. <http://legacy.spa.aalto.fi/projects/poririrs/>

Στην έρευνα αυτή, τοποθετήθηκαν τρεις πηγές S1, S2 και S3 στο χώρο της σκηνής και ορίστηκαν τέσσερις θέσεις στο χώρο του κοινού R1, R2, R3 και R4. Στην Εικόνα 2 δίδεται η κάτοψη με την οριοθέτηση των σημείων που αναφέρθηκαν. Οι μελετώμενες μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης εφαρμόστηκαν σε επιλεγμένες κρουστικές αποκρίσεις της πιο πάνω έρευνας (αυτές που προέκυψαν για την πηγή στη θέση S1) μετά από αφαίρεση του αρχικού διαστήματος σιγής. Στον Πίνακα 2 δίνονται οι τιμές του χρόνου ανάμειξης που προέκυψαν από την ανάλυση με τις μελετώμενες μεθόδους.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα τιμών του χρόνου ανάμειξης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων στατιστικής ανάλυσης. (* αμφισβητούμενη εκτίμηση)

(t_m) (ms)	S1-R1	S1-R2	S1-R3	S1-R4
$(t_m)_{Kurtosis}$	96	80	76	70 *
$(t_m)_{Shannon}$	98	82,02	106	126
$(t_m)_{Fisher}$	112	78,02	78	68 *
$(t_m)_{Tsallis}$	96	82,02	106	126
$(t_m)_V$	67,50 - 424,32	67,50-424,32	67,50-424,32	67,50-424,32

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του χώρου και έχοντας μία εικόνα της θέσης των σημείων R1, R2, R3 και R4 που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις διαπιστώνεται ότι οι χρόνοι ανάμειξης όπως έχουν υπολογιστεί με χρήση των υπό μελέτη μεθόδων, συμβαδίζουν μεταξύ τους για τις δύο πρώτες θέσεις. Συγκεκριμένα οι τιμές των χρόνων ανάμειξης στην θέση R2 έχουν μειωθεί ελάχιστα (εκτός της πληροφορία Fisher που παρουσιάζει μεγάλη μείωση με την αντίστοιχη τιμή στην θέση R1). Στην θέση R3 οι μέθοδοι Tsallis και Shannon entropy παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές του χρόνου ανάμειξης, όπου συνεχίζουν την ανοδική πορεία και στην θέση R4 (0,126 s).

Σε ότι αφορά τη μέθοδο Kurtosis η τιμή του χρόνου ανάμειξης παρουσιάζει για την θέση R3 μικρή μείωση σε σχέση με την προηγούμενη θέση (R2). Για τις δύο τελευταίες θέσεις και κυρίως την R4 η Kurtosis και η πληροφορία Fisher παίρνουν τιμές αυξομειούμενες πολύ κοντά στο μηδέν, χωρίς όμως να μηδενίζονται. Γι' αυτό και αναφέρεται η εκτίμηση ως αμφισβητούμενη. Προκύπτει έτσι το ερώτημα εάν οι μέθοδοι Kurtosis και πληροφορίας Fisher μπορούν να αποδώσουν σωστά σε σημεία που υπάρχουν έντονες ανακλάσεις ή φαινόμενα σκίασης καθώς και σε σημεία κοντά σε όρια του χώρου ή άλλα εμπόδια.

Στον Πίνακα 3 έχει υπολογιστεί η απόσταση των σημείων μέτρησης από την πηγή (κατά προσέγγιση) με βάση τα δείγματα του αρχικού διαστήματος σιγής των κρουστικών αποκρίσεων και γνωρίζοντας την συχνότητα δειγματοληψίας (48 kHz). Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με το υπολογισμένο εύρος τιμών της διάστασης ανάμειξης διαπιστώνεται ότι όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή τόσο η διάσταση ανάμειξης τείνει προς την απόσταση πηγής-δέκτη. Το αποτέλεσμα αυτό παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί έχει άμεση φυσική ερμηνεία: η απόσταση πηγής-δέκτη δίνει την απόσταση που διανύει ο απ' ευθείας ήχος, ενώ η διάσταση ανάμειξης θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι εκφράζει την απόσταση που διανύουν οι διακριτές (πιθανότατα πρώτες) ανακλάσεις (ή τουλάχιστον τη διαδρομή της πιο καθυστερημένης από αυτές), ενώ όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή το μήκος της τεθλασμένης που ενώνει πηγή

και δέκτη και αντιστοιχεί σε διαδρομή πρώιμης(-μων) ανάκλασης(-σεων) τείνει στο μήκος της ευθείας που ενώνει τα δυο αυτά σημεία.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι οι μέθοδοι Tsallis και Shannon entropy ακολουθούν μονότονα αυτό τον κανόνα, ενώ οι μέθοδοι Kurtosis και πληροφορίας Fisher παύουν να τον ακολουθούν σε σχέση με τα σημεία R3 και R4, αλλά όπως ήδη αναφέρθηκε πιο πάνω οι τιμές του χρόνου ανάμειξης που εκτιμήθηκαν για τα συγκεκριμένα σημεία από τις δυο αυτές μεθόδους θεωρούνται αμφισβητήσιμες.

Πίνακας 3 Αποτελέσματα υπολογισμού της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και του εύρους της διάστασης ανάμειξης που αντιστοιχεί στα αποτελέσματα του Πίνακα 2.

Θέση δέκτη	R1	R2	R3	R4
Απόσταση πηγής – δέκτη (m)	3,930	8,575	11,433	21,43
Εύρος (dt_m) (m) (μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης)	32,93-38,42	26,76 -28,12	22,63-36,36	23,32-43,21
Εύρος (dt_m) _v (m) (μαθηματικά μοντέλα)	24,01-145,43	24,01-145,43	24,01-145,43	24,01-145,43

Διαπιστώνεται τέλος ότι οι εκτιμήσεις του χρόνου ανάμειξης που έγιναν με τις υπό μελέτη μεθόδους στατιστικής ανάλυσης των κρουστικών αποκρίσεων είναι εντός του εύρους των τιμών που υπολογίζονται με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων της Ενότητας 2. Σημειώνεται βέβαια ότι οι τιμές που προκύπτουν από τα μαθηματικά μοντέλα δεν αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα σημεία του χώρου, αλλά αναφέρονται γενικά στο χώρο.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εκτίμηση του χρόνου ανάμειξης με τη χρήση μεθόδων στατιστικής ανάλυσης σημάτων. Οι μέθοδοι που εξετάστηκαν βασίζονται στην χρονική εξέλιξη (με τη χρήση συρόμενων χρονικών παραθύρων) των στατιστικών μέτρων της κανονικοποιημένης κύρτωσης, της πληροφορίας Fisher και των εντροπιών Shannon και Tsallis της κρουστικής απόκρισης κλειστού χώρου μεταξύ συγκεκριμένων σημείων πηγής και δέκτη. Ιδιαιτερότητα των μεθόδων αυτών είναι ο υπολογισμός του χρόνου ανάμειξης χωρίς να ληφθεί υπόψη ο όγκος του κλειστού χώρου ή άλλα ακουστικά χαρακτηριστικά του, όπως η απορρόφηση και η εσωτερική διαμόρφωσή του.

Αρχικά οι μελετώμενες μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε κρουστικές αποκρίσεις τριών χώρων διαφορετικού όγκου, ενώ οι εκτιμήσεις που έδωσαν για το χρόνο ανάμειξης συγκρίθηκαν με αυτές που παράγουν μαθηματικά μοντέλα που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Διαπιστώθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ήταν ο όγκος του δωματίου τόσο μεγαλύτερος ήταν ο χρόνος ανάμειξης που εκτιμήθηκε από τη στατιστική επεξεργασία της κρουστικής απόκρισής του.

Στη συνέχεια οι υπό μελέτη μέθοδοι εφαρμόστηκαν σε κρουστικές αποκρίσεις μιας αίθουσας συναυλιών που μετρήθηκαν σε διαφορετικά σημεία μέσα σ' αυτήν, ενώ οι εκτιμήσεις αυτές επίσης συγκρίθηκαν με αυτές που παράγουν μαθηματικά μοντέλα. Η σχέση μεταξύ των εκτιμημένων τιμών του χρόνου ανάμειξης για τα διαφορετικά σημεία φαίνεται να είναι συμβατή με τη σχετική θέση των σημείων μέτρησης. Από τις αναλύσεις που έγιναν προκύπτει αμφισβήτηση για την αξιοπιστία των μεθόδων που βασίζονται στην κανονικοποιημένη κύρτωση και την πληροφορία Fisher.

Οι εκτιμήσεις του χρόνου ανάμειξης που έγιναν με τις υπό μελέτη μεθόδους στατιστικής ανάλυσης των κρουστικών αποκρίσεων διαπιστώθηκε ότι είναι εντός του εύρους των τιμών που υπολογίζονται με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων. Με δεδομένο όμως ότι τα μοντέλα αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη καμία άλλη παράμετρο του χώρου εκτός του όγκου, η εκτίμηση που προκύπτει από τη στατιστική επεξεργασία της κρουστικής απόκρισης θεωρείται ακριβέστερη.

Στα άμεσα σχέδιά μας είναι να επεκτείνουμε την παρούσα έρευνα μελετώντας σε μεγαλύτερο βάθος την αξιοπιστία και την ακρίβεια εκτίμησης του χρόνου ανάμειξης από τις συγκεκριμένες στατιστικές μεθόδους, με τη σχεδίαση ειδικού πειράματος για την απόκτηση μεγάλου αριθμού κρουστικών αποκρίσεων κλειστών χώρων διαφορετικών ακουστικών χαρακτηριστικών, καθώς και τη μελέτη των αποκρίσεων των περιορισμένου μήκους κρουστικών αποκρίσεων (έως του σημείου του χρόνου ανάμειξης) σε σήματα φωνής και μουσικής.

6. Αναφορές

[1] B. Blesser, "An interdisciplinary synthesis of reverberation viewpoints," JAES 49(10), pp. 867–903 (2001).

[2] Lindau, A., Kosanke, L., & Weinzierl, S. (2010). *Perceptual evaluation of physical predictors of the mixing time in binaural room impulse responses*. Audio Engineering Society Convention Paper Presented at the 128th Convention.

[3] R. Stewart, M Sandler, "Statistical measures of early reflections of room impulse responses," Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07), Bordeaux, France, September 10-15, 2007.

[4] Σ. Ποτηράκης, Ν.-Α. Τάτλας, "Ανάλυση ηχητικών σημάτων και συναρτήσεων μεταφοράς χώρων σε συνθήκες αντήχησης με όρους εντροπίας και πληροφορίας." Πρακτ. Ακουστική 2012, σελ. 153-160 (2012).

[5] Ν.-Α. Tatlas, S.M. Potirakis, S.A. Mitilineos, M. Rangoussi, "On the effect of compression on the complexity characteristics of wireless acoustic sensor network signals," Signal Processing 107, pp. 153–163 (2015).

[6] Merimaa, J., Peltonen, T., & Lokki, T. (2005). *Concert Hall Impulse Responses — Pori, Finland: Reference*.



ΧΟΡΗΓΟΙ



ΧΟΡΗΓΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ



Τηλεφωνικό κέντρο: 2610 432200 • e-mail: info@synedra.gr • url: www.synedra.gr