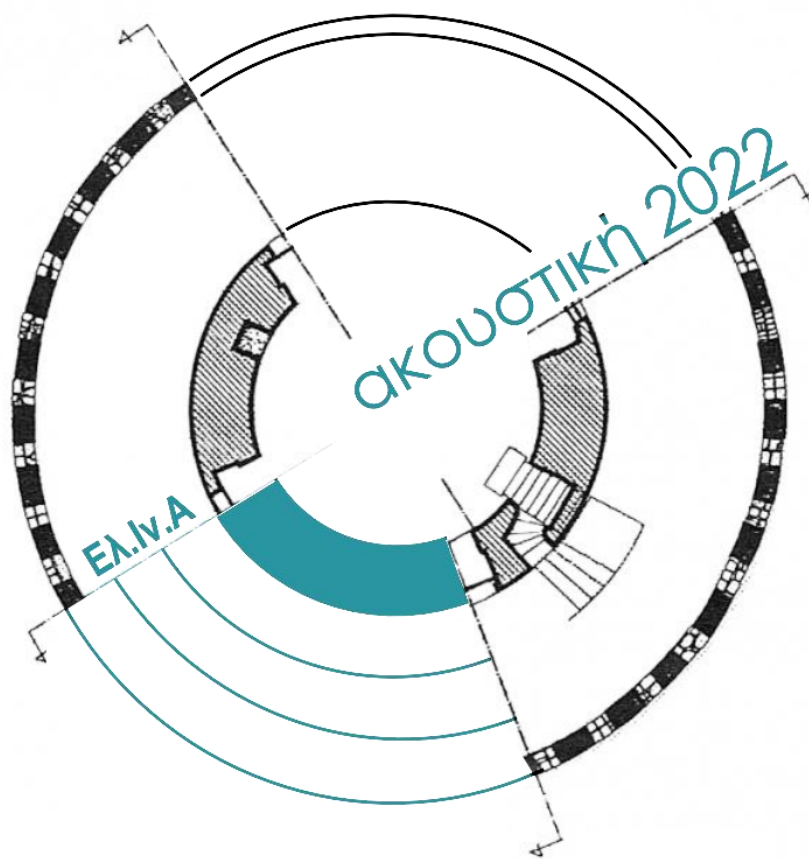


11<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο «Ακουστική 2022»

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

ακουστική 2022



Επιμέλεια Πρακτικών:

Ρήγας Κωτσάκης

Χαράλαμπος Δημούλας

Θεσσαλονίκη 2022, Ελλάδα

## **ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Πρόεδρος:** Δημούλας Α. Χαράλαμπος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Αντιπρόεδρος:** Καλλίρης Γεώργιος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Γ. Γραμματέας:** Παπαδέλης Γεώργιος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Ταμίας:** Σιδηρόπουλος Στάθης, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής Α.Π.Θ.

### **Μέλη:**

Παστιάδης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Συμεωνίδης Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Γούσιος Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ματσιώλα Μαρία, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Κωτσάκης Ρήγας, Επίκουρος Καθηγητής Δι.ΠΑ.Ε.

Χουρμουζιάδου Καλλιόπη, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός, ΣΕΠ ΕΑΠ

Σεβαστιάδης Χρήστος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π Α.Π.Θ.

Βρύσης Λάζαρος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π Α.Π.Θ.

Βρύζας Νικόλαος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής Α.Π.Θ.

Βασιλειάδης Βασίλειος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π Α.Π.Θ.

Σταματιάδου Μαρίνα - Ειρήνη, Υποψήφια Δρ. Α.Π.Θ.

Σαρίδου Θεοδώρα, Υποψήφια Δρ. Α.Π.Θ.

## **ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Αντωνόπουλος Χρήστος, Καθηγητής ΑΠΘ

Αρετή Ανδρεοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Βασιλειάδης Βασίλειος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π Α.Π.Θ.

Βρύσης Λάζαρος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π Α.Π.Θ.

Βρύζας Νικόλαος, Δρ./Μεταδιδακτορικός ερευνητής Α.Π.Θ.

Γούσιος Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Δημούλας Χαράλαμπος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ζέρβας Παναγιώτης, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Καλλίρης Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Καλιακάτσος-Παπακώστας Μάξιμος, Επίκουρος Καθηγητής

Καραποστόλη Αιμιλία, Δρ./Μεταδιδακτορική ερευνήτρια Α.Π.Θ.

Κατερέλος Διονύσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Κλωνάρη Δέσποινα, Δρ., Ε.Δι.Π., Α.Π.Θ.

Κουζούπης Σπύρος, Επίκουρος καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ

Κούτρας Αθανάσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Ματσιώλα Μαρία, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών

Μουρτζόπουλος Ν. Ιωάννης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Μπάμνιος Γεώργιος, Καθηγητής Δι.ΠΑ.Ε.

Μπάρκας Νίκος, Καθηγητής ΔΠΘ

Παπαδάκης Παναγιώτης, Ερευνητής ΙΤΕ

Παπαδέλης Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.

Παπαδογιάννης Νεκτάριος, Καθηγητής Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου

Παπανικολάου Γιώργος, Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Παστιάδης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ποτηράκης Στέλιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Ραγκούση Μαρία, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Σεβαστιάδης Χρήστος, Δρ. Μηχ., Ε.Δι.Π., Α.Π.Θ.

Σκαρλάτος Δημήτριος, τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Σούμπερτ Γκότφριντ, Δρ. Σύμβουλος Ακουστικής

Σπυρίδης Χαράλαμπος, τ. Καθηγητής Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Συμεωνίδης Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ταρουδάκης Μιχάλης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Κρήτης

Τάτλας Νικόλαος-Αλέξανδρος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Τσινίκας Νίκος, Ομότιμος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Φλώρος Ανδρέας, Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Χαδέλλης Λουκάς, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης, Ε.Δι.Π Πανεπιστημίου Πατρών

Χουρμουζιάδου Καλλιόπη, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός, ΣΕΠ ΕΑΠ

## **ΚΕΝΤΡΙΚΟΙ ΟΜΙΛΗΤΕΣ**

1) Γεώργιος Παπανικολάου, Ομότιμος Καθηγητής ΑΠΘ - Πρόεδρος Δ.Σ. ΕΛ.ΙΝ.Α.

**Τίτλος Ομιλίας: Στερεοφωνία: Ψυχοακουστική ή Τεχνολογία;**

2) Γιάννης Μουρτζόπουλος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών - Αντιπρόεδρος

Δ.Σ. ΕΛ.ΙΝ.Α.

**Τίτλος Ομιλίας: Νέοι ορίζοντες για τις τεχνολογίες του ήχου**

## ΧΟΡΗΓΟΙ

Πλατινένιος χορηγός: **Sealed Air**

Χρυσοί χορηγοί: **Fibran, Saint-Gobain**



***fibran***<sup>®</sup>

  
**SAINT-GOBAIN**

**Ecophon**  
SAINT-GOBAIN

## ΕΚΘΕΤΕΣ

Alpha Acoustiki

GroupScience

Εργοακουστική

## **ΣΥΝΕΔΡΙΕΣ:**

Συνεδρία 1: Ομιλία και Μουσική, Αντίληψη

Συνεδρία 2: Περιβαλλοντική Ακουστική — Ηχοτοπία

Συνεδρία 3: Επεξεργασία και Αναπαραγωγή Ήχου — Ακουστική Ανάλυση

Συνεδρία 4: Ακουστική Ιστορικών Μνημείων και Ηχητική Κληρονομιά

Συνεδρία 5: Ακουστική στις εκπαιδευτικές και πολιτιστικές δραστηριότητες

Συνεδρία 6: Κτιριακή Ακουστική

Συνεδρία 7: Υποβρύχια Ακουστική

Συνεδρία 8: Ήχος και Μουσική: Επεξεργασία, Ανάκτηση, Αναπαραγωγή

Συνεδρία 9: Ακουστικές Διατάξεις και Μετρήσεις

Συνεδρία 10: Θόρυβος — Δονήσεις

# Πίνακας Περιεχομένων Πρακτικών – Ακουστική 2022

## ΣΥΝΕΔΡΙΑ 1: ΟΜΙΛΙΑ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ, ΑΝΤΙΛΗΨΗ

Investigation of visual prototypes in the semantics of timbre of musical sounds	5
Αυτόματη απόδοση υποτίτλων σε ηχητικό περιεχόμενο μέσω τεχνικών βαθιάς μάθησης	13
Ένα πρότυπο διαδικτυακό παιχνίδι για τη συλλογή δειγμάτων ομιλίας με σήμανση συναισθηματικού φορτίου	21
Αναγνώριση Κατηγορίας Νοητικής Έκπτωσης μέσω Χαρακτηριστικών Ομιλίας	29
Ευφυείς τεχνικές επεξεργασίας ηχητικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο για την ανίχνευση διαταραχών της ομιλίας σε ασθενείς με Πάρκινσον	35
Προσωποποιημένη επεξεργασία ομιλίας για συσκευές ακουστικής ενίσχυσης με τεχνικές βαθιάς μάθησης	41
Κατευθυντικότητα τραγουδιστής φωνής στην ελληνική γλώσσα: μελέτη περίπτωσης κλασικού και βυζαντινού τραγουδιού	48
Ηχητική εφαρμογή πλοήγησης και προσανατολισμού σε κλειστούς χώρους για άτομα με προβλήματα όρασης	57

## ΣΥΝΕΔΡΙΑ 2: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ — ΗΧΟΤΟΠΙΑ

Η κυκλική πόλη και η βιώσιμη διαχείριση του ακουστικού περιβάλλοντος	65
Σύνθεση ηχοτοπίου με σκοπό την αστική βιωσιμότητα	71
Μεθοδολογία για τον ηχητικό σχεδιασμό, σύνθεση και αξιολόγηση ιστορικών ηχοτοπίων. Μελέτη περίπτωσης: Η Κρήτη του 19ου αιώνα υπό το βλέμμα του περιηγητή Robert Pashley	77
Αξιολόγηση της ηχοπροστασίας αστικών κήπων την εποχή της πανδημίας	86
Σχεδιασμός Ηχοτοπίων για ένα Μουσείο: Παραγωγή ενός Podcast Ηχοτοπίων ως ένας Εναλλακτικός Τρόπος Βιώματος της Μουσειακής Εμπειρίας του Μουσείου Σύγχρονης Τέχνης του MOMus	94
Αναγνώριση πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης από ηχητικό αποτύπωμα	100
Ήχοι του Εικοσιένα. Καταγραφή χαρακτηριστικών ήχων της επανάστασης του 1821 και ταξινόμηση ως προς το είδος και την απόσταση διάδοσής τους.	108

## ΣΥΝΕΔΡΙΑ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ ΉΧΟΥ — ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Ιδιάζουσες περιπτώσεις δυσκολίας των ελληνόφωνων κλασικών τραγουδιστών στη λυρική άρθρωση της γαλλικής γλώσσας: μια προκαταρκτική ακουστική και συγκριτική μελέτη.	117
Αυτοματοποιημένη εξέταση ομιλητικής ακοομετρίας στην ελληνική γλώσσα με την χρήση έξυπνων συσκευών	126



Ανίχνευση Μηχανικής Φθοράς Τσιμούχας Βιομηχανικού Εμβόλου Διέλασης μέσω Ακουστικής Εκπομπής και Μηχανικής Μάθησης.	134
Μεγάλης κλίμακας ανάλυση ακουστικών για σχεδίαση ψηφιακών φίλτρων	142
Αξιολόγηση πολυκαναλικής αναπαραγωγής τρισδιάστατου ήχου σε περιβάλλον CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)	150
Αναπαραγωγή ήχου μέσω οπτοακουστικής μετατροπής πλάσματος λέιζερ	160
Αμφιωτική μείωση δεδομένων για εύρωστη εκτίμηση γωνίας άφιξης ακουστικών πηγών μέσω συνελκτικών νευρωνικών δικτύων για αντηχητικά σήματα	171
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 4: ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ ΗΧΗΤΙΚΗ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑ</b>	
Πρώτη αποτύπωση της ακουστικής του Α΄ αρχαίου θεάτρου της Λάρισας	179
Πρόσφατες έρευνες σε αρχαία θέατρα : προβλήματα ηχοπροστασίας & επαναλειτουργίας	188
Πλήρης ανακατασκευή του Δημοτικού Θεάτρου Λευκωσίας και μετατροπή του σε αίθουσα συναυλιών και πολλαπλών χρήσεων	196
Σχεδιασμός ηχητικών εμπειριών στα ιστορικά μνημεία της Θεσσαλονίκης · αλληλεπίδραση μεταξύ αρχιτεκτόνων και συνθετών μουσικής	204
Ακουστικό μονοπάτι στις βόρειες περιοχές της Αθήνας	212
Ηχητικές ταυτότητες περιοχών διαφορετικού υψομετρικού επιπέδου: Η περίπτωση του ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης	220
Οι σχέσεις εικονογραφίας και ακουστικής στην βυζαντινή ναοδομία.	226
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 5: ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΣΤΙΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ</b>	
Οι ατμόσφαιρες στον ήχο των οπτικοακουστικών αφηγήσεων	235
Δυναμικά μεταβαλλόμενη μείξη για την ενίσχυση της ακουστικής αντίληψης σε περιβάλλοντα Ακουστικώς Επαυξημένης Πραγματικότητας	236
Οι θερινοί κινηματογράφοι της Θεσσαλονίκης (περίοδος 1950 - 2018)	244
Ghostly Presence: Ο Ήχος των Στοιχειωμένων Σπιτιών στον Κινηματογράφο	252
Αυτοματοποιημένη Επιλογή Ήχων για τον Ηχητικό Σχεδιασμό στις Οπτικοακουστικές Αφηγήσεις: Ο Ήχος της Εικόνας	258
Εφαρμογές φωνητικών Chatbot στην δημοσιογραφία	267
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 6: ΚΤΙΡΙΑΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ</b>	
Ακουστική Μελέτη Διαμόρφωσης Υφιστάμενου Κτιρίου σε Έναν Ολοκληρωμένο Πολυχώρο Μουσικής Εξάσκησης και Ηχογραφήσεων	275

Εφαρμογή ενός καινοτόμου συστήματος δυναμικής ενίσχυσης (DDA) για την χαμηλόσυχνη ηχομόνωση κτιριακών στοιχείων	283
Ακουστικός σχεδιασμός, ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του νέου Αμφιθεάτρου “Μιλτιάδης Έβερτ” στην Τεχνόπολη Δήμου Αθηναίων.	290
Συγκριτική Αξιολόγηση Πειραματικών διατάξεων κατασκευαστικών λύσεων εσωτερικής διαχωριστικής τοιχοποιίας.	298
Εφαρμοσμένο επιστημονικό & ερευνητικό έργο για την υποστήριξη της εθνικής παραγωγικής αλυσίδας κατασκευής δομικών στοιχείων έναντι αερόφερτων θορύβων	306
Πρόταση για μία νέα δομή της τεχνικής έκθεσης της κτιριακής ακουστικής μελέτης	316
Ακουστική και αρχιτεκτονική διαμόρφωση χώρου δοκιμών της Συμφωνικής Ορχήστρας Νέων του Ο.Μ.Μ.Θ.	322
Προσομοιωτής για την αναπαράσταση ακουστικών πεδίων. Εφαρμογή στην ακουστική μελέτη του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου Ηρακλείου Κρήτης (ΠΣΚΗ)	330
Μορφές σύγχρονων αιθουσών συναυλίας : προβλήματα αρχιτεκτονικού & ακουστικού σχεδιασμού	339
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 7: ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ</b>	
Ένα επιχειρησιακό μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών για την πρόβλεψη θορύβου ναυσιπλοΐας	347
SAvEWhales: Ακουστικό παρατηρητήριο φυσητήρων στη ΝΔ Κρήτη	348
Αναγνώριση ιδιομορφών υποβρύχιων ακουστικών σημάτων με χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων	349
Ένα μεσοπρόθεσμο πείραμα για τη μέτρηση του θορύβου του θαλάσσιου περιβάλλοντος	351
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 8: ΉΧΟΣ ΚΑΙ ΜΟΥΣΙΚΗ: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΝΑΚΤΗΣΗ, ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ</b>	
Τεχνικές Ανάκτησης Μουσικής Πληροφορίας για την Παραγωγή Ρυθμικών Μοτίβων Τυμπάνων	359
Μονάδα Προσομοίωσης Ενισχυτή Ηλεκτρικής Κιθάρας Τεχνολογίας Λυχνίας Κενού Βασισμένη Σε MOSFET: Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσω Ακροάσεων Και Ανάλυσης Αντικειμενικών Κριτηρίων	367
Συνολική Προτίμηση για Αμφιωτικά Ηχογραφημένα Ηχητικά Σήματα Μουσικής	375
Καταγραφή συνηθειών ακρόασης μουσικής στην Ελλάδα	385
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 9: ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</b>	
Computational model for multiple acoustic levitation points with an ultrasonic plane wave and a grid of reflecting surfaces	394
Επισκόπηση επί της ιχνηλασιμότητας της μονάδας watt στον αερόφερτο ήχο	407
Βελτιστοποίηση σχήματος για τον σχεδιασμό ιδιοφώνων και πειραματική διερεύνηση	415

Εφαρμογές Φωνονικών Μεταϋλικών σε Ακουστικές διατάξεις	423
Αναλυτικές λύσεις για το πεδίο περίθλασης γύρω από ακμή πεπερασμένου μήκους	430
Ακουστικό Πεδίο γύρω από Neumann πλάκα μηδενικού πάχους	438
Μελέτη υπερβραχέων ακουστικών κυμάτων σε διαστρωματωμένα υλικά με την μέθοδο άντλησης – ανίχνευσης με ακτινοβολία λέιζερ	446
Polarity of the diffracted signal around a rigid wedge	456
Νέα μορφή και χαρακτηριστικά της ακριβούς και προσεγγιστικών λύσεων για το σήμα περίθλασης γύρω από σφήνα	464
<b>ΣΥΝΕΔΡΙΑ 10: ΘΟΡΥΒΟΣ — ΔΟΝΗΣΕΙΣ</b>	
Βελτιωμένες ημι-εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηχομείωσης πίσω από ακουστικά σκληρή σφήνα	472
Καταστολή θορύβου στροβιλοσυμπιεστή, στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης	480
Σύστημα μη γραμμικού Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου εφαρμοσμένο σε αεροπορικό κάθισμα	486
Χρήση εμπορικού λογισμικού προσομοίωσης ακουστικής για την μελέτη μείωσης θορύβου σε χώρο παραγωγής εργοστασίου	494
Εστίαση του ήχου σε αντηχητικό δονητικό-ακουστικό περιβάλλον με χρήση της χρονικής αντιστρεψιμότητας	504
Πρόταση απλοποιημένης μεθοδολογίας αξιολόγησης παραγόμενου θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες.	512
Περιπτωσιολογική μελέτη (case study) αντιμετώπισης στερεόφερτου θορύβου από μονάδα συμπίεσης Φυσικού Αερίου	522
Υπολογιστικός προσδιορισμός πηγών θορύβου από ηχομετρήσεις κανονικής λειτουργίας βιομηχανικών εγκαταστάσεων	530
Η προστασία από τις εκπομπές θορύβου μουσικής των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος μέσα από τη νομολογία	538

## ***Investigation of visual prototypes in the semantics of timbre of musical sounds***

**Lina Papadatou**

Musicologist, Dept. of Music Studies, Aristotle University of Thessaloniki  
[linapapadatou@gmail.com](mailto:linapapadatou@gmail.com)

**Konstantinos Pasiadis**

Associate Professor, Dept. of Music Studies, Aristotle University of Thessaloniki  
[pasiadi@mus.auth.gr](mailto:pasiadi@mus.auth.gr)

### **ABSTRACT**

*The present work examines the relationship between sound timbre and the visual representation of the concepts that characterize it. Based on the LTM standard (Luminance - Texture - Mass) and the work compares the current experimental findings with results of previous experiments in which the listener responded using verbal scales and descriptions. Through an online platform created for this purpose, 24 sounds from 61 participants were examined, who did not report any particular hearing problems. During the experimental process, participants had to match the sound stimulus they heard with the given images. Our results showed that the correlation between visual and verbal responses was quite large, mainly for the qualities of luminance-brightness and texture. This relationship is confirmed by previous experiments concerning the same qualities, but the response of the listeners was done in a different way.*

### ***Διερεύνηση της χρήσης οπτικών προτύπων για τη σημασιολογική περιγραφή της χροιάς των μουσικών ήχων***

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάζεται το θέμα της χροιάς σε σχέση με την οπτική αναπαράσταση των εννοιών που τη χαρακτηρίζουν, με βάση το πρότυπο LTM (Luminance - Texture - Mass) και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενες έρευνες, στις οποίες ο ακροατής αποκρινόταν με τη χρήση λεκτικών κλιμάκων και περιγραφών. Μέσα από μία διαδικτυακή πλατφόρμα εξετάστηκαν 24 ήχοι από 61 συμμετέχοντες, οι οποίοι δεν ανέφεραν ιδιαίτερα προβλήματα στην ακοή. Κατά την πειραματική διαδικασία οι συμμετέχοντες έπρεπε να αντιστοιχίσουν το ηχητικό ερέθισμα που άκουγαν με από τις δοσμένες εικόνες. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συσχέτιση των οπτικών και λεκτικών αποκρίσεων ήταν αρκετά μεγάλη, κυρίως για τις ποιότητες της φωτεινότητας-λαμπρότητας και της υφής. Η σχέση αυτή επιβεβαιώνεται και από προηγούμενες μελέτες που αφορούσαν τις ίδιες ποιότητες αλλά η απόκριση των ακροατών γινόταν με διαφορετικό τρόπο.*

## Introduction

Timbre has been an important concept for scientific exploration of music since the middle of the 19<sup>th</sup> century and especially in the early 1970s [2]. It is one of the fundamental aspects of musical acoustics and yet it remains one of the least understood. The brain's remarkable ability to recognize the source of a sound — a musical instrument, the voice of a speaker, etc. — stems from its ability to perceive and process differences in the timbre of sounds [3]. Timbre is one of the four major auditory attributes of tone, while the rest are loudness, pitch, and duration. Of those four, timbre is by far the most complex attribute and due to its multidimensional nature is obviously affected by loudness, pitch, and duration.

Two basic sets of methods have been used by researchers for studying the categorical and continuous nature of timbre [7]. The first set has as its main function the classification of a collection of objects into groups. Therefore, categorization, recognition, and identification are all subsets of classification. The second set concerns the comparison between classes of objects. An example of such a comparison is the designation of two sounds as "similar" or "dissimilar" [7]. Previous research on the perception of musical timbre has revealed three or four primary characteristics for modeling timbres of monophonic acoustics instruments [1].

While the above methods are particularly effective in exploring the perceptual properties of musical timbre, they are not designed to explore its semantic dimensions [1]. The research in its semantic dimension has aimed mainly at identifying a framework of verbal descriptions, which can consistently convey the different impressions that the timbre can create. For example, scales can be used where the edges are two opposite verbal characteristics, such as "smooth - rough", "light - dark", or "full - empty" (Luminance – Texture – Mass: LTM Model) and listeners can rate the timbre impressions based on those scales.

The cross-modal similarities between sound and vision have been examined mainly between the properties of pitch and loudness on the one hand and the brightness of the timbre of the sound on the other [9]. It has been noticed that pitch and loudness are described in terms we use in the sense of touch: higher or louder sounds seem to be associated with rougher textures and are described using the adjectives "rough", "sharp" and "hard" [10].

Audiovisual correspondences can play a key role in the development of more efficient systems for describing the musical timbre. Several studies have revealed the ability of non-synesthetes people to make audiovisual associations and found some correspondences between auditory and visual features [6]. In the example of the Bouba/Kiki effect [4], it is obvious that people consistently associate the sound of the word "bouba" with rounded shapes and the sound of the word "kiki" with angular shapes. This seems to be the case even in very different cultures, with different linguistic peculiarities and age groups.

Translations of words used to describe musical timbre in different languages can confuse the word's original meaning, as it is not always possible to translate it accurately. Furthermore, there is the question of whether the use of linguistic description is the most appropriate method in cases of listeners who lack a rich vocabulary (for example, children). Therefore, the issues that arise with the specific

methodology used to investigate musical timbre are rooted in the fact that this mode of verbal description may make it difficult to create a single framework that can be used to describe timbre by the whole population without the need for additional parameterization.

Considering the audiovisual associations, as well as the problems arising from existing methods of timbre description, the present study takes a first approach to investigate visual models for the semantic description of musical timbre;

- Whether the use of visual prototypes to describe the semantics of musical timbre is related to the use of verbal descriptions.
- Whether the responses between listeners with and without music experience show similarities in terms of visual prototypes for describing the timbre.
- If the use of visual prototypes based on natural images has better results compared to the geometric shapes used in previous research.
- Whether visual prototypes can function in the same way as verbal descriptions and whether it is possible to substitute them and use them as an alternative way of describing musical timbre.

## **1. Method**

In contrast to previous experiments in which participants were able to choose their answer from a verbal scale, in this experiment they were allowed to choose from a set of images, which related to the Luminance, Texture, and Mass of the timbre of the sound.

Each listener rated all sounds in each of the visual scales only, and the relation of responses between both verbal and visual scales to each other was studied compared to previous results. The verbal scales data were taken from previous research by Zacharakis, Pastiadis & Reiss (2014), and Zacharakis & Pastiadis (2016).

### *1.1 Participants*

A group of 61 people participated in the experiment, divided into two categories; 44 participants were musicians, students of the Department of Music Studies at the Aristotle University of Thessaloniki, with an average age of 23.5 years, while the rest of the participants were people with no previous musical knowledge, with an average age of 35 years. Of the musicians, most had piano and violin skills, according to the questionnaire they filled out before the audition process.

None of the musicians' category reported any loss of hearing, while two people reported being synesthetes. Of the other listeners who volunteered to participate in the experiment, 2 people reported having some hearing loss.

### *1.2 Stimuli*

24 different sounds from acoustic instruments, electric instruments and synthesizers were selected for the experiment. The fundamental frequencies of sounds range in three octaves. Most of the sounds are in A3. Sounds from all categories of instruments were used (piano, cello, flute, organ, oboe, saxophone, marimba, etc.). In this experiment, as in the previous ones on which the present

study was based, it was decided to use sounds in 3 different octaves, to enhance the generalizability of the findings and to investigate the effect of the fundamental frequency (F0) on the perception of timbre.

### *1.3 Visual Prototypes*

Participants were provided with three sets of images. The images were selected for young people, aged 6-12 years. However, this is not definite that the experiment cannot be conducted by older people.

The optical scales which were selected differed from each other in the three main aspects that describe the timbre of a sound: luminance, texture and mass and were used as model physical images.

The luminance set showed a cartoon (Mickey Mouse) in black and white (Saturation = 0), and the background was a forest. When processing the image, to make an 8-point scale, the background was kept unchanged, while in the cartoon we processed the color curves, keeping the input constant (at 150) and the output increased in each photo by 20 points (from 60 to 200).

For the texture a photo of a leather fabric was chosen. The "High pass" filter was used in which the contrast was kept constant (at 2,500), while the deviation ranged from 1 to 15. The images were processed for luminance and texture using GIMP software.

The set for the mass showed a glass of liquid, and it appeared from completely empty to full. Each set of images gave the listener a scale of 8 different options so that they could match the sound quality they were hearing with the corresponding visual stimulus.

### *1.4 Procedure*

The process was carried out remotely, by groups, via the React App (<https://remote-timbre-experiment.herokuapp.com/>). The task for each listener was to match an image from the choices they had in response to the sound they were hearing. They were given as much time as they wanted to be sure of their answer and were able to listen to the audio extract again as many times as they wished. To maintain the anonymity of the participants, the login to the platform is done using a unique code for each participant (session ID), which was randomly assigned to the listeners before the start of the experimental procedure.

During the experimental procedure, the listener allowed to take a break (5' every 15'), to be able to answer the questions with more clarity. The questions were presented in random order to each listener. Also, listeners were given the choice between three different ways to answer: the Slider option (by moving the bar below the picture), the Arrows option (by selecting with the arrows to the right and left of the picture) and the Image option (by selecting the answer by seeing all possible options lined up in order). Finally, pressing the "Next" option locked the answer and moved on to the next sound stimulus. an alternative way of describing musical timbre.

## **2. Results**

The results were analyzed for all listeners and separately for musicians and non-musicians. The responses of the listeners, especially the musicians, showed a high correlation with the responses to the semantic descriptions of timbre. The highest correlation was noticed in the quality of texture, while a high correlation was also observed for the brightness quality.

The results were not as positive for mass quality, in which it was observed that musicians' scores showed a small correlation with semantic responses, while no correlation between visual and verbal responses was observed in non-musicians' scores.

### *2.1 Luminance*

Analysis of the results showed that the musicians seemed to perceive to a high level the relationship between the images from the visual scales and the sound stimuli they received, with spearman's coefficient value at  $r = .806$ ,  $p = .01$ .

Among non-musicians, the correspondences seem to have been less clear than among musicians. The correlation coefficients are lower compared to the coefficients in the musicians' category, and in some qualities, there seems to have been no correlation with the results of the verbal responses, with spearman's coefficient value at  $r = .625$ ,  $p = .01$ .

### *2.2 Texture*

According to the following table concerning the musicians who participated in the experiment, visual responses, and the corresponding verbal responses for the quality of texture were found to have a strong positive correlation, with spearman's coefficient value at  $r = .863$ ,  $p = .01$ .

Respectively, in the non-musical category, visual and corresponding verbal responses for the quality of texture were found to have a high positive correlation, with spearman's coefficient value at  $r = .753$ ,  $p = .01$ .

### *2.3 Mass*

Studying the case of the mass quality, we observe that the results are very different from the results of the luminance and texture quality. The visual responses along with the corresponding verbal responses of the mass quality were found to have a weak positive correlation.

For the musicians' responses the value of the spearman coefficient is  $r = .512$ ,  $p = .05$ .

About the non-musicians' responses were found to have a low positive correlation, with a spearman coefficient value of  $r = .318$ ,  $p > .05$ .

### *2.4 Correlations between the visual responses of each quality with the visual responses of the other qualities*

To confirm that the highest correlation occurs between visual and verbal responses of the same category (e.g., verbal luminance - visual luminance), the



results were compared with each quality. From this comparison, it was observed that the mass quality seems to be associated with the other two qualities.

*Table 2.4 Spearman correlation coefficient for all qualities for visual correspondences (All participants).*

Verbal	Luminance	Texture	Mass
Visual			
Luminance		0.140	0.160
Texture	-0.114	-0.010	
Mass	-0.610**	0.581**	
* Correlation is significant at the 0.05 level ** Correlation is significant at the 0.01 level			

*2.5 Correlations between the visual responses of each quality with the verbal responses of the other qualities*

The last comparison was between the visual responses and the verbal responses of the other qualities (e.g., visual luminance - verbal texture).

*Table 2.5 Spearman correlation coefficient for all qualities for visual and verbal correspondences (All participants)*

Visual	Luminance (Verbal)	Texture (Verbal)	Mass (Verbal)
Luminance (Visual)	0.815**	-0.102	-0.282
Texture (Visual)	-0.012	0.864**	0.110
Mass (Visual)	-0.503*	0.477*	0.498*
* Correlation is significant at the 0.05 level ** Correlation is significant at the 0.01 level			

**3. Discussion**

The nature of the process of identifying along with describing musical timbre is not entirely clear. It is a process that appears to be based on innate mechanisms and

may be part of a more complex process. This process seems to be common to humans, regardless of their musical training. This is confirmed through studies, such as this one, which used as listeners people with and without musical experience.

The results showed that the data from the visual responses experiment compared to those from the experiment with verbal descriptions show quite a high degree of correlation. In two of the three qualities investigated the correlation was quite high, while in the third quality the results differed.

Furthermore, by comparing the results between the visual responses only, a connection between the visual quality of the mass and the other two qualities seemed to be shown. However, the strongest association was observed between each visual quality and its corresponding verbal quality (e.g., brightness (visual) - brightness (verbal)).

It is important to note that based on the summary tables of spearman correlation coefficients, the correlations between the verbal responses are quite weak, in contrast to the corresponding correlations between the visual responses. This is a piece of information that advocates the alternative use of visual scales instead of verbal ones.

To confirm the results of this study, it would be good to study both verbal and visual responses from the same participants at the same time, so that the results could be compared more consistently.

#### 4. Acknowledgement

We would like to thank Mr.Ioannis Hatzianagnostou for creating the web platform where the experiment took place, as well as all the participants who took part in the process.

#### 5. References

- [1] A. Zacharakis, K. Pasiadis, “An Interlanguage Unification of Musical Timbre: Bridging Semantic, Perceptual and Acoustic Dimensions,” *Music Perception*, vol. 32, no. 4, pp. 394–412 (2015). <http://dx.doi.org/10.1525/mp.2015.32.4.394>
- [2] A. Zacharakis, K. Pasiadis, and J. D. Reiss “Revisiting the Luminance-Texture-Mass Model for Musical Timbre Semantics: A Confirmatory Approach and Perspectives of Extension,” *Journal of the Audio Engineering Society* Vol. 64, no. 09, pp. 636–645 (2016). <http://dx.doi.org/10.17743/jaes.2016.0032>
- [3] C. Saitis, S. Weinzierl, K. von Kriegstein, S. Ystad, and C. Cuskley, “Timbre semantics through the lens of crossmodal correspondences: A new way of asking old questions,” *Acoustical Science and Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 365–368 (2020).
- [4] I.E. Simura, P. Vanzella, & J.R. Sato, “Timbre and Visual Forms: a crossmodal study relating acoustic features and the BoubaKiki Effect”. *2nd International Conference on Timbre. Thessaloniki (online)*.
- [5] J. Simner, Ch. Cuskley & S. Kirby, “What sound does that taste? Cross-modal mappings across gustation and audition”. *Perception*, 39, 553-569, (2010). doi:10.1068/p6591

- [6] M. Adeli, J. Rouat, and S. Molotchnikoff, “Audiovisual correspondence between musical timbre and visual shapes,” *Frontiers in human neuroscience*, vol. 8, p. 352. (PDF) *Seeing Sounds, Hearing Shapes: a gamified study to evaluate sound-sketches*. (2014).
- [7] S. Donnadieu, *Mental Representation of the Timbre of Complex Sounds*. In J. W. Beauchamp (ed.), *Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds*, pp. 272-319. New York, NY: Springer (2007).
- [8] S. Löbbers, M. Barthelet, and G. Fazekas, “Sketchingsounds: an exploratory study on sound-shape associations,” in International Computer Music Conference (ICMC), p. 6. (PDF) *Seeing Sounds, Hearing Shapes: a gamified study to evaluate sound-sketches* (2021).
- [9] T. Grill and A. Flexer, “Visualization of Perceptual Qualities in Textural Sounds,” in International Computer Music Conference (ICMC), p.8, 2012.
- [10] Z. Wallmark, Semantic Crosstalk in Timbre Perception. *Music & Science* (vol.2) (2019).

## Αυτόματη απόδοση υποτίτλων σε ηχητικό περιεχόμενο μέσω τεχνικών βαθιάς μάθησης

Γεώργιος Πάρναλης-Παλαντζίδης  
Φοιτητής  
[parnalis@ece.auth.gr](mailto:parnalis@ece.auth.gr)

Μαρίνα-Ειρήνη Σταματιάδου  
Υπ. Διδάκτωρ  
[mstamat@journ.auth.gr](mailto:mstamat@journ.auth.gr)

Χαράλαμπος Δημούλας  
Αν. Καθηγητής  
[babis@ece.auth.gr](mailto:babis@ece.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προτείνουμε ένα μοντέλο αυτόματου υποτιτλισμού ηχητικού περιεχομένου, στην ελληνική γλώσσα. Αρχικά αναλύεται η δημιουργία ενός νέου συνόλου δεδομένων, βασισμένο στο σύνολο δεδομένων Clotho, και στην συνέχεια, παρουσιάζεται η εξαγωγή ακουστικής πληροφορίας από τα αρχεία ήχου και σημασιολογικής πληροφορίας από τους υποτίτλους του συνόλου δεδομένων. Η υλοποίηση βασίζεται σε τεχνικές βαθιάς μάθησης και πιο συγκεκριμένα στην αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή.

### Automated Audio Captioning using Deep Learning Techniques

### ABSTRACT

*In this work, we propose an Automated Audio Detection (AAC) model, which produces captions in Greek language. Initially we introduce a new AAC dataset, based on the Clotho dataset. We also present the extraction of acoustic and semantic information from sound files and captions respectively. The architecture is based on deep learning techniques, more specifically, a sequence to sequence architecture with Gated Recurrent Units as Encoders and Decoders.*

### Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα του αυτοματοποιημένου υποτιτλισμού ηχητικού περιεχομένου (Automated Audio Captioning - AAC) στην Ελληνική γλώσσα. Ο AAC είναι μια νέα ερευνητική περιοχή η οποία αποτελεί σημείο τομής των πεδίων της επεξεργασίας ήχου (Audio Processing – AP) και φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing – NLP). Κάνοντας χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, στοχεύει στη δημιουργία αντιπροσωπευτικών υπότιτλων, υπό τη μορφή κειμένου γραμμένου σε φυσική γλώσσα, οι οποίοι περιγράφουν με τρόπο περιεκτικό και αναλυτικό τι συμβαίνει σε ένα ηχητικό απόσπασμα. Από όσο μας είναι γνωστό, αυτή είναι η πρώτη προσπάθεια δημιουργίας ενός μοντέλου AAC στην Νέα Ελληνική γλώσσα. Σε αντίθεση με τις τεχνικές υποτιτλισμού ανθρώπινης ομιλίας, στον AAC η έμφαση δίνεται σε ήχους που παράγονται από το περιβάλλον.

Ο σκοπός της δημιουργίας υπότιτλων δεν είναι μόνο η αναγνώριση αντικειμένων, γεγονότων ή σκηνών σε ένα δεδομένο ηχητικό απόσπασμα, αλλά επίσης και η αναγνώριση συσχετίσεων μεταξύ τους και η δημιουργία προτάσεων που έχουν νόημα και σημασία. Ως ερευνητικό πεδίο θεωρείται ότι έχει μεγάλες δυνατότητες σε εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, όπως για παράδειγμα η υποβοήθηση ανθρώπων

με ακουστικές αναπηρίες, η αναγνώριση γεγονότων και ανωμαλιών από υλικό που προέρχεται από σύγχρονα, έξυπνα συστήματα παρακολούθησης και κλειστά κυκλώματα τηλεόρασης (CCTV), ενώ αποδεικνύεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ευέλικτη, γρήγορη και αποτελεσματική αναζήτηση ηχητικών αρχείων ή βίντεο από μεγάλες βάσεις δεδομένων (Audio Retrieval).

## 1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Με την εξέλιξη που γνωρίζουν τεχνικές βαθιάς μάθησης την τελευταία δεκαετία, έχουμε δει μεγάλη ανάπτυξη σε εφαρμογές υποτιτλισμού στο κομμάτι της εικόνας και του βίντεο. Ωστόσο στο κομμάτι του ήχου, ενδιαφέρον έχει παρατηρηθεί μόλις τα τελευταία χρόνια, με την αρχή να γίνεται το 2017. Στο άρθρο τους οι Drossos, Adavanne και Virtanen παρουσίασαν για πρώτη φορά τη διαδικασία AAC σε μια αρχιτεκτονική βαθιάς μάθησης, χρησιμοποιώντας τρία αμφίδρομα επίπεδα GRU (BiGRU) στον κωδικοποιητή και δύο GRU επίπεδα στον αποκωδικοποιητή για την παραγωγή υπότιτλων μέσω ενός μηχανισμού προσοχής (Attention Mechanism). Ως σετ δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το ProSound Effects, που περιλαμβάνει λέξεις κλειδιά ως υπότιτλους και ως χαρακτηριστικά χρησιμοποιήθηκαν οι ενέργειες Mel. Παρόλο που παράγονται κεφαλίδες από ηχητικά αποσπάσματα, τα αποτελέσματα δεν είναι σωστές προτάσεις όπως θα τις αντιλαμβανόταν ένας άνθρωπος [1].

Στη συνέχεια ακολούθησε η εισαγωγή του AAC στους διαγωνισμούς DCASE [2] καθώς και η δημιουργία συνόλων δεδομένων όπως το Clotho [3] και το Audioscapes [4]. Στην προσέγγιση των Wu et. al χρησιμοποιείται ένα μοντέλο encoder-decoder με ένα επίπεδο GRU στον κωδικοποιητή και ένα στον αποκωδικοποιητή και παρουσιάζουν ένα νέο σετ δεδομένων για την κινεζική γλώσσα. Το μοντέλο τους τείνει να παράγει επαναλαμβανόμενες προτάσεις [5]. Αντίστοιχο μοντέλο ενσωματώνει για πρώτη φορά σημασιολογικά χαρακτηριστικά περιβαλλοντικού ήχου, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση των παραγόμενων υπότιτλων, κάνοντας χρήση των ετικετών που δίνονται στο σετ δεδομένων AudioSet [6].

Οι Eren και Sert παρουσιάζουν μια νέα αρχιτεκτονική encoder-decoder με τη χρήση BiGRU και σημασιολογικής πληροφορίας. Χρησιμοποιούν προεκπαιδευμένα ηχητικά νευρωνικά δίκτυα (Pretrained Audio Neural Networks – PANNs) για την εξαγωγή χαρακτηριστικών για τα διανύσματα ηχητικών χαρακτηριστικών καθώς και το γλωσσικό μοντέλο Word2Vec για τη δημιουργία διανυσμάτων λέξεων [7]. Αντίστοιχη προσπάθεια ενσωμάτωσης σημασιολογικής πληροφορίας στη διαδικασία AAC είναι το μοντέλο MAAC, το οποίο αποτελείται από δύο τμήματα: (α) έναν προεκπαιδευμένο κωδικοποιητή που κάνει χρήση του ResNet38 για την αρχικοποίηση των παραμέτρων του, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη διαδικασία εκπαίδευσης και ανάθεσης ετικετών και (β) έναν LSTM αποκωδικοποιητή πολυτροπικής εστίασης [8].

Τέλος, σε μια διαφορετική προσέγγιση, προτείνεται η χρήση θεματικής μοντελοποίησης για τις ηχητικές περιγραφές, αναλύοντας με ιεραρχικό τρόπο τα θέματα που καλύπτονται συχνότερα. Υιοθετείται ένα σχήμα μετάδοσης γνώσης και συνδυάζονται τεχνικές ηχητικής επισήμανσης (audio tagging – AT) και ταξινόμησης ακουστικών σκηνών (audio scene classification – ASC) για την εξαγωγή τόσο «τοπικής» όσο και γενικευμένης πληροφορίας [9].

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Δημιουργία Συνόλου Δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύνολο δεδομένων στο ερευνητικό πεδίο της αυτοματοποιημένης δημιουργίας υποτίτλων είναι το Clotho. Για το ευρύ κοινό διατίθεται το 80% του συνόλου δεδομένων. Το υπόλοιπο 20% δεν έχει διαθέσιμους τους υποτίτλους του καθώς χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδοσης των μοντέλων του διαγωνισμού DCASE [1].

Για την δημιουργία του συνόλου δεδομένων στην Νέα Ελληνική, διατηρήσαμε τα ηχητικά αρχεία του 80% του Clotho που είναι διαθέσιμα, ως έχουν, και με την χρήση του Google Translate API αποδόθηκαν οι υπάρχοντες υπότιτλοι από τα αγγλικά στα ελληνικά. Η συγκεκριμένη μέθοδος κάνει χρήση Transformers. Ως αποτέλεσμα, προκύπτουν 19690 υπότιτλοι 8 έως 25 λέξεων, με 5 υποτίτλους να αντιστοιχούν σε κάθε ηχητικό απόσπασμα.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η προ-επεξεργασία των δεδομένων που έχουν προκύψει, με τη χρήση γνωστών τεχνικών που εφαρμόζονται στην επεξεργασία φυσικής γλώσσας. Όλοι οι χαρακτήρες μετατρέπονται σε πεζά γράμματα, αφαιρούνται σημεία στίξης και τονισμού. Επίσης, σε αντίθεση με την αγγλική γλώσσα, η ελληνική έχει πτώσεις, κλήσεις και γένη και αυτό στην περίπτωση μας οδηγεί σε περισσότερες λέξεις στο λεξιλόγιο του συνόλου δεδομένων. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση λημματοποίησης κατά την οποία εντοπίζεται (και χρησιμοποιείται) το λήμμα μιας λέξης, και stemming, κατά την οποία εντοπίζεται η ρίζα της λέξης. Οι παραπάνω τεχνικές οδηγούν στη μείωση της διαστασιμότητας του λεξιλογίου.

### 2.2 Διαχωρισμός Συνόλου Δεδομένων

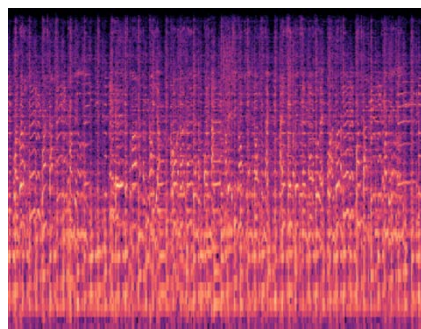
Από τα 4918 ηχητικά αρχεία, διαχωρίζουμε το σύνολο δεδομένων μας σε δύο μέρη, ένα σετ εκπαίδευσης, και ένα σετ ελέγχου, φροντίζοντας να ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο: κάθε λέξη που εμφανίζεται στο σετ ελέγχου, πρέπει να έχει εμφανιστεί τουλάχιστον μια φορά στο σετ εκπαίδευσης, καθώς σε διαφορετική περίπτωση το μοντέλο θα κληθεί να αξιολογήσει μια λέξη για την οποία δεν έχει λάβει κάποια πληροφορία.

Συνολικά, μετά την διαδικασία της μετάφρασης, προκύπτουν 8087 μοναδικές λέξεις. Έστω  $f_w$  η συχνότητα εμφάνισης μίας λέξης. Ιδανικά για  $f_w = 1$  θέλουμε η λέξη αυτή να εμφανίζεται σε υπότιτλο που ανήκει στο υποσύνολο του σετ εκπαίδευσης, για να αποφύγουμε το φαινόμενο που προαναφέρθηκε. Για  $f_w \geq 2$  πρέπει η λέξη να συναντάται τουλάχιστον μία φορά στο σετ εκπαίδευσης.

Για να επιτευχθεί ο ιδανικός διαχωρισμός, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6000 τυχαίοι διαχωρισμοί του συνόλου δεδομένων, 90% του οποίου αποτελεί το τμήμα της εκπαίδευσης και 10% το τμήμα ελέγχου. Στο τέλος των επαναλήψεων διατηρήθηκε ο διαχωρισμός με τις λιγότερες λέξεις που εμφανίζονται μόνο στο σετ ελέγχου. Τελικά, το σετ εκπαίδευσης αποτελείται από 3544 ηχητικά αρχεία, ενώ το σετ ελέγχου αποτελείται από 394 ηχητικά αρχεία. Ο μεγαλύτερος σε διάσταση λέξεων υπότιτλος παραμένει στις 25 λέξεις.

### 2.3 Εξαγωγή χαρακτηριστικών

Μετά την δημιουργία του συνόλου δεδομένων, γίνεται η εξαγωγή χαρακτηριστικών από τα αρχεία ήχου και συγκεκριμένα των log mel φασματογραφημάτων. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται αναλυτικότερα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των φασματογραφημάτων. Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών έγινε χρήση της βιβλιοθήκης Librosa, Όσον αφορά τη διαδικασία επεξεργασίας του κειμένου, κάθε υπότιτλος χωρίζεται στις λέξεις του, με την κάθε λέξη να αντιστοιχεί σε ένα token. Επίσης προστίθενται δύο επιπλέον tokens, ένα που υποδηλώνει την αρχή ενός υποτίτλου, <soc> (start of caption) και ένα το τέλος του, <eoc> (end of caption).



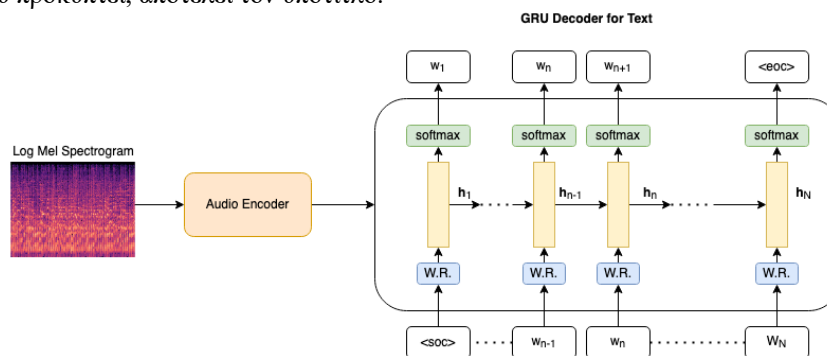
Εικόνα 2.0-1: Mel Φασματογράφημα

Πίνακας 2.1. Στοιχεία Εξαγωγής Mel Φασματογραφημάτων

Sample Rate	Hop Size	Number of Mels	Window Function
44.1 KHz	512	128	hann

### 2.4 Δομή μοντέλου

Ο κωδικοποιητής αποτελείται από μια σειρά τριών Gated Recurrent Units (GRUs). Η έξοδος του κωδικοποιητή εισάγεται στον αποκωδικοποιητή, ο οποίος αποτελείται και αυτός από ένα GRU. Η έξοδος με την σειρά της εισάγεται σε ένα Δίκτυο Feedforward με μια συνάρτηση softmax. Ως αποτέλεσμα έχουμε μια κατανομή πιθανοτήτων της λέξης που θα ακολουθήσει. Το τέλος του υποτίτλου έρχεται όταν δοθεί το token τερματισμού <eoc>. Η σειριακή αυτή ακολουθία λέξεων που προκύπτει, αποτελεί τον υπότιτλο.



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση του μοντέλου

### 3. Αποτελέσματα – Αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση του μοντέλου γίνεται χρήση μετρικών ανεξάρτητων της γλώσσας των υποτίτλων, όπως της BLEU-1,2,3,4 [10], κατά την οποία γίνεται σύγκριση μεταξύ των ngrams του υποτίτλου που αντιστοιχεί στο εκάστοτε ηχητικό (ground truth) και του υποτίτλου που προέκυψε από το μοντέλο (prediction). Επίσης, γίνεται αξιολόγηση με βάση την ROUGE-L[11], η οποία εξετάζει την επικάλυψη της μεγαλύτερης ακολουθίας λέξεων (longest ngram) που έχουν κοινή ο παραγόμενος υπότιτλος σε σχέση με τον αρχικό. Η METEOR[12] αποτελεί τον αρμονικό μέσο του precision και του recall μεταξύ των δύο υποτίτλων. Τέλος έχουμε την μετρική CIDEr[13], η οποία προκύπτει από το άθροισμα της ομοιότητας συνημίτονου (cosine similarity) μεταξύ των δύο υποτίτλων. Στους πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται οι μετρικές BLEU, ROUGE-L, CIDEr, METEOR συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες που προέκυψαν στην αρχική εργασία του Clotho.

Πίνακας 3.1. Σύγκριση μετρικών BLEU των δύο μοντέλων

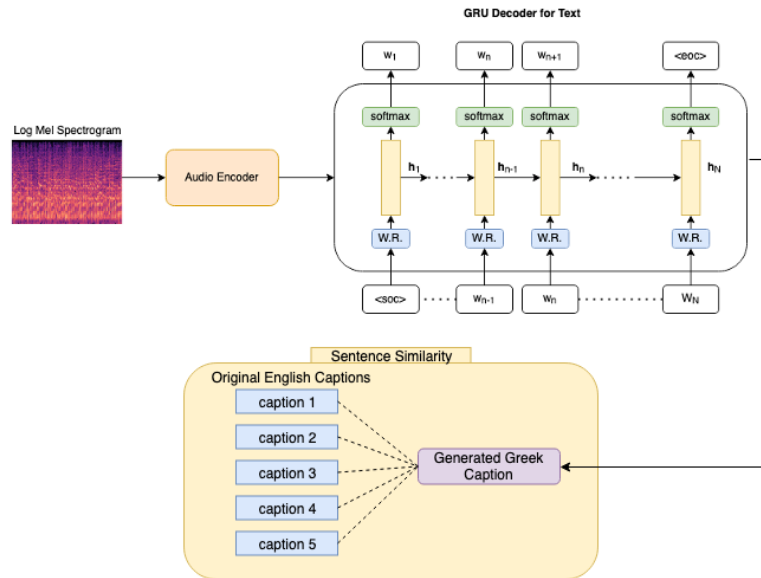
Γλώσσα	BLEU <sub>N</sub>			
	1	2	3	4
Ελληνικά	0.374	0.169	0.084	0.041
Αγγλικά	0.42	0.14	0.06	0.02

Πίνακας 3.2. Σύγκριση μετρικών ROUGE-L, CIDEr, METEOR των δύο μοντέλων

Γλώσσα	ROUGE-L	CIDEr	METEOR
Ελληνικά	0.249	0.134	0.23
Αγγλικά	0.27	0.10	0.09

Στη συνέχεια, για την καλύτερη αξιολόγηση του νοήματος που προκύπτει από τους υποτίτλους που παράγονται προτείνεται μια επέκταση της αρχιτεκτονικής του συστήματος με τη χρήση ενός μοντέλου μετατροπέα πρότασης (sentence transformer) στην ελληνική [14]. Ο παραγόμενος υπότιτλος κάθε ηχητικού αποσπάσματος, συγκρίνεται σημασιολογικά μέσω του μοντέλου κάνοντας εφαρμογή τεχνικών ομοιότητας προτάσεων (sentence similarity), ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην εργασία των Reimers και Gurevych [15]. Σε αυτήν ως μοντέλο εκπαιδευτής (teacher model) δίνεται το σύνολο των 5 υποτίτλων του αρχικού συνόλου δεδομένων, σε μια διαδικασία που αξιοποιεί τον αλγόριθμο SBERT για πολυγλωσσικές περιπτώσεις. Το τελικό μοντέλο μετά την επέκταση παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2.





Εικόνα 3.1 Επέκταση μοντέλου για την εύρεση ομοιότητας προτάσεων

Ένα παράδειγμα χρήσης του μοντέλου, από τον παραγόμενο υπότιτλο «βροχη πεφτει δυνατα» του ηχητικού αρχείου «rain\_on\_window.wav» του σετ ελέγχου παρατίθεται στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3. Παράδειγμα σύγκρισης παραγόμενου υποτίτλου με τους υποτίτλους του αρχικού σετ δεδομένων

“βροχη πεφτει δυνατα”	Sentence Similarity score
Rain coming down on top of a roof, steadily.	0.8
Rain is hitting the top of a roof at a steady pace.	0.777
Water flowing in a mechanical water mill and dripping down onto some surface.	0.453
Water flows at a constant rate and also drips.	0.543
Water from a mechanical mill is flowing and dripping down onto a surface.	0.457

#### 4. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα προσέγγιση αποτελεί μια αφετηρία στον τομέα AAC στην ελληνική γλώσσα. Αρχικά, δημιουργήθηκε το κατάλληλο σύνολο δεδομένων στην ελληνική γλώσσα. Στη συνέχεια ακολούθησε η προ-επεξεργασία των παραγόμενων υπότιτλων και ο κατάλληλος διαχωρισμός του συνόλου δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου, το οποίο και παρουσιάζεται. Από τα ηχητικά αποσπάσματα εξήχθησαν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την εισαγωγή τους στον encoder. Με βάση τις

μετρικές αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, φαίνεται ότι το παρόν εγχείρημα αποδίδει ικανοποιητικά.

Ως μελλοντικές προεκτάσεις του μοντέλου, χρήσιμη κρίνεται η σύγκριση εναλλακτικών γλωσσικών μοντέλων, εκπαιδευμένων στα ελληνικά, στο τελευταίο τμήμα του αποκωδικοποιητή. Επίσης, το αρχικό σύνολο δεδομένων Clotho περιέχει δυσανάλογα μεγάλο αριθμό ηχητικών που αφορούν συγκεκριμένα ηχητικά τοπία, όπως π.χ. «κελάηδισμα πουλιών», κάτι που καθιστά συγκεκριμένες λέξεις να εμφανίζονται πολλές φορές στο σύνολο εκπαίδευσης, έχοντας ως αποτέλεσμα κάποιοι υπότιτλοι να εμφανίζουν τις συγκεκριμένες λέξεις οι οποίες πλέον έχουν μεγαλύτερο «βάρος» στο σύνολο δεδομένων. Επομένως, κρίνεται σκόπιμη η δημιουργία ενός νέου συνόλου δεδομένων το οποίο θα αποτελεί μια συλλογή ηχητικών και αντίστοιχων υποτίτλων από μεγαλύτερο εύρος ηχοτοπίων, και την εισαγωγή τους στο σύνολο εκπαίδευσης, καθιστώντας το έτσι πιο ισορροπημένο.

### **Αναφορές**

- [1] K. Drossos, S. Adavanne, and T. Virtanen, “Automated Audio Captioning with Recurrent Neural Networks,” (2017).
- [2] “Automated Audio Captioning - DCASE.”  
<https://dcase.community/challenge2020/task-automatic-audio-captioning> (2020).
- [3] K. Drossos, S. Lipping, and T. Virtanen, “Clotho: An Audio Captioning Dataset,” (2019).
- [4] C. Dongjoo, K. Byeongchang, K. H. Lee, and G. Kim, “AudioCaps: Generating Captions for Audios in The Wild,” (2019).
- [5] Wu, Y., Chen, K., Wang, Z., Zhang, X., Nian, F., Li, S., & Shao, X). Audio captioning based on transformer and pre-training for 2020 DCASE audio captioning challenge. DCASE2020 Challenge, Tech. Rep. (2020).
- [6] Kim C. D., Kim B., Lee H. and Kim G. AudioCaps: Generating captions for audios in the wild. In Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers) (Association for Computational Linguistics, Minneapolis, Minnesota), pp. 119–132. (2019).
- [7] Eren, A. Ö., & Sert, M. Audio Captioning with Composition of Acoustic and Semantic Information. (2021).
- [8] Ye, Z., Wang, H., Yang, D., & Zou, Y. Improving the Performance of Automated Audio Captioning via Integrating the Acoustic and Semantic Information. arXiv preprint arXiv:2110.06100. (2021).
- [9] Xu, X., Dinkel, H., Wu, M., Xie, Z., & Yu, K. Investigating local and global information for automated audio captioning with transfer learning. In ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) pp. 905-909 (2021).
- [10] K. Papineni, S. Roukos, T. Ward, and W.-J. Zhu, “BLEU: a Method for Automatic Evaluation of Machine Translation,” (2002).
- [11] C.-Y. Lin, “ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries,” (2004)
- [12] S. Banerjee and A. Lavie, “METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments,” (2005).

- [13] R. Vedantam, V. Tech, C. L. Zitnick, D. Parikh, and V. Tech, "CIDEr: Consensus-based Image Description Evaluation," (2014).
- [14] "Semantic Textual Similarity for the Greek language using Transformers and Transfer Learning" <https://huggingface.co/lighteternal/stsb-xlm-r-greek-transfer>
- [15] N. Reimers and I. Gurevych, "Making Monolingual Sentence Embeddings Multilingual using Knowledge Distillation," (2020).

## **Ένα πρότυπο διαδικτυακό παιχνίδι για τη συλλογή δειγμάτων ομιλίας με σήμανση συναισθηματικού φορτίου**

Ε. Σιαμτανίδου      Ν. Βρύζας      Λ. Βρύσης      Σ. Μαρίνα      Χ. Δημούλας  
Υπ. Δρ.      Μεταδρ. Ερευν.      Μεταδρ. Ερευν.      Υπ. Δρ.      Αναπλ. Καθηγ.  
[siamtane@auth.gr](mailto:siamtane@auth.gr)      [nvryzas@auth.gr](mailto:nvryzas@auth.gr)      [lvrysis@auth.gr](mailto:lvrysis@auth.gr)      [mstamat@auth.gr](mailto:mstamat@auth.gr)      [babis@auth.gr](mailto:babis@auth.gr)

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάδειξη των θετικών παραμέτρων και των δυνατοτήτων χρήσης των σοβαρών παιχνιδιών και των τεχνολογιών παιχνιδιοποίησης ως ένα μέσο διασκέδασης, άτυπης εκπαίδευσης και συνεισφοράς στον επιστημονικό κόσμο. Η έμφαση δίνεται στα Συστήματα Αναγνώρισης Συναισθήματος Ομιλίας (Speech Emotion Recognition – SER), που αποτελούν ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο, χρήσιμο και πλέον απαραίτητο εργαλείο τόσο στον κλάδο των τεχνολογιών, όσο και ως προς τις δυνατότητες επικοινωνίας και τα σχήματα αναπαράστασης της γνώσης. Συγκεκριμένα, για την εκπαίδευση, τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την περαιτέρω εξέλιξη και επέκταση των συστημάτων SER, απαιτείται ένας υψηλός αριθμός κατάλληλα επισημειωμένων αξιόπιστων δειγμάτων ηχογραφήσεων. Σε αυτή την κατεύθυνση, το διαδικτυακό παιχνίδι «Βάλε μια Φωνή» έρχεται να δώσει λύση ως προς την εύκολη συλλογή ηχογραφήσεων συναισθηματικά φορτισμένου λόγου, υιοθετώντας ένα μοντέλο πέντε διακριτών κλάσεων (αηδία, θυμός, λύπη, φόβος και χαρά). Βασικός στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η προσέλκυση ενός ευρύτερου κοινού, η χρήση του ως εκπαιδευτικό εργαλείο για την εκφορά συναισθηματικού λόγου μέσω διασκέδασης και της δημιουργία ενός συνεργατικού μοντέλου αμοιβαίου οφέλους ανάμεσα στους χρήστες του και τους ερευνητές αναγνώρισης ήχου.

### ***A prototype web-based game for crowdsourcing speech emotion recognition samples***

#### **ABSTRACT**

*This work investigates the possibilities of using serious games and gamification technologies as means of entertainment and informal education. The focus is on Speech Emotion Recognition Systems (SER), which can be a useful tool both in the industry and in the academia. Most commonly, SER systems rely on machine learning algorithms that require huge amounts of ground-truth data to be trained and achieve a decent performance. In this direction, the proposed game “Raise your Voice” anticipates to provide a game-based approach for collecting of emotionally loaded audio recordings, based on a five-class classification schema (anger, disgust, fear, happiness and sadness). The outmost target of the game is to attract a wider audience and collect data fast by providing also an entertaining experience.*

## Εισαγωγή

Η συναισθηματική έκφραση αποτελεί ένα σημαντικό σήμα επικοινωνίας, καθώς περιλαμβάνει την παραγλωσσική πληροφορία της ομιλίας, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς στοιχείων ως προς την προσωπικότητα και την κατάσταση του ομιλητή. Ως Αναγνώριση Συναισθήματος Ομιλίας (Speech Emotion Recognition – SER) ορίζεται η δυνατότητα εξαγωγής εκτιμήσεων σχετικά με τη συναισθηματική πληροφορία του προφορικού λόγου, που επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης των ηχητικών χαρακτηριστικών του σήματος ομιλίας. Τα περισσότερα συστήματα που περιλαμβάνουν τη δυνατότητα αναγνώρισης συναισθήματος ομιλίας βασίζονται σε τεχνικές μηχανικής και βαθιάς μάθησης, δηλαδή στην εκπαίδευση αλγοριθμικών συστημάτων μέσω παραδειγμάτων (learning by example). Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένας σημαντικός αριθμός δειγμάτων ομιλίας γνωστής συναισθηματικής φόρτισης, προκειμένου να είναι δυνατή η εκπαίδευση συστημάτων που θα αναγνωρίζουν καινούργια/άγνωστα σήματα [1].

Για τη συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων γνωστής συναισθηματικής φόρτισης αναπτύχθηκε ο ιστοχώρος [speechemotionrecognition.xyz](http://speechemotionrecognition.xyz) [2] στον οποίο πραγματοποιούνται ηχογραφήσεις με σήμανση συναισθήματος ομιλίας από εθελοντές, χρησιμοποιώντας πέντε διαφορετικές κλάσεις (αηδία, θυμός, λύπη, φόβος και χαρά). Η διαδικτυακή αυτή εφαρμογή λειτουργεί ως μέσο για τη συλλογή και διαχείριση τέτοιων δειγμάτων, διαμορφώνοντας ένα ψηφιακό αποθετήριο, δηλαδή μια βάση δεδομένων για τις πέντε διαφορετικές κλάσεις συναισθημάτων, που μπορούν να αξιοποιηθούν στην εκπαίδευση συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης. Παράλληλα, τα δείγματα αυτά μπορούν να χρησιμεύσουν για την περαιτέρω ανάλυση και μελέτη του προβλήματος, ανάλογα και με το πεδίο εφαρμογής. Η απουσία επιπλέον κινήτρων μπορεί να περιορίζει τον βαθμό ανταπόκρισης και συμμετοχής ενός πιο ευρέως κοινού εθελοντών που δε σχετίζονται με το ερευνητικό εγχείρημα, το οποίο είναι ένα ζητούμενο για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας διεύρυνσης του συνόλου των λαμβανόμενων δειγμάτων. Ένας επιπλέον προβληματισμός συνυφασμένος με τη διαδικασία πληθοπορισμού αφορά την ποιότητα και αξιοπιστία των ηχογραφήσεων.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να δώσει λύση στο συγκεκριμένο ζήτημα μέσα από την ανάπτυξη ενός σοβαρού παιχνιδιού (serious game), όπου οι χρήστες θα μετέχουν στη διαδικασία διασκεδάζοντας, ενώ παράλληλα θα έχουν ως κίνητρο την πιο πειστική και ρεαλιστική εκφορά των συναισθημάτων, ώστε να επιτύχουν τους στόχους του παιχνιδιού. Η επιλογή ενός οικείου σεναρίου, καθώς και στοιχείων ηχητικής διάδρασης (διάλογοι, ήχοι υποβάθρου κλπ.) στοχεύουν στην υποβοήθηση των χρηστών για την πιο πειστική εκφορά του συναισθηματικού λόγου.

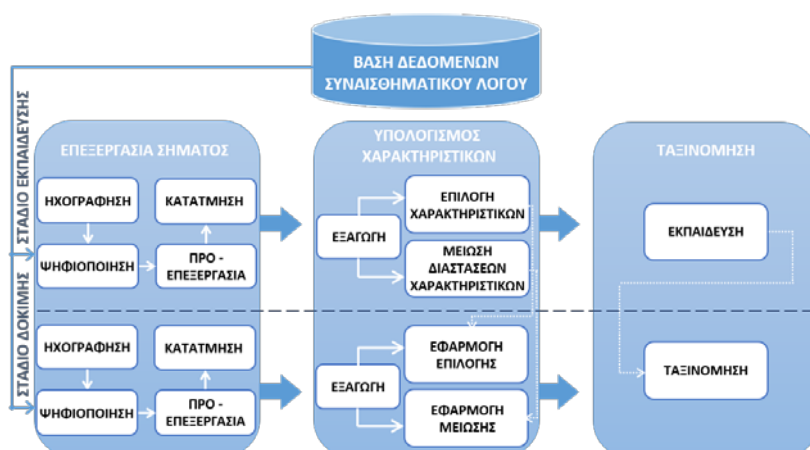
## 1. Θεωρητικό Πλαίσιο

### 1.1 Αναγνώριση Συναισθήματος Ομιλίας

Στην κοινωνική δικτύωση και τη διαμεσική επικοινωνία η έκφραση συναισθήματος αποτυπώνεται με διάφορους τρόπους, βάσει των χαρακτηριστικών του εκάστοτε καναλιού επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η έκφραση συναισθήματος στον γραπτό λόγο αναπαρίσταται με τη χρήση ψηφιακών εικονιδίων (emojicons),

ενώ στον προφορικό με τη συναισθηματική εκφορά της ομιλίας. Με άλλα λόγια, η διαδικασία αναγνώρισης και εξαγωγής συναισθηματικής πληροφορίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις αναπτυσσόμενες σημασιολογικές οντολογίες του διαδικτύου και κατά επέκταση αναμένεται να βελτιώσει τις δυνατότητες επικοινωνίας και τα σχήματα αναπαράστασης της γνώσης [1].

Τα συστήματα SER αποτελούνται από τρία κύρια μέρη: την επεξεργασία του σήματος (signal processing), τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών (feature calculation) και την ταξινόμηση (classification) (Σχήμα 1.1). Αναλυτικά, στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται η ψηφιοποίηση και η ακουστική προεπεξεργασία του καταγεγραμμένου ήχου και έπειτα ο διαμερισμός του σήματος εισόδου σε σημαντικές μονάδες. Στη συνέχεια ακολουθεί το δεύτερο μέρος, σκοπός του οποίου είναι να εντοπιστούν οι ιδιότητες εκείνες των ψηφιοποιημένων ηχητικών σημάτων που διακρίνονται από συναισθήματα και η αναπαράστασή τους σε διάνυμα χαρακτηριστικών γνωρισμάτων (feature vector). Στο τελευταίο μέρος κατατάσσεται η ταξινόμηση, έργο της οποίας αποτελεί ο διαμοιρασμός και η κατηγοριοποίηση των χαρακτηριστικών του ηχητικού σήματος σε μια συναισθηματική μονάδα [3].



Σχήμα 1.1 Σύστημα αναγνώρισης συναισθημάτων μέσω ομιλίας [3].

Για την καλύτερη απόδοση, λειτουργία και ανάπτυξη των συστημάτων SER απαραίτητη καθίσταται η παροχή μιας αξιόπιστης και μεγάλης βάσης δεδομένων. Η γενική έκφραση των συναισθημάτων και οι ειδικές σχέσεις μεταξύ των ακουστικών παραμέτρων μπορούν να γίνουν γνώριμα μόνο μέσα από μια σειρά αντιπροσωπευτικών παραδειγμάτων. Όσο οι ηχογραφήσεις συναισθηματικής ομιλίας είναι πολλές σε αριθμό και ποιοτικές για τον εκπαιδευόμενο ταξινομητή (trained classifier), τόσο περισσότερο συμβάλουν αποτελεσματικά στον τομέα της κατάρτισης (training corpora) [3].

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως, λαμβάνοντας υπόψη τις εξελεγμένες και ολοένα αναπτυσσόμενες δυνατότητες που παρέχουν οι τεχνολογίες μηχανικής και βαθιάς μάθησης, τα συστήματα και τα λογισμικά με τη χρήση και την αξιοποίηση του SER έχουν γίνει ξανά επίκαιρα, καθώς οι υπάρχουσες σχετικές λύσεις είναι περιορισμένες σε αριθμό, ενώ παράλληλα επιδέχονται σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι το συγκεκριμένο ζήτημα είναι από τη

φύση του αρκετά περίπλοκο και απαιτητικό. Αναλυτικά, όσον αφορά το πεδίο της μηχανικής μάθησης, οι ιδιαιτερότητες που προκύπτουν από τις τεχνολογίες SER αφορούν την εγγενή ασάφεια του ζητήματος της συναισθηματικής έκφρασης. Με άλλα λόγια, από το σύστημα ταξινόμησης που ακολουθείται απουσιάζει η ενότητα. Για τον λόγο αυτό, οι προσεγγίσεις στον τομέα του SER αφορούν είτε την αντιμετώπισή του ως ένα πρόβλημα ταξινόμησης που κατηγοριοποιεί θεμελιώδη συναισθήματα για τα οποία όμως παρατηρείται απουσία καθολικής συμφωνίας ως προς τη διάκριση και ύπαρξη συγκεκριμένων συναισθημάτων, είτε και ως ένα πρόβλημα παλινδρόμησης, που στοχεύει στην απόδοση μιας τιμής σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο σύστημα αξόνων [1].

Το πρόβλημα εντοπισμού, ταυτοποίησης και ταξινόμησης συναισθημάτων στην ομιλία δεν αφορά μόνο τις τεχνικές μηχανικής και βαθιάς μάθησης, καθώς ακόμα και η ανθρώπινη αντίληψη παρουσιάζει περιορισμούς στην αναγνώριση του εκφερόμενου συναισθήματος. Σχετικές έρευνες έχουν δείξει ότι υπάρχουν σημαντικές διχογνωμίες κατά την υποκειμενική αξιολόγηση και επισήμειωση σχετικών δειγμάτων φωνής. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά μέσης απόδοσης, όπου παρατηρείται συμφωνία ταξινόμησης μεταξύ των συμμετεχόντων, δεν ξεπερνούν το 60% με 65% (εκτός κι αν γίνεται λόγος για κάτι αρκετά απλό που δεν συναντάται συχνά στον πραγματικό κόσμο) [4]-[5].

Οι προσπάθειες που έχουν γίνει ως προς τη διερεύνηση, τη βελτίωση και την ανάπτυξη του επιστημονικού τομέα της Αναγνώρισης Συναισθηματικού Λόγου έχουν συμβάλει σημαντικά και ενθαρρυντικά στην εξέλιξή του. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί και αξιολογηθεί πολλοί μηχανισμοί εξαγωγής μεταβλητών περιεχομένου (features), οι οποίοι πρώτα αντλήθηκαν από διάφορες αξιόπιστες μονάδες δεδομένων συναισθηματικού λόγου, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και διαφορετικά σχήματα ταξινόμησης μηχανικής μάθησης για τη διάκριση συναισθηματικών καταστάσεων. Η Δυναμική Βάση Δεδομένων Υποκρινόμενης Συναισθηματικής Ομιλίας (Acted Emotional Speech Dynamic Database – AESDD) περιέχει ηχογραφημένες φράσεις υποκρινόμενου συναισθηματικού λόγου στην ελληνική γλώσσα για πέντε διακριτές συναισθηματικές καταστάσεις (θυμός, φόβος, αηδία, χαρά και λύπη). Το AESDD χαρακτηρίζεται ως δυναμική βάση δεδομένων, καθώς η αρχική του έκδοση βασίζεται στη συνεχή εξέλιξη, δηλαδή στην επακόλουθη προσθήκη/συμπερίληψη περισσότερων εκφωνήσεων μέσω πληθοπορισμού (crowdsourcing) [6]. Ο ιστοχώρος [speechemotionrecognition.xyz](http://speechemotionrecognition.xyz) δημιουργήθηκε για την προώθηση και την επέκταση του AESDD, για τη συλλογή και τη διαχείριση ηχογραφήσεων με σήμανση συναισθήματος ομιλίας και τέλος για να λειτουργεί ως ένα ψηφιακό αποθετήριο.

## *1.2 Σοβαρά Παιχνίδια & Τεχνολογίες Παιχνιδοποίησης*

Λαμβάνοντας υπόψη πως, τα συστήματα SER μπορούν να αποδειχθούν χρήσιμα και να αξιοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών, απαραίτητη καθίσταται η ανάπτυξη και η εξέλιξή τους, αποσκοπώντας συγκεκριμένα στη διεύρυνση μιας αξιόπιστης βάσης δεδομένων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων των τεχνολογιών SER αποτελούν οι υπηρεσίες αναγνώρισης συναισθήματος σε εφαρμογές διαμεσικής επικοινωνίας και εκπαίδευσης, σε μορφές διαδραστικής και παραστατικής τέχνης, στην εκπαίδευση δημοσιογράφων και ευρύτερα παρουσιαστών ως προς το ύφος και τα παραγλωσσικά στοιχεία εκφοράς

λόγου ανάλογα με το εκπεμπόμενο συναίσθημα, στην αναγνώριση συναισθημάτων που παραπέμπουν σε επιθετική γλώσσα ή/και ρητορική μίσους κ.ά. [1]

Η συγκέντρωση ποιοτικών και ρεαλιστικών ηχογραφήσεων ομιλίας με συναισθηματικό φορτίο, είναι ένα αναγκαίο στάδιο, για τη βελτίωση της ευρωστίας των συστημάτων SER που απαιτείται για την αξιοποίησή τους σε πραγματικές εφαρμογές. Σύμφωνα με αυτό το σκεπτικό, θα μπορούσε να αποδειχθεί ενδιαφέροντα και παράλληλα χρήσιμη η εύρεση και η ανάπτυξη μιας προσέγγισης/λύσης που θα αφορά τη διαρκή συλλογή πειστικών ηχογραφήσεων με σήμανση συναισθήματος ομιλίας, μέσα από τεχνικές και εφαρμοσμένα εργαλεία που επικεντρώνονται στην ψυχαγωγία και τη διασκέδαση, που εστιάζουν στη βέλτιστη αξιοποίηση του χρήστη και που προάγουν μαθησιακές διαδικασίες και παιδαγωγικές μεθόδους άτυπης εκπαίδευσης. Ως αντίστοιχες τεχνικές και εφαρμοσμένα εργαλεία, η παρούσα έρευνα υποδεικνύει τα σοβαρά παιχνίδια και τις τεχνολογίες παιχνιδοποίησης.

Τα σοβαρά ηλεκτρονικά παιχνίδια αποτελούν μια δραστηριότητα όπου ο παίκτης καλείται να συμμετάσχει σε ένα περιβάλλον εξομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει κανόνες και προκλήσεις, προκειμένου να επιτευχθεί ένας προκαθορισμένος στόχος. Στοιχεία όπως οι οπτικοακουστικές ψηφιακές πληροφορίες, ο ανταγωνισμός, η σημαντικότητα αποφυγής λάθους, η ταχύτητα και ο κίνδυνος, καθιστά τα σοβαρά ηλεκτρονικά παιχνίδια δελεαστικά και εντυπωσιακά, κινητοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την προσοχή του χρήστη και παράλληλα διεγείροντας το ενδιαφέρον και την ενασχόληση του με το παιχνίδι [7].

Η παιχνιδοποίηση σχετίζεται με την αξιοποίηση στοιχείων σχεδιασμού παιχνιδιών σε μια δραστηριότητα, η οποία τις περισσότερες φορές δεν αποτελεί παιχνίδι, προκειμένου να παρακινήσει, να αυξήσει και να διατηρήσει το ενδιαφέρον και την προσοχή των ατόμων που συμμετέχουν σε αυτή. Συνώνυμη λέξη της παιχνιδοποίησης θεωρείται η ανταμοιβή, καθώς οι περισσότερες εφαρμογές επικεντρώνονται στην προσθήκη πόντων, επιπέδων, βαθμολογικών πινάκων, επιτευγμάτων κ.ά. [8].

## **2. Διαδικτυακό Παιχνίδι «Βάλε μια Φωνή»**

Η επιδίωξη συλλογής ποιοτικών και αξιόπιστων ηχογραφήσεων ομιλίας με σήμανση συναισθήματος αλλά και η προσπάθεια της βέλτιστης διαχείρισής τους για την επίτευξη της αποτελεσματικότερης χρήσης τους στην εκπαίδευση ευφών συστημάτων SER και σε ευρύτερες εφαρμογές αναγνώρισης ομιλίας οδήγησε στην εκμετάλλευση των τεχνολογιών των σοβαρών παιχνιδιών και της παιχνιδοποίησης. Αυτό ακριβώς αποτέλεσε και το κίνητρο για τον σχεδιασμό και τη δημιουργία του διαδικτυακού παιχνιδιού «Βάλε μια Φωνή», το οποίο βρίσκεται διαθέσιμο στον ιστοχώρο: <https://spechemotionrecognition.xyz/game>

Αρχικά, πρόκειται για ένα ψηφιακό παιχνίδι στατικών οθονών – καρτών. Η ροή του παιχνιδιού περιλαμβάνει την εξιστόρηση διάφορων γεγονότων, κατά τη διάρκεια των οποίων εμφανίζονται στον χρήστη εικόνες που του ζητούν να έχει κάποιο ρόλο στη ροή της ιστορίας, απαγγέλλοντας/ηχογραφώντας συγκεκριμένες φράσεις με διαφορετικό κάθε φορά συναίσθημα, σύμφωνα με τις πέντε (5) κλάσεις που έχουν ορισθεί προηγουμένως (αηδίας, θυμού, λύπης, φόβου ή χαράς), ανάλογα με το αντίστοιχο σενάριο. Συγκεκριμένα, η ιστορία του ψηφιακού παιχνιδιού



διαδραματίζεται στη λαϊκή αγορά, όπου ο παίκτης έρχεται αντιμέτωπος με διάφορους πωλητές, στους οποίους πρέπει κάθε φορά να δώσει μια απάντηση, εκφράζοντας τη γνώμη του σχετικά με τα προϊόντα που διαθέτουν ή και με αυτά που δοκιμάζει ο ίδιος. Για να ολοκληρωθεί το παιχνίδι ο χρήστης καλείται να απαγγείλει/ηχογραφήσει την απάντηση που δίνει στους πωλητές, με ένα από τα πέντε (5) συναισθήματα που του ζητείται σε κάθε επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό, αξίζει να σημειωθεί πως, αν και η υπόθεση του παιχνιδιού φαίνεται να είναι η ίδια, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλών διαφορετικών σεναρίων/διαδράσεων, έχοντας ως βάση τις αντίστοιχες εικόνες εξιστόρησης.

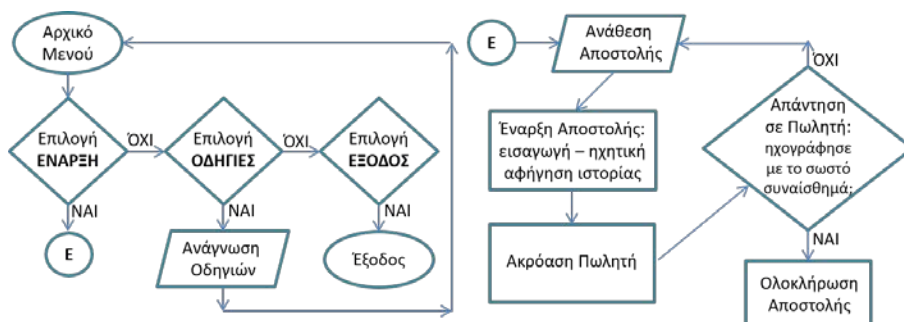
Η στόχευση αυτού του ψηφιακού παιχνιδιού είναι διττή, καθώς από τη μια πλευρά το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην άτυπη εκπαίδευση μέσω της διασκέδασης του χρήστη, ενώ από την άλλη εξασφαλίζεται η συγκέντρωση αξιόπιστων ηχογραφήσεων/φράσεων με σήμανση συναισθήματος για τη διεύρυνση της βάσης δεδομένων των συστημάτων SER. Εξετάζοντας διεξοδικά τους στόχους, ως αφετηρία τίθεται η προσέλκυση του ενδιαφέροντος και της προσοχής του κοινού/παικτών ως προς την ενασχόλησή τους με ένα νέο ψηφιακό παιχνίδι. Έπειτα, μέσα από το διαδραστικό περιβάλλον και τα οπτικοακουστικά ερεθίσματα που λαμβάνει ο χρήστης, αυξάνεται η αίσθηση της συμμετοχής και επιτυγχάνεται η εμπύθυσή του στον ψηφιακό κόσμο [7]. Επομένως, μέσα από την ταύτιση του παίκτη με τον ρόλο που διαδραματίζει στο παιχνίδι, επιδιώκεται η πειστική και ρεαλιστική εκφορά του συναισθηματικού λόγου. Επίσης, το ψηφιακό παιχνίδι προτείνεται ως ένα εκπαιδευτικό εργαλείο άτυπης μάθησης για δημοσιογράφους, παρουσιαστές και ηθοποιούς, καθώς αποσκοπεί στην εξάσκηση του ομιλητή, όσον αφορά τη σωστή συναισθηματική εκφορά ομιλίας, στη διαχείριση της ίδιας της συναισθηματικής του κατάστασης και στη βελτίωση, στη σωστή επικοινωνία και στην ανάπτυξη του ψηφιακού του γραμματισμού. Παράλληλα, όπως αναφέρθηκε, επιχειρείται η συγκέντρωση μεγαλύτερου όγκου ηχογραφήσεων και πιο αξιόπιστων δεδομένων με σήμανση συναισθηματικής ομιλίας για την επέκταση και τη βελτίωση των συστημάτων και αυτοματισμών SER. Τέλος, η παρούσα πρόταση εστιάζει στη δημιουργία και την εφαρμογή ενός συνεργατικού μοντέλου αμοιβαίου οφέλους, μεταξύ των στοχευμένων χρηστών της εφαρμογής και των ερευνητών αναγνώρισης ήχου.

Το παιχνίδι που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη εργασία δημιουργήθηκε σύμφωνα με τα τέσσερα στάδια υλοποίησης πολυμεσικών εφαρμογών: ανάλυση, σχεδίαση, ανάπτυξη και αξιολόγηση. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να δοθεί βάση σε ορισμένες εργασίες κατά τα διάφορα στάδια της πολυμεσικής παραγωγής.

Αρχικά, η ομάδα στόχος (target group), στην οποία απευθύνεται η εφαρμογή ως ένα εργαλείο άτυπης εκπαίδευσης, αφορά δημοσιογράφους, παρουσιαστές, ηθοποιούς και γενικά άτομα του καλλιτεχνικού χώρου. Ταυτόχρονα όμως, δεν αποκλείεται από αυτό το ευρύ κοινό, καθώς προτείνεται ως ένα παιχνίδι διασκέδασης. Με τον αντίστοιχο τρόπο σχεδιάστηκαν και τα σενάρια χρήσης της παρούσας εφαρμογής, τα οποία βασίστηκαν από τη μία στην εκπαιδευτική αξιοποίηση του παιχνιδιού, ενώ από την άλλη στο καθαρά διασκηδαστικό κομμάτι.

Για την ανάπτυξη του παιχνιδιού εφαρμόστηκε το αστεροειδές μοντέλο ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού (LUCID), βάσει του οποίου όλες οι λειτουργίες της εφαρμογής σχεδιάστηκαν από την οπτική του χρήστη, με στόχο τη μέγιστη αποτελεσματικότητα, εξυπηρέτηση και ευκολία εκμάθησης [9]. Στο Σχήμα 2.1

παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής και διασύνδεσης των βασικών οθονών, ή διαφορετικά ο χάρτης πλοήγησης του παιχνιδιού.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής παιχνιδιού «Βάλε μια Φωνή».

Το παιχνίδι αναπτύχθηκε και διατίθεται ως διαδικτυακή εφαρμογή. Το στήσιμο του περιβάλλοντος έχει γίνει με χρήση HTML και CSS, ενώ οι διαδράσεις εντός του παιχνιδιού υποστηρίζονται με γλώσσα JavaScript. Η επικοινωνία με τον εξυπηρετητή για την καταχώρηση ηχογραφήσεων υλοποιείται μέσω γλώσσας php.



Σχήμα 2.2 Οθόνες παιχνιδιού «Βάλε μια Φωνή»: Εκφορά συναισθήματος χαράς (αριστερά) και αγδίας (δεξιά), με χρήση κίτρινου και πράσινου χρώματος αντίστοιχα

Όσον αφορά τη διάδραση του χρήστη με τη βασική ροή του παιχνιδιού, αυτή γίνεται μέσω οπτικοακουστικών ερεθισμάτων. Συγκεκριμένα, οι εισαγωγικές οθόνες αφήγησης και οι οθόνες των πωλητών, με τους οποίους καλείται να αλληλεπιδράσει ο χρήστης, του παρέχουν εξολοκλήρου ηχητικές πληροφορίες. Ο παίκτης πρέπει να συγκεντρωθεί στην πρόσληψη των ηχητικών στοιχείων μέσω της ακοής, διαδικασία που βοηθάει στη διατήρηση της προσοχής, στην απελευθέρωση της φαντασίας και στην εμπύθιση στον κόσμο του παιχνιδιού [10]. Για τη βέλτιστη εκφορά συναισθηματικού λόγου, χρησιμοποιήθηκαν και οπτικά ερεθίσματα. Αναλυτικά, η ύπαρξη ενός χρωματικού κώδικα μπορεί να διευκολύνει την παραγωγή συναισθηματικής ομιλίας. Κατά αυτόν τον τρόπο, η σχεδίαση των καρτελών που καλούν τον παίκτη να εκφέρει ένα συγκεκριμένο συναίσθημα, περιλαμβάνουν το χρώμα που αντιστοιχεί στο συναίσθημα που ζητείται, όπως κίτρινο για χαρά, πράσινο για αγδία, κόκκινο για θυμό κ.ά. (Σχήμα 2.2) [1].

### 3. Μελλοντική Ανάπτυξη

Οι μελλοντικές επεκτάσεις της διαδικτυακής εφαρμογής που παρουσιάζεται, αναφέρονται στον σχεδιασμό και την ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων που θα βοηθήσουν τόσο στην προσέλκυση του ενδιαφέροντος, όσο και στη βέλτιστη εμπύθιση και μέγιστη δυνατή ταύτισή του παίκτη με τον ήρωα και το σενάριο του παιχνιδιού και άρα στην ποιοτικότερη εκφορά συναισθηματικού λόγου. Αρχικά, βάσει των τεχνολογιών παιχνιδοποίησης, στο τέλος του παιχνιδιού αναμένεται να ενσωματωθεί βαθμολογικός πίνακας (σκορ) που θα αφορά την απόδοση του παίκτη ως προς την εκφορά του κάθε συναισθήματος. Έπειτα, ενδέχεται η σχεδίαση και κατά επέκταση η επιλογή περισσότερων ηρώων (αγόρι ή κορίτσι). Τέλος, για την ολοκλήρωση του παιχνιδιού θα εφαρμοστεί η δυνατότητα παροχής στον χρήστη των ηχογραφήσεών του.

### 4. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Βρύζας, Ν. «Αυτοματισμοί ανάλυσης και διαχείρισης οπτικοακουστικών ροών στα ψηφιακά μέσα και τη διαμεσική επικοινωνία» Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (2020).
- [2] Vryzas, N., Vrysis, L., Kotsakis, R., & Dimoulas, C. «A web crowdsourcing framework for transfer learning and personalized speech emotion recognition» *Machine Learning with Applications*, **6**, 100132 (2021).
- [3] Vogt, T. «Real-time automatic emotion recognition from speech: The recognition of emotions from speech in view of real-time applications» Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften (2011).
- [4] Haq, S., & Jackson, P. J. «Multimodal emotion recognition» In *Machine audition: principles, algorithms and systems*, IDI Global, pp. 398-423 (2011).
- [5] Vryzas, N., Kotsakis, R., Liatsou, A., Dimoulas, C., & Kalliris, G. «Speech emotion recognition for performance interaction» *Journal of the Audio Engineering Society*, **66(6)**, pp. 457-467 (2018).
- [6] Vryzas, N., Vrysis, L., Kotsakis, R., & Dimoulas, C. «Speech emotion recognition adapted to multimodal semantic repositories» In *2018 13th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP)*, IEEE, pp. 31-35 (2018).
- [7] Κόμης, Β. Ι. *Εισαγωγή στις εκπαιδευτικές εφαρμογές των τεχνολογιών της πληροφορίας και των επικοινωνιών* Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών Αθήνα (2004).
- [8] Katsaounidou, A., Vrysis, L., Kotsakis, R., Dimoulas, C., & Veglis, A. MAtHE the game: A serious game for education and training in news verification *Education Sciences*, **9(2)**, 155 (2019).
- [9] Αβούρης, Ν., Κατσάνος, Χ., Τσέλιος, Ν., & Μουστάκας, Κ. *Εισαγωγή στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή* Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Αθήνα (2015).
- [10] Röber, N., & Masuch, M. «Playing Audio-only Games: A compendium of interacting with virtual, auditory Worlds» *DiGRA'05 - Proceedings of the 2005 iGRA International Conference* (2005).

## **Αναγνώριση Κατηγορίας Νοητικής Έκπτωσης μέσω Χαρακτηριστικών Ομιλίας**

Δημήτριος Καβελίδης Φραντζής, Εμμανουήλ Τσαρδούλιας, Θωμάς Καρανικιώτης, Ελένη Πόπτη, Μάγδα Τσολάκη, Ανδρέας Λ. Συμεωνίδης

1. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
2. Ελληνική εταιρεία Νόσου Alzheimer και Συναφών Διαταραχών (Alzheimer Hellas), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

[kavelids@ece.auth.gr](mailto:kavelids@ece.auth.gr), [etsardou@ece.auth.gr](mailto:etsardou@ece.auth.gr), [thomas.karanikiotis@issel.ee.auth.gr](mailto:thomas.karanikiotis@issel.ee.auth.gr),  
[ropstsielena@gmail.com](mailto:ropstsielena@gmail.com), [tsolakim1@gmail.com](mailto:tsolakim1@gmail.com), [symeonid@ece.auth.gr](mailto:symeonid@ece.auth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα μελέτη αφορά την ταξινόμηση ομιλητή σε προκαθορισμένες κατηγορίες νοητικής κατάστασης με χρήση Μηχανικής Μάθησης, προκειμένου να αναπτυχθεί μία νέα, απλή και εύκολη μέθοδος διάγνωσης. Οι συμμετέχοντες ήταν 84, χωρισμένοι σε Νοητικά Υγιή άτομα, άτομα με Υποκειμενική Νοητική Εξασθένηση, και άτομα με Πρώιμη (Early) και Ώψιμη (Late) Ήπια Νοητική Διαταραχή. Συλλέχθηκαν δεδομένα ομιλίας από δομημένες συνεντεύξεις με αυξανόμενο επίπεδο νοητικής δυσκολίας. Εξήχθησαν χαρακτηριστικά βασισμένα στις Παύσεις, την Προσωδία και τις Μηδενικές Διελεύσεις, καθώς και στις διαφορές των χαρακτηριστικών μεταξύ των σταδίων. Τα χαρακτηριστικά αξιολογήθηκαν από ταξινομητές Τυχαίου Δάσους, Δέντρων απόφασης και Μηχανών Διανυσμάτων Υποστήριξης (ΜΔΥ). Η καλύτερη ταξινόμηση επιτεύχθηκε με μοντέλα που εκπαιδεύτηκαν χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά διαφορών σταδίων σε ταξινομητές ΜΔΥ, πετυχαίνοντας μέση ακρίβεια  $80.99 \pm 3.29\%$ .

### **Cognitive decline detection using speech features: A machine learning approach**

#### **ABSTRACT**

In this study, the validity of a Machine Learning multiclass classification process is examined, as to classify a speaker in a cognitive decline stage, aiming to develop a simple screening test. The target classes comprise Cognitively Healthy controls, Subjective Cognitive Decline and Early & Late Mild Cognitive Impairment. Speech data was collected from structured interviews on 84 people, split in stages of increasing required levels of cognitive difficulty. Audio features were extracted based on Silence, Prosody and Zero-Crossings, as well as on the feature vectors' differences between stages, and were evaluated with the Random Forest, Extra-Trees and Support Vector Machines classifiers. The best classification was achieved using models trained with stage differences features (on SVM), resulting in a mean accuracy of  $80.99 \pm 3.29\%$ .

## Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αφορούν την υγεία στην σημερινή κοινωνία είναι η ολοένα και αυξανόμενη εμφάνιση της άνοιας σε ένα σημαντικό ποσοστό του πληθυσμού. Ο όρος άνοια χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύνολο νοητικών διαταραχών που προκαλούνται από συγκεκριμένες νόσους που προσβάλλουν τον εγκέφαλο, προκαλώντας νευροεκφύλιση και νοητικές ελλείψεις μεγαλύτερες από την αναμενόμενη φυσιολογική έκπτωση που παρουσιάζεται στο γήρας. Η Νόσος Alzheimer (AD) είναι η πιο συχνή αιτία/νόσος που προκαλεί άνοια και αποτελεί την 3<sup>η</sup> αιτία θανάτου παγκοσμίως. Η πρόωμη διάγνωση σε όσο το δυνατόν πιο αρχικό στάδιο, αποτελεί κοινό στόχο της παγκόσμιας κοινότητας. Ωστόσο, οι τρόποι διάγνωσης περιλαμβάνουν συνεργασία ειδικών επιστημόνων και δαπανηρών παρεμβατικών ή μη εξετάσεων, καθώς συχνά απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την κλινική εξέταση, αιματολογικές και νευροαπεικονιστικές εξετάσεις, παρουσία ειδικών επαγγελματιών υγείας για την διεκπεραίωση των απαραίτητων διαδικασιών, καθώς και χρόνος τόσο από τους εξεταζόμενους όσο και από τους επιστήμονες υγείας. Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα προσανατολίζεται στην εύρεση λύσεων για το παραπάνω πρόβλημα, εκμεταλλευόμενοι ένα νοητικό έλλειμμα που σχετίζεται με την παραγωγή του λόγου που συχνά εμφανίζουν τα άτομα με νοητική έκπτωση. Η Υποκειμενική Νοητική Εξασθένιση (YNE ή SCD) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει άτομα που αν και δεν εμφανίζουν μετρήσιμα ελλείμματα σύμφωνα με στοιχειώδεις κλίμακες μέτρησης της νοητικής έκπτωσης, ωστόσο ανησυχούν σε σημαντικό βαθμό για τις νοητικές τους ικανότητες, υποστηρίζοντας ότι έχουν νοητική απώλεια. Η Ήπια Νοητική Διαταραχή (HNΔ ή MCI) αποτελεί ένα ενδιάμεσο μεταβατικό στάδιο μεταξύ του φυσιολογικού γήρατος και της άνοιας, και χαρακτηρίζεται από μεγάλη πιθανότητα μετάπτωσης σε Άνοια με το πέρασμα των ετών. Η Πρωτοβουλία Νευροαπεικόνισης για τη Νόσο του Αλτσχάιμερ, πρόσφατα διαχώρισε την HNΔ σε δύο υποστάδια, την "Πρώιμη" (Early-MCI) και την "Όψιμη" (Late-MCI), σύμφωνα με την επίδοση του ατόμου στον τομέα της μνήμης επεισοδίων. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μία μεθοδολογία κατηγοριοποίησης ομιλητή στις τέσσερις παραπάνω κλάσεις (Healthy controls, SCD, E-MCI και L-MCI), με χρήση χαρακτηριστικών ομιλίας, αφού η βιβλιογραφία αναγνωρίζει νοητικά ελλείμματα που παρουσιάζονται στην παραγωγή του λόγου σε άτομα με νοητική έκπτωση.

### 1. Επισκόπηση ερευνητικής περιοχής

Έρευνες γύρω από ηχητικά χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με τη ροή του λόγου και τον τρόπο που το άτομο διστάζει ή κάνει παύσεις, καθώς και με τον τρόπο που αρθρώνει ή με την προσωδία σε όρους ακουστικών μέτρων (όπως αλλαγές στον ρυθμό, στον τόνο ή στις συχνότητες), έχουν ήδη βοηθήσει νέες μελέτες σχετικές με ταξινόμηση του ομιλητή να κάνουν φιλόδοξα βήματα στο χώρο. Συγκεκριμένα, η μελέτη του I.Hoffman το 2010 [1] εξετάζει τέσσερις χρονικές παραμέτρους της αυθόρμητης ομιλίας σε τρία στάδια της νόσου του Alzheimer (ήπια, μέτρια και σοβαρή) σε σύγκριση με συνομήλικα υγιή άτομα (controls): τον ρυθμό άρθρωσης, τον ρυθμό ομιλίας, την αναλογία δισταγμού και το ποσοστό γραμματικών λαθών. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικές διαφορές κυρίως όσον αφορά την αναλογία

δισταγμού. Σε άλλη παρόμοια μελέτη το 2014 [2] που ασχολείται με την ταξινόμηση ανάμεσα σε υγιή άτομα και σε άτομα με AD, τα βασικά ευρήματα ήταν ότι τα μέτρα της ομιλίας, όπως οι διακυμάνσεις στο ποσοστό των φωνητικών παύσεων, ο αριθμός των φωνητικών περιόδων, ο αριθμός των φωνητικών παύσεων, το shimmer (πηλίκιο διαταραχής πλάτους) και η αναλογία θορύβου προς αρμονικές (HNR), κατάφεραν να χαρακτηρίσουν τα άτομα με AD με ακρίβεια 84,8%. Το 2018, ο R.B. Ammar [3] εξήγαγε γλωσσικά χαρακτηριστικά από διαδικασίες εκφώνησης. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, με το προτεινόμενο μοντέλο να πετυχαίνει ταξινόμηση μεταξύ ασθενών με Alzheimer και υγιών ατόμων με ακρίβεια 79%. Το 2020, διεξήγε νέα μελέτη [4] όπου εξήγε τόσο γλωσσικά, όσο και χρονικά χαρακτηριστικά πετυχαίνοντας ακρίβεια ταξινόμησης πάνω από 90%. Στην παρούσα μελέτη, υλοποιείται διαδικασία ταξινόμησης του ατόμου σε τέσσερις κλάσεις (Healthy, SCD, E-MCI και L-MCI), με χρήση αρχείων ήχου, καταγεγραμμένα σε συνθήκες διπλού έργου (ταυτόχρονη κίνηση και λόγος), ούτως ώστε να ερευνηθεί το κατά πόσο το διπλό έργο μπορεί να ικανοποιήσει συνθήκες για καλύτερο διαχωρισμό.

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Συμμετέχοντες

Η συγκεκριμένη έρευνα υλοποιήθηκε στα πλαίσια συνεργασίας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ και της Εταιρείας Νόσου Alzheimer και Συγγενών Διαταραχών (Alzheimer Hellas), και συγκεκριμένα του Κέντρου Ημέρας "Αγία Ελένη". Στην έρευνα συμμετείχαν συνολικά 84 άτομα, με τα δημογραφικά στοιχεία τους όπως φαίνονται στον πίνακα 2.1. Η βαθμίδες εκπαίδευσης ήταν 1 για πρωτοβάθμια, 2 για δευτεροβάθμια και 3 για τριτοβάθμια εκπαίδευση, ενώ με F (Female) και M (Male) κωδικοποιούνται τα φύλα. Όλοι οι συμμετέχοντες έχουν διαγνωστεί από κάποιον ειδικό ψυχολόγο του Κέντρου και έχουν εξεταστεί με βάση κάποια νευροψυχολογική εκτίμηση κάνοντας κάποιο από τα επιβεβαιωμένα τεστ.

Πίνακας 2.1 Δημογραφικά στοιχεία συμμετεχόντων

Δημογραφικά	Healthy	SCD	E-MCI	L-MCI
n	18 (8/10)	19 (17/2)	33 (26/7)	14 (8/6)
Gender (F:M)	8:10	17:2	26:7	8:6
Mean Age (std)	59.33 (6.27)	69.73 (3.97)	71.94 (8.10)	74.78 (7.19)
Mean Education (std)	2.77 (0.43)	2.36 (0.68)	2.09 (0.76)	1.50 (0.76)

### 2.2 Ηχογραφήσεις

Κατόπιν ραντεβού και με την άφιξή τους στο Κέντρο, χορηγούνταν στους συμμετέχοντες μία σειρά ερωτήσεων/δοκιμασιών σε μορφή συνέντευξης έτσι ώστε να καταγραφούν τα δεδομένα ομιλίας τους με τη χρήση κινητού τηλεφώνου. Σύμφωνα με το πειραματικό πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε, η συνέντευξη αυτή είχε 5 διαφορετικά στάδια: Απλές αυτοβιογραφικές ερωτήσεις (καθήμενο άτομο),

ερωτήσεις κρίσεως (καθήμενο άτομο), απλές ερωτήσεις περιγραφής (περπάτημα σε τετράγωνο), ερωτήσεις κρίσεως (περπάτημα σε τετράγωνο) και ερωτήσεις κρίσεως (μοτίβο βημάτων: 3 μπροστά - 3 πίσω). Στόχος της ύπαρξης των παραπάνω σταδίων ήταν η σταδιακή αύξηση του απαιτούμενου νοητικού έργου από το άτομο. Έπειτα, οι ηχογραφήσεις του κάθε ατόμου χωρίστηκαν ανά ερώτηση, συγκεντρώνοντας συνολικά 1621 διαφορετικά αρχεία ομιλίας.

### 2.3 Εξαγωγή χαρακτηριστικών

Η εξαγωγή χαρακτηριστικών αναφέρεται στη διαδικασία μετατροπής ακατέργαστων δεδομένων σε χαρακτηριστικά που μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία διατηρώντας παράλληλα τις πληροφορίες στο αρχικό σύνολο δεδομένων. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, οι ηχογραφήσεις δεν έχουν ίδιο μέγεθος, επομένως εξήχθησαν χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν όλο το σήμα (global features). Τα χαρακτηριστικά που απαρτίζουν το αρχικό διάλυμα χαρακτηριστικών χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- **Χαρακτηριστικά Παύσεων:** Προκύπτουν με βάση τις παύσεις που έκανε το κάθε άτομο. Ο διαχωρισμός ανάμεσα στον λόγο και στις παύσεις, προκύπτει χρησιμοποιώντας ένα κατώφλι έντασης σε dBFS (Decibels relative to Full Scale). Τα δε αριθμητικά χαρακτηριστικά είναι στατιστικά μεγέθη που αφορούν τις παύσεις για την εκάστοτε ηχογράφιση όπως για παράδειγμα Συνολική Διάρκεια Παύσεων/Ομιλίας (Π/Ο), Μέση Διάρκεια Π/Ο, Τυπική Απόκλιση Διάρκειας Π/Ο καθώς και λόγοι των παραπάνω μεγεθών μεταξύ τμημάτων Π/Ο.

- **Χαρακτηριστικά Προσωδίας:** Προσωδία είναι ο ρυθμός, ο τόνος και ο επιτονισμός της ομιλίας καθώς και άλλα ακουστικά χαρακτηριστικά. Μελέτες που αφορούν την αυτόματη διάγνωση φωνητικών παθήσεων έχουν χρησιμοποιήσει στοιχεία προσωδίας [5], δείχνοντας πως είναι συνδεδεμένη με έκπτωση στον λόγο. Τα χαρακτηριστικά που εξήχθησαν ήταν σχετικά με τον τόνο (pitch), την ένταση καθώς και τις ακουστικές παραμέτρους Jitter (τρέμουλο), το Shimmer (λαμπύρισμα) και το HNR (λόγος αρμονικού προς θόρυβο). Το jitter επηρεάζεται κυρίως από την έλλειψη ελέγχου της δόνησης των φωνητικών χορδών, ισχύουν γεγονός σε ασθενείς με παθολογίες, ενώ το shimmer σχετίζεται με την παρουσία εκπομπής θορύβου και αναπνοής. Το HNR είναι μια αξιολόγηση της αναλογίας μεταξύ περιοδικών και μη συνιστωσών που περιλαμβάνει ένα τμήμα ομιλίας.

- **Χαρακτηριστικά Μηδενικών Διελεύσεων:** Μηδενικές Διελεύσεις ή Zero-Crossings (ZC) ορίζεται ως ο αριθμός των φορών που ένα (ψηφιακό) σήμα διασχίζει το μηδέν και αυτό το χαρακτηριστικό έχει σκοπό να προσεγγίσει τη συχνότητα του σήματος. Τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις μηδενικές διελεύσεις αποδείχθηκαν ιδιαίτερης σημαντικότητας στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Όλα τα παραπάνω εξάγονται για κάθε αρχείο ηχογράφησης σε κάποιο στάδιο, δημιουργώντας ένα διάλυμα χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια δημιουργούνται νέα διανύσματα χαρακτηριστικών τα οποία προκύπτουν από όλες τις πιθανές διαφορές των διανυσμάτων χαρακτηριστικών μεταξύ των σταδίων. Σκοπός είναι να εξεταστεί αν αυτά τα νέα χαρακτηριστικά μπορούν να αποδώσουν καλύτερα την δυσκολία που μπορεί να έχει κάποιο άτομο που ανήκει σε συγκεκριμένη κατηγορία νοητικής έκπτωσης κατά τη μετάβασή του από ένα στάδιο της συνέντευξης σε ένα επόμενο. Τα

συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι τα **χαρακτηριστικά διαφορών σταδίων**.

### 3. Πειράματα - Αποτελέσματα

Σε όλα τα παρακάτω πειράματα γίνονται δοκιμές τόσο με, όσο και χωρίς, τα χαρακτηριστικά AEGS (Age, Education, Gender, Stress). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, συνήθως η διάγνωση σχετίζεται με την ηλικία, την εκπαίδευση αλλά και την ύπαρξη άγχους/κατάθλιψης, οπότε τα ποσοστά σωστής κατηγοριοποίησης αναμένονται υψηλότερα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται [εδώ](#).

#### 3.1 Πείραμα 1: Ταξινόμηση αρχικών χαρακτηριστικών ανά στάδιο

Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιούνται μοντέλα ταξινομητών για την ταξινόμηση των στιγμιοτύπων με βάση τα αρχικά χαρακτηριστικά (παύσεων, προσωδίας, zero-crossings). Για κάθε ένα από τα 5 στάδια της ηχογράφησης, στα οποία αντιστοιχεί ένα διαφορετικό σετ δεδομένων που τα αφορά, γίνεται ξεχωριστά η ταξινόμηση και ερευνάται η **ικανότητα διάκρισης του εκάστοτε ταξινομητή στο κάθε στάδιο**. Δοκιμάζονται 2 διαφορετικοί ταξινομητές, Επιπλέον Δένδρων (Extra Trees - ET) και Τυχαίου Δάσους (Random Forest - RF).

#### 3.2 Πείραμα 2: Ταξινόμηση αρχικών χαρακτηριστικών ανεξαρτήτως σταδίου

Στο συγκεκριμένο πείραμα γίνεται ταξινόμηση των αρχικών χαρακτηριστικών ανεξαρτήτως του σταδίου ηχογράφησης στο οποίο δημιουργήθηκαν, ώστε να εξεταστεί η ικανότητα ταξινόμησης από μία **τυχαία ηχογράφιση**.

#### 3.3 Πείραμα 3: Ταξινόμηση χαρακτηριστικών διαφορών μεταξύ σταδίων

Χρησιμοποιώντας τα 10 διαφορετικά διανύσματα χαρακτηριστικών διαφορών (2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 3-2, 4-2, 5-2, 4-3, 5-3, 5-4) που έχουν προκύψει από τα αρχικά 5 στάδια και καλύπτοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς διαφορών ανάμεσα στα αρχεία ηχογραφήσεων, εξετάζεται η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων στην αναγνώριση της κατηγορίας νοητικής έκπτωσης χρησιμοποιώντας ως απαίτηση από το άτομο **2 ερωτήσεις / δοκιμασίες από 2 διαφορετικά στάδια**. Στο συγκεκριμένο πείραμα καλύτερα απέδωσαν οι ταξινομητές Μηχανών Διανυσμάτων Υποστήριξης (Support Vector Machines - SVMs) πετυχαίνοντας μέση ακρίβεια 80.99%.

Πίνακας 3.1 Παρουσίαση καλύτερων αποτελεσμάτων

Πείραμα	Στάδιο / Διαφορά	Ταξινομητής	Μέση ακρίβεια
1	2	ET	68.4%
1 (+AEGS)	2	ET	85.8%
2	Όλα	ET	67.9%
2 (+AEGS)	Όλα	ET	91.3%
3	5-1	SVM	83.3%
3 (+AEGS)	5-2	SVM	95.4%



#### 4. Συμπεράσματα

Είναι σαφές από τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων πως η χρήση των χαρακτηριστικών διαφορών ενισχύει την απόδοση και την διακριτική ικανότητα. Ως καλύτερη μέθοδος ταξινόμησης αναδείχθηκε η χρήση του ταξινομητή SVM, στο τρίτο πείραμα, έχοντας ως διάνυσμα χαρακτηριστικών τις διαφορές του σταδίου 5 από το στάδιο 1 (83.3% μέση ακρίβεια, 95.4% με ενσωμάτωση χαρακτηριστικών AEGS). Όπως φαίνεται στα αναλυτικά αποτελέσματα, συνήθως άτομα από όλες τις κατηγορίες ταξινομούνται λανθασμένα ως E-MCI, που είναι και η πολυπληθέστερη κατηγορία, αλλά και άτομα στις κατηγορίες SCD και L-MCI.

#### 5. Μελλοντικές Προεκτάσεις

Το γεγονός ότι με τόσο μικρό αριθμό δεδομένων υπήρχαν τόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα καταδεικνύει τη δυναμική των χαρακτηριστικών και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκαν να πετύχουν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα σε μεγαλύτερα σετ δεδομένων. Παράλληλα, αυτός ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων, είναι σημαντικό να γίνει με περισσότερες κινητές συσκευές και σε περισσότερους χώρους ώστε να καλύπτεται το ακουστικό φάσμα όλων των ποιοτικά διαφορετικών ηχογραφήσεων. Τέλος, χρησιμοποιώντας διαφορετικές ηχογραφήσεις σαν είσοδο, ιδανική είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ταξινόμησης των καλύτερων ταξινομητών ανά στάδιο που αποφασίζουν με βάση την πλειοψηφία της πιο συχνά εμφανιζόμενης κατηγορίας (Majority Voting Ensemble System), με σκοπό την ενίσχυση της απόδοσης της ταξινόμησης και την διόρθωση λαθών.

#### 6. Αναφορές

[1] I. Hoffmann, D. Nemeth, C. D. Dye, M. Pákáski, T. Irinyi, and J. Kálmán, “Temporal parameters of spontaneous speech in alzheimer’s disease”, *Int. J. Speech Lang. Pathol.*, vol. 12, pp. 29–34 (2010).

[2] J. J. G. Meilán, F. Martínez-Sánchez, J. Carro, D. E. López, L. Millian-Morell, and J. M. Arana, “Speech in alzheimer’s disease: can temporal and acoustic parameters discriminate dementia?,” *Dement. Geriatr. Cogn. Disord.*, vol. 37, pp. 327–334 (2014).

[3] R. B. Ammar and Y. B. Ayed, Y. “Speech Processing for Early Alzheimer Disease Diagnosis: Machine Learning Based Approach” in *2018 IEEE/ACS 15th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, pp. 1-8 (2018).

[4] R. B. Ammar and Y. B. Ayed, “Language-related features for early detection of Alzheimer disease,” in *Knowledge-Based and Intelligent Information Engineering Systems: Proceedings of the 24th International Conference KES2020*, *Procedia Computer Science*, vol. 176, pp. 763–770 (2020).

[5] Z. I.C, R. Fagundes, T. Russomano, and D. Scolari, “Digital signal processing in the differential diagnosis of benign larynx diseases”, *Scientia Medica*, vol.16, pp. 109-114 (2006).

## Ευφυείς τεχνικές επεξεργασίας ηχητικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο για την ανίχνευση διαταραχών της ομιλίας σε ασθενείς με Πάρκινσον

Αναστάσιος Κων/νος Φωτάκης, Ευστάθιος Σιδηρόπουλος, Παναγιώτης Μπαμίδης  
Αναπτυξιακή Μελετητική Βορείου Ελλάδος (NGNC), Πυλαία, Ελλάδα  
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής και Ψηφιακής Καινοτομίας, ΑΠΘ, Ελλάδα  
[anastasisfo@gmail.com](mailto:anastasisfo@gmail.com), [stathsid@gmail.com](mailto:stathsid@gmail.com), [bamidis@med.auth.gr](mailto:bamidis@med.auth.gr)

### Εισαγωγή

*Η ασθένεια του Parkinson (PD) είναι μια εκφυλιστική ασθένεια του κεντρικού νευρικού συστήματος που επηρεάζει κυρίως το κινητικό σύστημα [1][7]. Επιπλέον προκαλεί εξασθένηση της φωνής στους ασθενείς σε ποσοστό άνω του 90%, κυρίως σε άτομα με ηλικία άνω των 50 ετών. Συγκεκριμένα η ομιλία των ατόμων που πάσχουν από τη συγκεκριμένη ασθένεια χαρακτηρίζεται από μειωμένη ένταση, βραχνάδα, ατελή άρθρωση, μειωμένο άγχος, σύντομες βιασύνες στον λόγο, δυσαρμονία και δυσκολία στην αναπνοή [1][7]. Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την αναγνώριση της νόσου μέσω της φωνής, χρησιμοποιώντας είτε τεχνικές μηχανικής μάθησης είτε νευρωνικά δίκτυα. Η εργασία αναδεικνύει την προσπάθεια να διαγνωστεί η νόσος σε πρώιμο στάδιο καθώς επίσης και τη χρήση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν τις τεχνικές μηχανικής μάθησης. Στα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν τα ποσοστά ακρίβειας εκτίμησης των τεχνικών μηχανικής μάθησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ομιλίας ατόμων με Parkinson. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δυο τεχνικές για την αναγνώριση των συμπτωμάτων της ασθένειας, τον μετασχηματισμό κυματιδίων(wavelet transform) σε συνδυασμό με την ανάλυση πολλαπλών επιπέδων(Multiresolution Analysis or MRA) και διάφορα χαρακτηριστικά της φωνής που θα αναλυθούν παρακάτω. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η πιθανή έγκαιρη διάγνωση της ασθένειας, έτσι ώστε να ξεκινήσει η αντιμετώπιση της.*

### 1. Μεθοδολογία

#### 1.1 Βάση Δεδομένων

Οι περισσότερες ανοιχτές βάσεις που υπάρχουν διαθέσιμες και αφορούν δεδομένα για την αναγνώριση συμβάντων ήχου (SER), διαθέτουν μια πληθώρα ηχογραφήσεων που απαιτούν συγκεκριμένη ανάλυση και επεξεργασία. Στη δική μας μελέτη χρησιμοποιήθηκε η ανοιχτή βάση δεδομένων του King's College London (KCL) Hospital, η οποία περιέχει 37 συμμετέχοντες χωρισμένους σε 2 κατηγορίες. Η πρώτη είναι η υγιής ομάδα και αποτελείται από 21 άτομα, ενώ η δεύτερη είναι η ομάδα των ατόμων με Parkinson και αποτελείται από 16 συμμετέχοντες [2].

#### 1.2 Λογισμικό Praat

Το λογισμικό Praat είναι ένα δωρεάν πρόγραμμα που διατίθεται σε όλες τις πλατφόρμες και χρησιμοποιείται για την επεξεργασία ηχητικών σημάτων. Μέσω του Praat εξήχθησαν 26 χαρακτηριστικά της φωνής, τα οποία και χωρίζονται σε έξι ομάδες [13]. Οι ομάδες διακρίνονται σε χαρακτηριστικά πλάτους, παλμού, συχνότητας, αρμονικών παραμέτρων και φωνητικού ύψους. Στόχος μας είναι να εστιάσουμε στις διάφορες που υπάρχουν ανάμεσα στις δύο ομάδες της βάσης δεδομένων σε πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να εντοπίσει αν το άτομο εμφανίζει συμπτώματα η όχι σε περιβάλλον εργαστηρίου.

### 1.3 Ανάλυση MRA

Επόμενο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα μας ήταν η ανάλυση MRA σε συνδυασμό με τον μετασχηματισμό κυματιδίων (wavelet transform or WT). Ο μετασχηματισμός κυματιδίων χρησιμοποιείται για την αποσύνθεση μιας συνάρτησης σε ένα σύνολο κυματομορφών. Η κάθε κυματομορφή είναι μια κυματοειδής ταλάντωση που εντοπίζεται στον χρόνο και χαρακτηρίζεται από 2 ιδιότητες: την κλίμακα και την τοποθεσία. Βασική ιδέα του μετασχηματισμού είναι η συνέλιξη ενός σήματος με ένα σύνολο κυματιδίων σε διάφορες κλίμακες. Ένα πολύ κοινό κυματίδιο στην επεξεργασία φωνής είναι το Daubechies 4 ('db4') [3]. Χρησιμοποιώντας την ανάλυση πολλαπλών επιπέδων (MRA), το σήμα αποσυντέθηκε σε ένα ορισμένο συχνοτικό επίπεδο με σκοπό να εντοπιστούν διαφορές στην περιοδικότητα του ηχητικού σήματος. Εξαιρέθηκαν τα πρώτα 2 συχνοτικά επίπεδα λόγω της πιθανότητας ενδεχόμενου θορύβου. Παρατηρήθηκε διαφορά στο 7ο συχνοτικό επίπεδο ανάμεσα στις 2 ομάδες της βάσης δεδομένων. Συγκεκριμένα το πλάτος του παλμού είναι υψηλότερο στα άτομα με Parkinson από ότι στα υγιή και το 'μοτίβο περιοδικότητας' αλλάζει σε κάθε ομάδα.

### 1.4 Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων, δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης «εκπαιδεύεται» από τα διαθέσιμα δεδομένα και προβλέπει την κατάσταση καινούργιων δεδομένων. Ο αλγόριθμος βασίστηκε σε πέντε συνολικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο χαρακτηριστικό από την ανάλυση MRA που είναι το μέγιστο πλάτος του ηχητικού σήματος στο 7<sup>ο</sup> συχνοτικό επίπεδο και τέσσερα χαρακτηριστικά της φωνής που εξήχθησαν μέσω του λογισμικού Praat, τα οποία είναι τα εξής: Median pitch, Maximum pitch, Mean period και jitter (ddp). Η βάση δεδομένων χωρίστηκε σύμφωνα με την βιβλιοθήκη sklearn της python σε 2 ομάδες. Το 75% των συνολικών δειγμάτων της βάσης θα αποτελεί το train set και είναι τα δείγματα με βάση τα οποία εκπαιδεύεται ο αλγόριθμος. Το 25% των συνολικών δειγμάτων χρησιμοποιείται ως test set και σε αυτό δοκιμάζεται η αξιοπιστία του αλγορίθμου. Εξαιτίας του μικρού δείγματος της βάσης δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική k-fold Cross Validation, όπου k ο αριθμός των ομάδων που χωρίζονται τα δείγματα της βάσης δεδομένων.

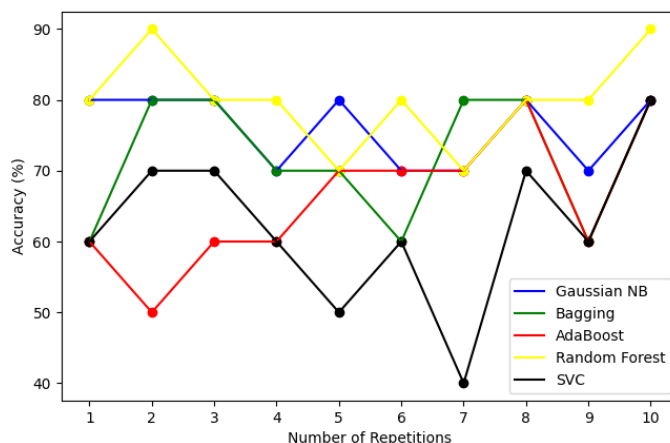
Διάφορες τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν και δοκιμάστηκαν με την υπάρχουσα βάση, τα αποτελέσματα των οποίων θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

### 1.5 Προηγούμενες έρευνες

Αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών έχουν δείξει πως διάφορες τεχνικές κατηγοριοποίησης, ανάλογα με τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, μπορούν να δώσουν αποτέλεσμα με αρκετά καλή ακρίβεια. Οι ερευνητές χρησιμοποιώντας σαν μοντέλα τα prosodic, glottal excitation και gaussian mixture κατάφεραν να επιτύχουν μέγιστο ποσοστό 88.1% στην δοκιμασία ‘ανάγνωσης κειμένου’[6]. Σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιώντας την τεχνική SVM το μέγιστο ποσοστό ακρίβειας, ανάλογα σε κάθε έρευνα, έφτασε στο 85.7%[9], 91%[11] και 80%[12] αντίστοιχα. Η τεχνική KNN πέτυχε αντίστοιχα ακρίβεια 93.82%[11], ενώ η μέθοδος DFB έφτασε το 82.20%[11] και τέλος η τεχνική Random Forrest είναι στο 83%[12].

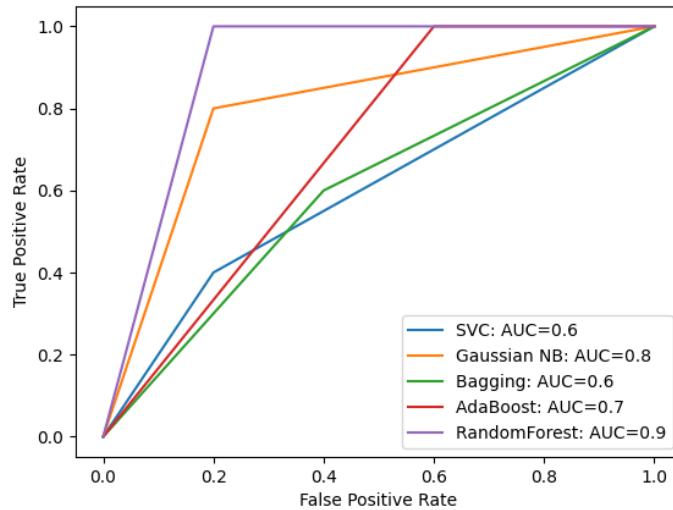
## 2. Αποτελέσματα

Συνολικά αναλύθηκαν πέντε τεχνικές. Για κάθε μια ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση grid search για την εύρεση των καλύτερων παραμέτρων, ωστόσο στην πλειοψηφία δεν εμφάνισε μεγαλύτερο ποσοστό εκτίμησης από τις default παραμέτρους. Κάθε τεχνική μηχανικής μάθησης αξιολογήθηκε έπειτα από 10 επιτυχημένες επαναλήψεις. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το ποσοστό ακρίβειας της κάθε τεχνικής.



Σχήμα 2.1: Ποσοστό Ακρίβειας

Επίσης στο σχήμα 2.2 φαίνεται ένα συγκριτικό διάγραμμα με τις καμπύλες Roc για κάθε τεχνική. Η καμπύλη Roc χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός μοντέλου να προβλέπει σωστά την εκδήλωση η μη-εκδήλωση των προκαθορισμένων γεγονότων. Η τιμή της κυμαίνεται από 0.5(τυχαία προσαρμογή) έως 1(τέλεια προσαρμογή).



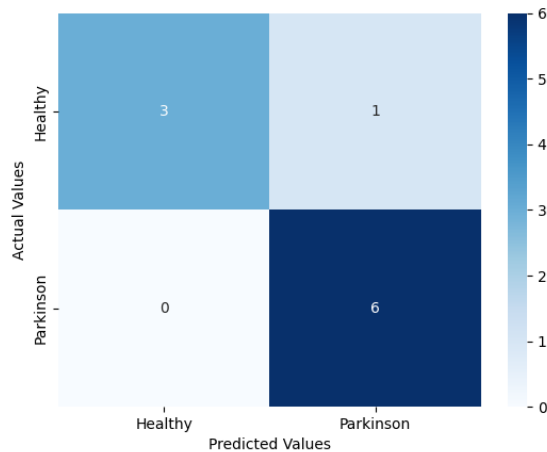
Σχήμα 2.2: Συγκριτικό διάγραμμα με τις καμπύλες Roc κάθε τεχνικής.

Αναλύοντας τα δυο παραπάνω σχήματα γίνεται σύγκριση μεταξύ των μοντέλων μηχανικής μάθησης που εξετάζουμε. Παρακάτω στον πίνακα 1 παρουσιάζονται για κάθε τεχνική το μέγιστο ποσοστό ακρίβειας και ο μέσος όρος του ποσοστού ακρίβειας για 10 επαναλήψεις. Να σημειωθεί πως το ποσοστό για την τεχνική Random Forest προέκυψε έπειτα από την χειροκίνητη διαμόρφωση των παραμέτρων, έπειτα από χρήση της ανάλυσης grid search.

Μοντέλο	Μέγιστο ποσοστό ακρίβειας (%)	Μέσος όρος ποσοστού ακρίβειας (%)
SVC	70	62
Gaussian NB	80	77
Bagging	80	74
AdaBoost	70	66
Random Forest	90	81

Πίνακας 1:Σύνοψη ποσοστών ακρίβειας

Ο πίνακας σύγχυσης (Confusion Matrix) είναι μια τεχνική για την σύνοψη της απόδοσης ενός αλγορίθμου ταξινόμησης. Ο υπολογισμός ενός πίνακα σύγχυσης μπορεί να μας δώσει μια καλύτερη εικόνα για το μοντέλο ταξινόμησης, καθώς επίσης και τι είδους σφάλματα αυτό κάνει. Παρακάτω στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ο πίνακας σύγχυσης για την τεχνική Random Forest , αφού σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα εμφανίζει τα καλύτερα ποσοστά, τόσο στο μέγιστο ποσοστό ακρίβειας όσο και στον μέσο όρο αυτού στις 10 επαναλήψεις.



Σχήμα 2.3: Confusion Matrix της τεχνικής Random Forest

### 3. Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ευκολά συμπεραίνει κανείς πως η τεχνική Random Forest με τις συγκεκριμένες παραμέτρους δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα και φαίνεται να είναι η πιο αξιόπιστη. Τα πρώιμα αλλά πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα μας πρέπει να επιβεβαιωθούν περαιτέρω σε ένα μεγαλύτερο δείγμα για να καταλήξουμε στο συμπέρασμα. Επόμενος σταθμός στην έρευνά μας είναι η ανάπτυξη μιας εφαρμογής σε λογισμικό Android, όπου θα διατίθεται στην ιατρική κοινότητα, και έτσι ο κάθε γιατρός θα έχει την δυνατότητα να αξιολογεί τον 'ασθενή' μόνο με το μικρόφωνο ενός κινητού.

### 4. Βιβλιογραφία

- [1] A. Agarwal, S. Chandrayan and S. S. Sahu, "Prediction of Parkinson's disease using speech signal with Extreme Learning Machine," 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016, pp. 3776-3779, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755419.
- [2] Hagen Jaeger, Dhaval Trivedi, & Michael Stadtschnitzer. (2019). Mobile Device Voice Recordings at King's College London (MDVR-KCL) from both early and advanced Parkinson's disease patients and healthy controls [Data set]. Zenodo.
- [3] P. T. Hosseini, F. Almasganj, T. Emami, R. Behroozmand, S. Gharibzade and F. Torabinezhad, "Local Discriminant Wavelet Packet Basis for Voice Pathology Classification," 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008, pp. 2052-2055, doi: 10.1109/ICBBE.2008.842.
- [4] [https://www.elevit.org.gr/images/elevit\\_2021/proceedings\\_final\\_03.pdf](https://www.elevit.org.gr/images/elevit_2021/proceedings_final_03.pdf)

- [5] C. Laganas et al., "Parkinson's Disease Detection Based on Running Speech Data From Phone Calls," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 69, no. 5, pp. 1573-1584, May 2022, doi: 10.1109/TBME.2021.3116935.
- [6] T. Bocklet, E. Nöth, G. Stemmer, H. Ruzickova and J. Ruz, "Detection of persons with Parkinson's disease by acoustic, vocal, and prosodic analysis," 2011 *IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition & Understanding*, 2011, pp. 478-483, doi: 10.1109/ASRU.2011.6163978.
- [7] Goberman, Alexander & Coelho, Carl. (2002). Acoustic analysis of Parkinsonian speech I: Speech characteristics and L-Dopa therapy. *NeuroRehabilitation*. 17. 237-46. 10.3233/NRE-2002-17310.
- [8] Amato, F., Borzi, L., Olmo, G. et al. An algorithm for Parkinson's disease speech classification based on isolated words analysis. *Health Inf Sci Syst* 9, 32 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13755-021-00162-8>
- [9] Gunduz, Hakan. "Deep Learning-Based Parkinson's Disease Classification Using Vocal Feature Sets." *IEEE Access* 7 (2019): 115540-115551.
- [10] Shahbakhhi, M. , Far, D. and Tahami, E. (2014) Speech Analysis for Diagnosis of Parkinson's Disease Using Genetic Algorithm and Support Vector Machine. *Journal of Biomedical Science and Engineering*, 7, 147-156. doi: [10.4236/jbise.2014.74019](https://doi.org/10.4236/jbise.2014.74019).
- [11] Rouzbahani, H. K., & Daliri, M. R. (2011). Diagnosis of Parkinson's disease in human using voice signals. *Basic and Clinical Neuroscience*, 2(3), 12-20. <http://bcn.iuims.ac.ir/article-1-96-en.html>
- [12] Wroge, T.J., Özkanca, Y., Demiroğlu, C., Si, D., Atkins, D.C., & Ghomi, R.H. (2018). *Parkinson's Disease Diagnosis Using Machine Learning and Voice*. 2018 *IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB)*, 1-7.
- [13] P. Boersma. (2006). *Praat: Doing Phonetics by Computer*. [Online]. Available:<http://www.praat.org/>

## **Προσωποποιημένη επεξεργασία ομιλίας για συσκευές ακουστικής ενίσχυσης με τεχνικές βαθιάς μάθησης**

Ιορδάνης Θωίδης  
Υπ. διδ. / Α.Π.Θ.  
ithoidis@auth.gr

Κωνσταντίνος Παστιάδης  
Αν. Καθ / Α.Π.Θ.  
pastiadi@mus.auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου  
Ομ. Καθ. / Α.Π.Θ.  
pap@eng.auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός μοντέλου του ακουστικού συστήματος σε διαφορίσιμο πλαίσιο λογισμικού, το οποίο μπορεί να παραμετροποιηθεί για την απώλεια ακοής μέσω του τονικού ακοογράμματος. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως κριτήριο βελτιστοποίησης για την εκπαίδευση συστημάτων επεξεργασίας της ομιλίας που βασίζονται στη βαθιά μάθηση. Το προτεινόμενο κριτήριο βελτιστοποίησης οδηγεί σε βελτιωμένα αποτελέσματα αντικειμενικών μετρικών για την καταληπτότητα και την ποιότητα ομιλίας που αφορούν μέτρια και σοβαρή απώλεια ακοής, ενώ παρατηρείται προσαρμογή της κατανομής των δυναμικών της επεξεργασμένης ομιλίας στα χαρακτηριστικά της απώλεια ακοής. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την προοπτική των τεχνικών βαθιάς μάθησης για την προσωποποιημένη επεξεργασία ομιλίας στις συσκευές ακουστικής ενίσχυσης.

### ***Personalized speech processing for hearing aids using deep learning***

#### **ABSTRACT**

*In this study, a differentiable implementation of an auditory model is presented, that can be parameterized to account for hearing loss based on the pure-tone audiogram. This model is employed as an objective function for training a deep learning-based speech enhancement system. The proposed criterion outperforms existing objectives in terms of objective intelligibility and quality metrics, when evaluated for moderate and severe hearing loss. Additionally, significant adaptation of the enhanced speech dynamics to the hearing loss characteristics is observed. Finally, experimental results indicate the potential of deep learning methods end-to-end personalized speech processing schemes for hearing aids.*



## 1. Εισαγωγή

Μία από τις κύριες προκλήσεις για τις συσκευές ακουστικής ενίσχυσης είναι η αποκατάσταση της αντίληψης της ομιλίας σε θορυβώδη περιβάλλοντα [1]. Εκτός από το ποιοτικά χαρακτηριστικά του υλικού που αφορούν την ακουστική ενίσχυση, στο λογισμικό των σύγχρονων συσκευών επιστρατεύονται προηγμένες μέθοδοι επεξεργασίας σήματος ώστε η ομιλία να γίνεται καλύτερα αντιληπτή από τον ακροατή. Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας συνήθως αφορά την καταστολή του θορύβου υποβάθρου, όπου στόχος είναι η αύξηση του λόγου σήματος-προς-θόρυβο στο σημείο κορεσμού της καταληπτότητας ομιλίας [2]. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα στάδιο φασματικής εξισορρόπησης, εφαρμόζοντας διαφορετικά κέρδη σε κάθε ζώνη συχνοτήτων. Τέλος, στα μη γραμμικά ακουστικά βαρηκοΐας, χρησιμοποιείται συμπίεση δυναμικού εύρους για να μεγιστοποιηθεί η παρουσία των ομιλητικών σημάτων στο διαθέσιμο δυναμικό εύρος της ακοής. Στην πράξη, οι παράμετροι των δύο τελευταίων σταδίων επεξεργασίας εκτιμώνται με βάση το ακούγραμμα του ακροατή, σύμφωνα με μια μέθοδο προσαρμογής όπως οι NAL-R, NAL-NL2, και CAM2 [3]. Συνεπώς, η προσαρμογή των συσκευών ακουστικής ενίσχυσης στα ακουστικά χαρακτηριστικά του κάθε χρήστη γίνεται μέσω της εκτίμησης των παραμέτρων κέρδους και λόγου συμπίεσης του δυναμικού εύρους.

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη στον τομέα της βαθιάς μάθησης έχει συντελέσει σημαντικά στην ανάπτυξη συστημάτων αποθορυβοποίησης της ομιλίας όντας πολύ αποτελεσματικά στην αποκατάσταση της καταληπτότητας και της ποιότητας ομιλίας ακόμα και σε πολύ θορυβώδη περιβάλλοντα [4, 5]. Αυτό επιτυγχάνεται με την παραμετροποίηση μοντέλων νευρωνικών δικτύων ώστε να ελαχιστοποιούν ένα κριτήριο βελτιστοποίησης, που είναι συνήθως μια συνάρτηση μέσου τετραγωνικού σφάλματος ή μια μετρική αντικειμενικής εκτίμησης του δείκτη καταληπτότητας ομιλίας [6]. Ωστόσο, είναι αβέβαιο αν τα κριτήρια βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται μέχρι στιγμής αφορούν την απώλεια ακοής ή μπορούν να επεκταθούν προς αυτή την κατεύθυνση, προσομοιώνοντας τα χαρακτηριστικά ακουστικής αντίληψης του κάθε χρήστη.

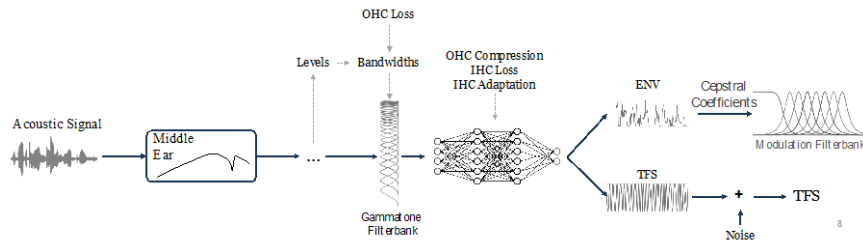
## 2. Μέθοδος

Στην παρούσα μελέτη, παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός μοντέλου του περιφερειακού και κεντρικού ακουστικού συστήματος σε διαφορίσιμο πλαίσιο λογισμικού και η ενσωμάτωση του σε ένα κριτήριο βελτιστοποίησης για συστήματα επεξεργασίας της ομιλίας. Η διερεύνηση εστιάζει στο κατά πόσο οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή μεθόδων προσαρμογής των συσκευών ακουστικής ενίσχυσης.

### *2.1 Προσομοίωση μοντέλων του ακουστικού συστήματος με τη χρήση νευρωνικών δικτύων*

Η υλοποίηση του διαφορίσιμου μοντέλου του ακουστικού συστήματος περιλαμβάνει (α) την αντικατάσταση των απλών μη διαφορίσιμων συναρτήσεων με διαφορίσιμες συναρτήσεις που προσεγγίζουν τα αποτελέσματά τους και (β) την προσομοίωση των σύνθετων μη διαφορίσιμων σταδίων με τη χρήση ειδικά

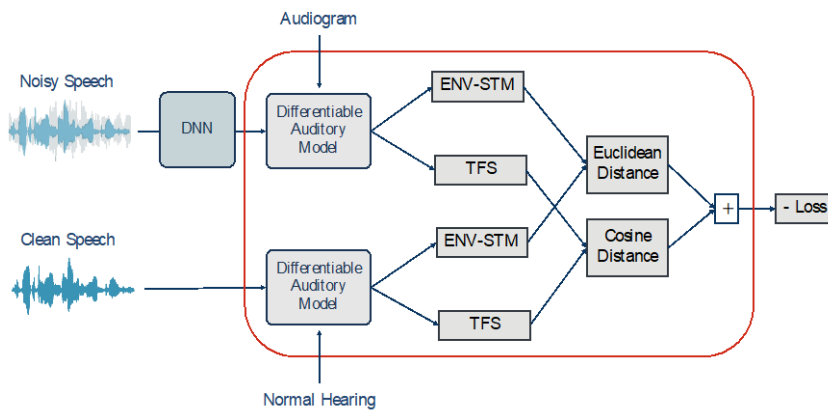
εκπαιδευμένων νευρωνικών δικτύων (Σχήμα 1). Το προτεινόμενο περιφερειακό ακουστικό μοντέλο μπορεί να παραμετροποιηθεί για την απώλεια ακοής μέσω του τονικού ακουογράμματος, χρησιμοποιώντας παραμετροποιήσεις των σταδίων επεξεργασίας που έχουν προταθεί σε πρόσφατες μελέτες [7].



Σχήμα 1. Στάδια επεξεργασίας του μοντέλου του ακουστικού περιφερειακού και κεντρικού συστήματος. Τα μη διαφορίσιμα στάδια έχουν προσομοιωθεί με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.

## 2.2 Κριτήριο βελτιστοποίησης με τη χρήση μοντέλων του ακουστικού συστήματος

Το διαφορίσιμο μοντέλο του ακουστικού συστήματος χρησιμοποιείται ως στάδιο προ-επεξεργασίας των ομιλητικών σημάτων. Η αναπαράσταση στην έξοδο του μοντέλου συνδυάζεται με μια συνάρτηση ομοιότητας των χρονοφασματικών διαμορφώσεων. Έτσι, κατά τη σύγκριση του επεξεργασμένου σήματος και του σήματος αναφοράς δίνεται βάση στα αντιληπτικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην καταληπτότητα της ομιλίας του ακροατή με βάση το ακούγραμμα του (Σχήμα 2). Αυτό επιτρέπει τη χρήση του συστήματος ως συνάρτηση κόστους για την εκπαίδευση συστημάτων επεξεργασίας ομιλητικών σημάτων με τη χρήση της βαθιάς μάθησης.



Σχήμα 2. Προτεινόμενα στάδια επεξεργασίας για τη σύγκριση των αντιληπτικών χαρακτηριστικών δύο ομιλητικών σημάτων. Η υλοποίησή τους σε διαφορίσιμο πλαίσιο λογισμικού επιτρέπει την ενσωμάτωση του συστήματος ως συνάρτηση κόστους για την εκπαίδευση συστημάτων επεξεργασίας της ομιλίας.

Το ακούγραμμα του χρήστη ενσωματώνεται στο ακουστικό μοντέλο για την επεξεργασία του αποθορυβοποιημένου σήματος, ενώ για τα στάδια επεξεργασίας του σήματος αναφοράς χρησιμοποιείται το ακούγραμμα φυσιολογικής ακοής (0 dB HL). Η επιλογή αυτή έγκειται στο ότι το σύστημα αποθορυβοποίησης καλείται να ανακτήσει τις χρονο-φασματικές διαμορφώσεις του καθαρού σήματος, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζει και την επιρροή των παραγόντων παραμόρφωσης και εξασθένησης που προκαλούνται λόγω της απώλειας ακοής [8].

### 1.2 Πειραματική διαδικασία και προσομοίωση συστήματος

Η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου περιλαμβάνει την εκπαίδευση του συνελκτικού νευρωνικού δικτύου ConyTasNet (Lu et al., 2019) με 600 χιλιάδες παραμέτρους για την αποθορυβοποίηση ομιλίας με τη χρήση του ακουστικού μοντέλου ως συνάρτηση κόστους. Η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίνεται με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια βελτιστοποίησης μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE), λόγου σήματος-προς-παραμόρφωση ανεξαρτήτου κλιμάκωσης (SI-SDR), και δείκτη βραχυπρόθεσμης αντικειμενικής εκτίμησης της καταληπτότητας ομιλίας (eSTOI). Η προσομοίωση αφορά τυποποιημένα ακουογράμματα με επίπεδη διαμόρφωση και απότομη κλίση (IEC 60118-15), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Για την εκπαίδευση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν 20 ώρες καθαρής ομιλίας από το σύνολο δεδομένων LibriSpeech και αποσπάσματα θορύβων πραγματικού περιβάλλοντος από το σύνολο δεδομένων WSJ0 Hipster Ambient Mixtures (WHAM!). Η μίξη των σημάτων έγινε σε λόγους σήματος-προς-θόρυβο που επιλέγονται ομοιόμορφα στο εύρος από -6 έως 6 dB. Τέλος, η αξιολόγηση αφορούσε δεδομένα που προέρχονται από άγνωστους ομιλητές και αποσπάσματα ποικίλων περιβαλλοντικών θορύβων κατά την εκπαίδευση.

Πίνακας 1. Ουδοί ακουστότητας (dB HL) για τα ακουογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της απώλειας ακοής (IEC 60118-15).

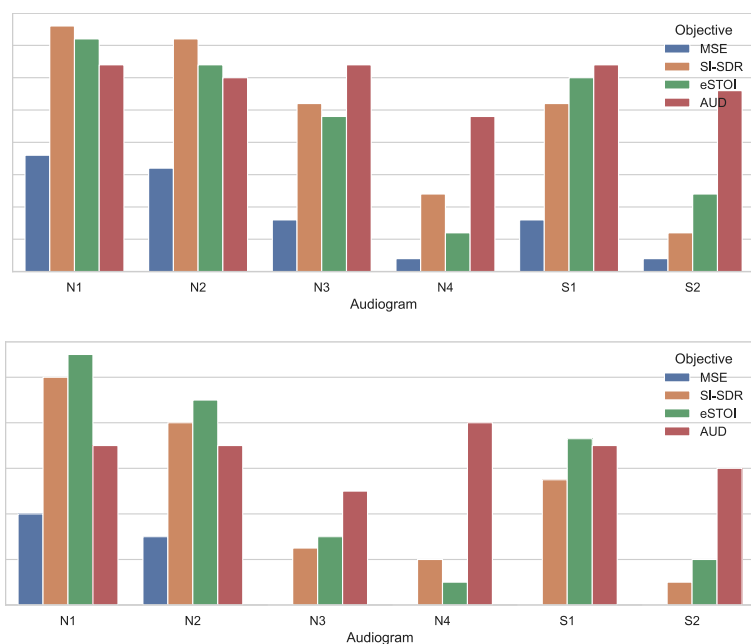
Συχνότητα (Hz)	250	500	1000	2000	4000	8000
N1	10	10	10	15	30	40
N2	20	20	25	35	45	60
N3	35	35	40	50	60	65
N4	55	55	55	65	75	80
S1	15	10	15	15	55	70
S2	20	20	25	55	95	95

### 3. Αποτελέσματα

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου επεξεργασίας ομιλητικών σημάτων αξιολογείται με τη χρήση των μετρικών καταληπτότητας (HASPI) και ποιότητας ομιλίας (HASQI) για συσκευές ακουστικής ενίσχυσης [9]. Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται η σύγκριση των συστημάτων αποθορυβοποίησης με την ίδια αρχιτεκτονική που έχουν εκπαιδευτεί με διαφορετικές συναρτήσεις κόστους. Η τιμή

στον κάθετο άξονα αφορά την αύξηση των αντικειμενικών μετρικών συγκρίνοντας το επεξεργασμένο με το αρχικό ενθόρυβο σήμα. Στα αποθρορυβοποιημένα σήματα ομιλίας των μοντέλων που έχουν εκπαιδευτεί με τις συναρτήσεις eSTOI, SI-SDR, και MSE έχει εφαρμοστεί ο γραμμικός κανόνας ενίσχυσης NAL-R με βάση το ακοογράμμα του ακροατή, ενώ καμία μετ-επεξεργασία δεν έχει εφαρμοστεί στην προτεινόμενη μέθοδο, καθώς η ενίσχυση γίνεται δυναμικά και είναι ενσωματωμένη στη συνάρτηση κόστους. Σε όλες τις περιπτώσεις, το σήμα αναφοράς είναι το καθαρό σήμα ομιλίας που χρησιμοποιήθηκε για τη μίξη.

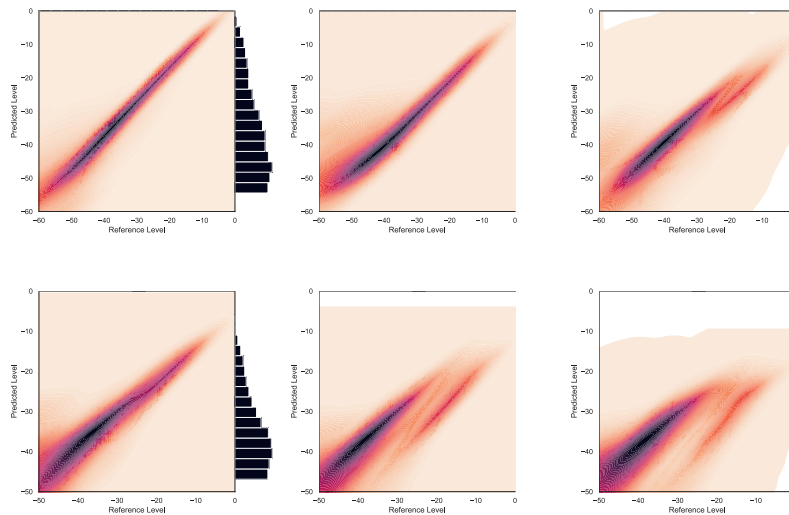
Οι συναρτήσεις κόστους SI-SDR και eSTOI αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα για περιπτώσεις ήπιας απώλειας ακοής (ακοογράμματα N1 και N2). Ωστόσο, καθώς οι ουδοί ακουστότητας αυξάνονται (ακοογράμματα N3 και N4), η προτεινόμενη συνάρτηση κόστους επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα ( $p < 0.01$ ). Ομοίως, στα ακοογράμματα με απότομη κλίση, η απόδοση των υπαρχουσών συναρτήσεων κόστους μειώνεται σημαντικά από το S1 στο S2, ενώ η προτεινόμενη μέθοδος σημειώνει παρόμοια αύξηση στις μετρικές καταληπτότητας και ποιότητας.



Σχήμα 3. Αύξηση των αντικειμενικών μετρικών καταληπτότητας και ποιότητας ομιλίας για διαφορετικές συναρτήσεις κόστους.

Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η επιρροή της προτεινόμενης συνάρτησης κόστους στην κατανομή δυναμικού εύρους του επεξεργασμένου σήματος (Σχήμα 4). Σε αντίθεση με τις περιπτώσεις των SI-SDR και MSE, για το eSTOI, η αντιστοίχιση των κατανομών των επιπέδων για διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων αποκλίνει ελαφρώς από τη διαγώνιο, γεγονός που υποδεικνύει την εφαρμογή συμπίεσης δυναμικού εύρους στο αποθρορυβοποιημένο σήμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η κατανομή των δυναμικών παραμένει ανεξάρτητη του ακοογράμματος. Αντίθετα,

στην προτεινόμενη μέθοδο η αύξηση των ουδών ακουστότητας οδηγεί σε περισσότερη συμπίεση του δυναμικού εύρους του επεξεργασμένου σήματος.



Σχήμα 4. Κατανομή δυναμικού εύρους για τις συναρτήσεις κόστους SI-SDR, MSE, eSTOI (επάνω) και της προτεινόμενης συνάρτησης κόστους για τα ακοογράμματα N1, N2, και N3, αντίστοιχα (κάτω).

#### 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται η υλοποίηση ενός μοντέλου του ακουστικού συστήματος σε διαφορισμο πλαίσιο λογισμικού, το οποίο μπορεί να παραμετροποιηθεί μέσω του τονικού ακοογράμματος ώστε να προσομοιώνει τα χαρακτηριστικά της απώλεια ακοής. Το ακουστικό μοντέλο χρησιμοποιείται ως κριτήριο βελτιστοποίησης για την εκπαίδευση συστημάτων επεξεργασίας της ομιλίας που βασίζονται στη βαθιά μάθηση. Το προτεινόμενο κριτήριο βελτιστοποίησης οδηγεί σε βελτιωμένα αποτελέσματα αντικειμενικών μετρικών για την καταληπτότητα και την ποιότητα ομιλίας για ακοογράμματα μέτριας και σοβαρής απώλειας ακοής, ενώ παρατηρείται σημαντική προσαρμογή της κατανομής του δυναμικού εύρους της ομιλίας με βάση τα χαρακτηριστικά της απώλειας ακοής. Με αυτό τον τρόπο, υποδεικνύεται η προοπτική των τεχνικών βαθιάς μάθησης για την προσωποποιημένη επεξεργασία ομιλίας στις συσκευές ακουστικής ενίσχυσης. Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι από τα αποτελέσματα της έρευνας προκύπτει ότι τα νευρωνικά δίκτυα δύναται να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μηχανισμών του ακουστικού συστήματος που είναι υπολογιστικά απαιτητικά.

#### 5. Αναφορές

[1] Lesica, Nicholas A. "Why do hearing aids fail to restore normal auditory perception?." *Trends in neurosciences* 41, no. 4 (2018): 174-185.

- [2] Thoidis, Iordanis, Lazaros Vrysis, Dimitrios Markou, and George Papanikolaou. "Temporal auditory coding features for causal speech enhancement." *Electronics* 9, no. 10 (2020): 1698.
- [3] Moore, Brian CJ, and Aleksander Sek. "Comparison of the CAM2 and NAL-NL2 hearing aid fitting methods." *Ear and hearing* 34.1 (2013): 83-95.
- [4] Healy, Eric W., Eric M. Johnson, Masood Delfarah, and DeLiang Wang. "A talker-independent deep learning algorithm to increase intelligibility for hearing-impaired listeners in reverberant competing talker conditions." *The Journal of the Acoustical Society of America* 147, no. 6 (2020): 4106-4118.
- [5] Thoidis, Iordanis, Lazaros Vrysis, Konstantinos Pasiadis, Konstantinos Markou, and George Papanikolaou. "Investigation of an encoder-decoder lstm model on the enhancement of speech intelligibility in noise for hearing impaired listeners." In *Audio Engineering Society Convention 146*. Audio Engineering Society, 2019.
- [6] Kolbæk, Morten, Zheng-Hua Tan, Søren Holdt Jensen, and Jesper Jensen. "On loss functions for supervised monaural time-domain speech enhancement." *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* 28 (2020): 825-838.
- [7] Vecchi, Alejandro Osses, Léo Varnet, Laurel H. Carney, Torsten Dau, Ian C. Bruce, Sarah Verhulst, and Piotr Majdak. "A comparative study of eight human auditory models of monaural processing." *Acta Acustica* 6 (2022): 17.
- [8] Drakopoulos, Fotios, Viacheslav Vasilkov, Alejandro Osses Vecchi, Tijmen Wartenberg, and Sarah Verhulst. "Model-based hearing-enhancement strategies for cochlear synaptopathy pathologies." *Hearing Research* 424 (2022): 108569.
- [9] Kates, James M., and Kathryn H. Arehart. "The hearing-aid speech perception index (haspi) version 2." *Speech Communication* 131 (2021): 35-46.

**Κατευθυντικότητα τραγουδιστής φωνής στην ελληνική  
γλώσσα: μελέτη περίπτωσης κλασικού και βυζαντινού  
τραγουδιού**

Κων/νος Μπακογιάννης  
Μεταδιδ. ερευνητής  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
kostasbako@di.uoa.gr

Γιώργος Δεδούσης  
Υποψήφιος διδάκτορας  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας –  
ΕΚΠΑ  
gdedousis@music.uoa.gr

Ιωάννης Μαλαφής  
Υποψήφιος διδάκτορας  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
ymalafis@music.uoa.gr

Αρετή Ανδρεοπούλου  
Επίκουρη Καθηγήτρια  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
a.andreopoulou@music.uoa.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αρχικά αποτελέσματα μιας μελέτης η οποία εξετάζει τη σφαιρική κατευθυντικότητα της ελληνικής τραγουδιστικής φωνής. Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες οι οποίες εστιάζουν κυρίως στο οριζόντιο επίπεδο, αυτή η μελέτη συμπεριλαμβάνει αποτελέσματα σε τρία διαφορετικά επίπεδα ανύψωσης (+30°, 0° και -30°). Έξι επαγγελματίες τραγουδιστές της ελληνικής κλασικής και βυζαντινής μουσικής ηχογραφήθηκαν να τραγουδούν σε έναν ακουστικά διαμορφωμένο χώρο χρησιμοποιώντας μια διάταξη 28 μικροφώνων τοποθετημένη σε ημισφαιρικό κλωβό. Τα δεδομένα που αναλύθηκαν ήταν σύντομα αποσπάσματα τραγουδιών και ήχοι φωνηέντων σε διαφορετικά τονικά ύψη. Τα αποτελέσματα κατευθυντικότητας σε όλες τις γωνίες ανύψωσης παρουσιάζονται με βάση τις RMS τιμές στο σύνολο της ενέργειας καθώς και σε επιμέρους τριτοκταβικές ζώνες.*

***On the spherical directivity of the singing voice; a case  
study of professional singers in Greek Classical and  
Byzantine music***

**ABSTRACT**

*This work presents preliminary results of a study examining the spherical directivity of the Greek singing voice. Unlike previous works focusing mainly on the horizontal plane, this study reports results on three elevations (+30°, 0°, and -30°). Six professional singers in Greek Classical and Byzantine music were recorded signing in a sound-treated space using a 28-microphone array mounted on a semi-spherical thin-shell structure. The collected dataset consists of short song excerpts and vowel sounds at different pitches. Directivity results across all elevation angles are reported based on overall and per third-octave band RMS levels.*

## Εισαγωγή

Οι έρευνες σχετικά με την ανάλυση, την καταληπτότητα και τη διάδοση της ανθρώπινης φωνής χρονολογούνται από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Μόλις το 1939 δημοσιεύτηκε μία από τις πρώτες μελέτες κατευθυντικότητας της φωνής [1]. Η πρώτη συστηματική μελέτη σχετικά με την κατευθυντικότητα της τραγουδιστικής φωνής δημοσιεύτηκε στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα [2, 3], αποδεικνύοντας ότι, όπως και στη περίπτωση της ομιλίας, η κατευθυντικότητα εξαρτάται από τη συχνότητα και επηρεάζεται από τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά κάθε ατόμου, τη στάση του σώματος, τη θέση του κεφαλιού και το σχήμα του φωνητικού σωλήνα [4, 5]. Όσον αφορά στο τραγούδι, η φωνητική κατευθυντικότητα έχει εξεταστεί ως συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως το τονικό ύψος, η ένταση, το φώνημα, η προβολή / εστίαση [6, 7], το είδος τραγουδιού, το επίπεδο εκπαίδευσης [7, 8, 9], καθώς και ο χώρος διάδοσης [8].

### 1. Μεθοδολογία

Αυτή η εργασία πραγματοποιείται την κατευθυντικότητα της ελληνικής τραγουδιστικής φωνής με βάση μετρήσεις έξι επαγγελματιών τραγουδιστών στην κλασική (2 άντρες και 2 γυναίκες) και βυζαντινή (2 άντρες) μουσική.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ακουστικά διαμορφωμένο χώρο διαστάσεων 10x7x5 m στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT), του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. 28 πυκνωτικά μικρόφωνα RODE-M5 τοποθετήθηκαν συμμετρικά σε ημισφαιρικό κλωβό ακτίνας 158,5 cm (Σχήμα 1.1), σε τρεις γωνίες ανύψωσης (+30°, 0° και -30°). 12 μικρόφωνα τοποθετήθηκαν στο οριζόντιο επίπεδο σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (ανά 30°), 8 μικρόφωνα σε γωνία -30° (ανά 45°) και 8 μικρόφωνα σε γωνία +30° (ανά 45°). Πριν από την τοποθέτηση των 28 μικροφώνων στην ημισφαιρική διάταξη, ηχογραφήθηκαν οι μεμονωμένες κρουστικές αποκρίσεις των μικροφώνων (απόσταση μικροφώνου και ηχείου 1,3 m) χρησιμοποιώντας το πολυκάναλο εργαλείο μέτρησης κρουστικών αποκρίσεων ScanIR [10, 11], σε ένα MacBook M1 Pro 2020 μέσω του λογισμικού Matlab2021a. Οι κρουστικές αποκρίσεις χρησιμοποιήθηκαν για την αφαίρεση τυχόν χρωματισμών που προκαλούνται από το ίδιο το μικρόφωνο. Οι συμμετέχοντες τοποθετήθηκαν όρθιοι στο κέντρο του κλωβού, με το ύψος της διάταξης να ρυθμίζεται ώστε το κέντρο της να ευθυγραμμίζεται με τη θέση του στόματος κάθε τραγουδιστή. Η σωστή ευθυγράμμιση των συμμετεχόντων διασφαλίστηκε με χρήση ακτίνων λέιζερ. Δε χρησιμοποιήθηκε κάποια αυστηρότερη μέθοδος ευθυγράμμισης προκειμένου να διασφαλιστεί μια πιο φυσική / ρεαλιστική εμπειρία τραγουδιού για τους συμμετέχοντες. [6]

Οι στάθμες των μικροφώνων βαθμονομήθηκαν χρησιμοποιώντας ροζ θόρυβο (78 dBA), αναπαραγόμενο από παντοκατευθυντικό μεγάφωνο Brüel & Kjær (OmniPower SoundSource Type 4292-L) τοποθετημένο στη θέση του τραγουδιστή, διασφαλίζοντας μέγιστη απόκλιση  $\pm 0,5$  dB. Τα δεδομένα καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας δύο ψηφιακούς μίκτες Yamaha TF1 (διασυνδεδεμένοι μέσω DANTE), χρησιμοποιώντας τους ενσωματωμένους προενισχυτές τους, σε φορητό υπολογιστή με επεξεργαστή i5 στο λογισμικό Cubase 11. Για να αποτραπεί η πιθανή επίδραση των πρώιμων ανακλάσεων από το δάπεδο και τον εξοπλισμό στις μετρήσεις



χρησιμοποιηθήκαν ηχοαπορροφητικά πάνελ. Τα καταγεγραμμένα σήματα ροζ θορύβου αναλύθηκαν σε ζώνες τριτοκτάβας. Από τη διαδικασία αυτή προέκυψαν οι συντελεστές βαθμονόμησης μέσω των οποίων εξασφαλίστηκαν παντοκατευθυντικές αποκρίσεις των μικροφώνων σε όλες τις συχνοτικές ζώνες, βάσει τιμών μέσης τετραγωνικής ρίζας (Root Mean Square - RMS). Τέλος, ορίστηκε ένα κατώφλι σηματοθορυβικού λόγου 3 dB. Όσα σήματα δεν πέρασαν το κατώφλι αυτό δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση των δεδομένων.

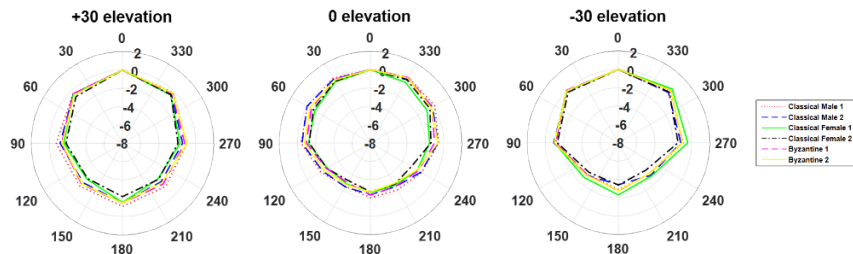
Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να τραγουδήσουν ένα απόσπασμα 30 δευτερολέπτων από δύο τραγούδια της επιλογής τους στην ελληνική γλώσσα, τα οποία κατά την κρίση τους είχαν διαφορετικό χαρακτήρα (αναφορικά με το τονικό ύψος, τις εντάσεις και τις διάρκειες των νοτών) ώστε να προκύψει ένα αντιπροσωπευτικό τελικό δείγμα. Επιπλέον, προκειμένου να μελετηθεί συγκεκριμένα η κατευθυντικότητα των ελληνικών φωνηέντων, ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να τραγουδήσουν δυνατά (forte) τα πέντε ελληνικά φωνήεντα (/a/ε/ι/ο/ου/), για περίπου δύο δευτερόλεπτα το κάθε ένα, στα ακόλουθα τονικά ύψη: A2, E3 , και C#4 για τους άνδρες τραγουδιστές και A3, E4 και C#5 για τις γυναίκες τραγουδίστριες.



*Σχήμα 1.1 Η διάταξη του ημισφαιρικού κλωβού μέσω της οποίας διενεργήθηκαν οι ηχογραφήσεις.*

## **2. Αποτελέσματα**

Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν RMS τιμές από το σύνολο του συχνοτικού εύρους των δειγμάτων και από τις τριτοκταβικές ζώνες που κυμαίνονται από τα 80 Hz έως τα 10 kHz. Για συντομία, στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μόνο οι τριτοκταβικές ζώνες με κεντρικές συχνότητες στα 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz και 8 kHz. Τα πολικά διαγράμματα στα οποία παρουσιάζονται τα μοτίβα κατευθυντικότητας της φωνής κανονικοποιήθηκαν με βάση την RMS τιμή του μικροφώνου με συντεταγμένες  $0^\circ$ ,  $0^\circ$  που ήταν ευθυγραμμισμένο με το στόμα των υποκειμένων.

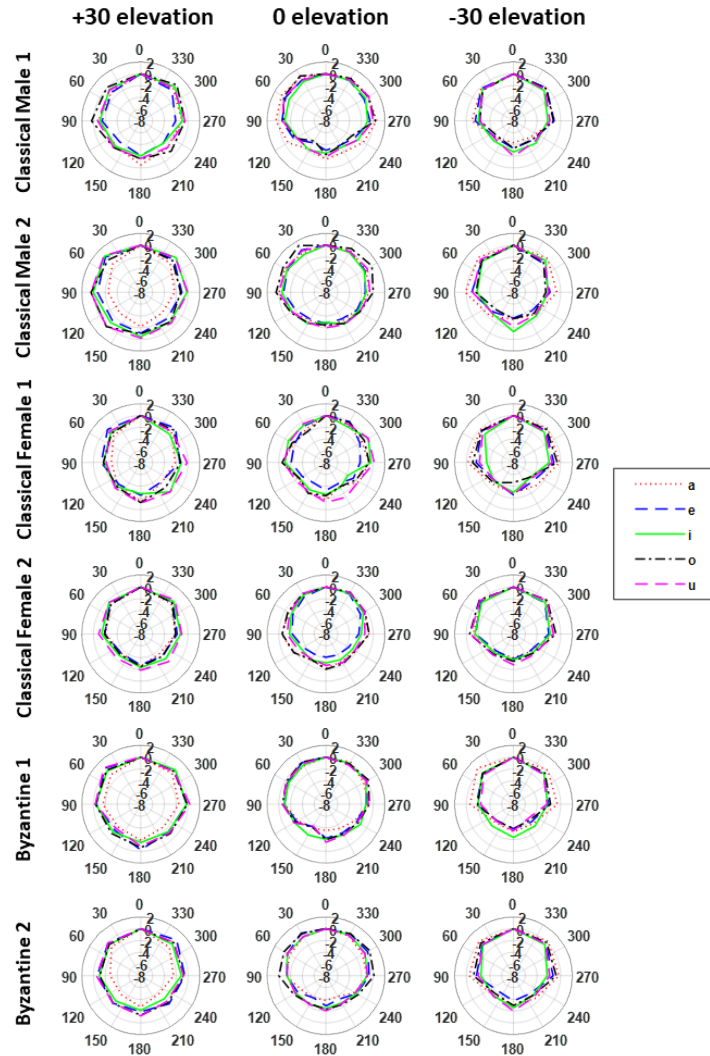


Σχήμα 2.2 Τα κανονικοποιημένα πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας της τραγουδιστής φωνής για τους 6 τραγουδιστές τα οποία προέκυψαν από τη συνολική RMS τιμές στο σύνολο της ενέργειας των τραγουδιών.

Το σχήμα 2.2 δείχνει τα κανονικοποιημένα μοτίβα φωνητικής κατευθυντικότητας των 6 συμμετεχόντων, τα οποία προέκυψαν από τον υπολογισμό της συνολικής RMS τιμής στο σύνολο της ενέργειας (δηλαδή σε όλο το συχνοτικό εύρος) των τραγουδιών. Όπως φαίνεται, επιβεβαιώνεται η αριστερά / δεξιά συμμετρία η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των συμμετεχόντων δεν είναι σημαντικές (<1 dB). Στο οριζόντιο επίπεδο σχηματίζεται ένα σχεδόν κυκλικό μοτίβο κατευθυντικότητας στο οποίο η προβολή του ήχου προς τα μπροστά (για αζιμούθιες γωνίες περίξ των 0°) ευνοείται κατά περίπου 2 dB σε σχέση με την προβολή του ήχου προς τα πίσω (για αζιμούθιες γωνίες περίξ των 180°). Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τα άλλα δύο επίπεδα, που ευνοούν την προβολή προς τα μπροστά, όπως αναμενόταν, με την απώλεια στο πίσω μέρος της γωνίας ανύψωσης -30° να είναι μεγαλύτερη από εκείνη της γωνίας ανύψωσης +30° (-1,5 dB και -2,9 dB αντίστοιχα). Ωστόσο, και τα δύο επίπεδα παρουσιάζουν ωοειδή μοτίβα κατευθυντικότητας τα οποία είναι περισσότερο στενά σε σύγκριση με αυτά του οριζόντιου επιπέδου, τόσο στην αριστερή όσο και στη δεξιά πλευρά. Το μοτίβο της κατευθυντικότητας του επιπέδου +30° είναι ελαφρώς στενότερο (από -1,3 έως -1,4 dB στον άξονα των αυτιών) από αυτό των -30° (από -1,1 έως -1,0 dB).

Παρόμοιες παρατηρήσεις με την περίπτωση των τραγουδιών προκύπτουν και στην περίπτωση των φωνηέντων (Σχήμα 2.3). Τα διαγράμματα κατευθυντικότητας όλων των τραγουδιστών, ανεξαρτήτως είδους τραγουδιού, φύλου και φωνηέντος, παραμένουν συμμετρικά αριστερά / δεξιά, οι προβολές προς τα πίσω είναι κατά μέσο όρο -2 dB περιορισμένες σε σχέση με αυτές προς τα μπροστά και παρουσιάζονται ωοειδή σχήματα κατευθυντικότητας για τα επίπεδα των +30° και -30°.

Για όλους τους τραγουδιστές, μεταξύ των φωνηέντων, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στην κατευθυντικότητα. Κάποιες αξιοσημείωτες διαφορές εντοπίζονται στο πίσω ημιεπίπεδο για τις 2 γυναίκες τραγουδίστριες και στα 3 επίπεδα ανύψωσης καθώς και για τους άντρες τραγουδιστές στο επίπεδο των -30°. Στο οριζόντιο επίπεδο, στην περίπτωση των φωνηέντων /α/ και /ε/, το σχήμα της κατευθυντικότητας είναι περισσότερο ευρύ για τους 2 κλασικούς άντρες τραγουδιστές σε σχέση με αυτό των 2 αντρών τραγουδιστών βυζαντινής μουσικής, παρά το γεγονός ότι όλοι είχαν τραγουδήσει τις ίδιες ακριβώς νότες, το οποίο αποτελεί μία ένδειξη της επίδρασης της τεχνικής στην κατευθυντικότητα. Τέλος, το



Σχήμα 2.3 Κανονικοποιημένα μοτίβα φωνητικής κατευθυντικότητας των έξι συμμετεχόντων όταν τραγουδούν μεμονωμένα τα φωνήεντα /a/ε/ι/ο/ου, οι μεν άντρες στις νότες A2, E3 και C# 4 οι δε γυναίκες στις νότες A3, E4 και C#5, με βάση τα συνολικά επίπεδα RMS τιμών υπολογισμένα σε όλο το εύρος συχνοτήτων.

πιο ομοιογενές και συμμετρικό μοτίβο κατευθυντικότητας σε όλους τους συμμετέχοντες και επίπεδα ανύψωσης παρατηρείται για το φωνήεν /ι/, με εξαίρεση την κλασική τραγουδίστρια 1, η οποία εμφανίζει τις χαμηλότερες συμμετρίες αριστερά / δεξιά σε όλα τα φωνήεντα και τα επίπεδα ανύψωσης. Μια εξέταση των βίντεο που κατέγραφαν τις μετρήσεις αποκάλυψε ότι η συγκεκριμένη συμμετέχουσα χρησιμοποίησε τις πιο έντονες κινήσεις σώματος και κεφαλιού ως μέσο φωνητικής

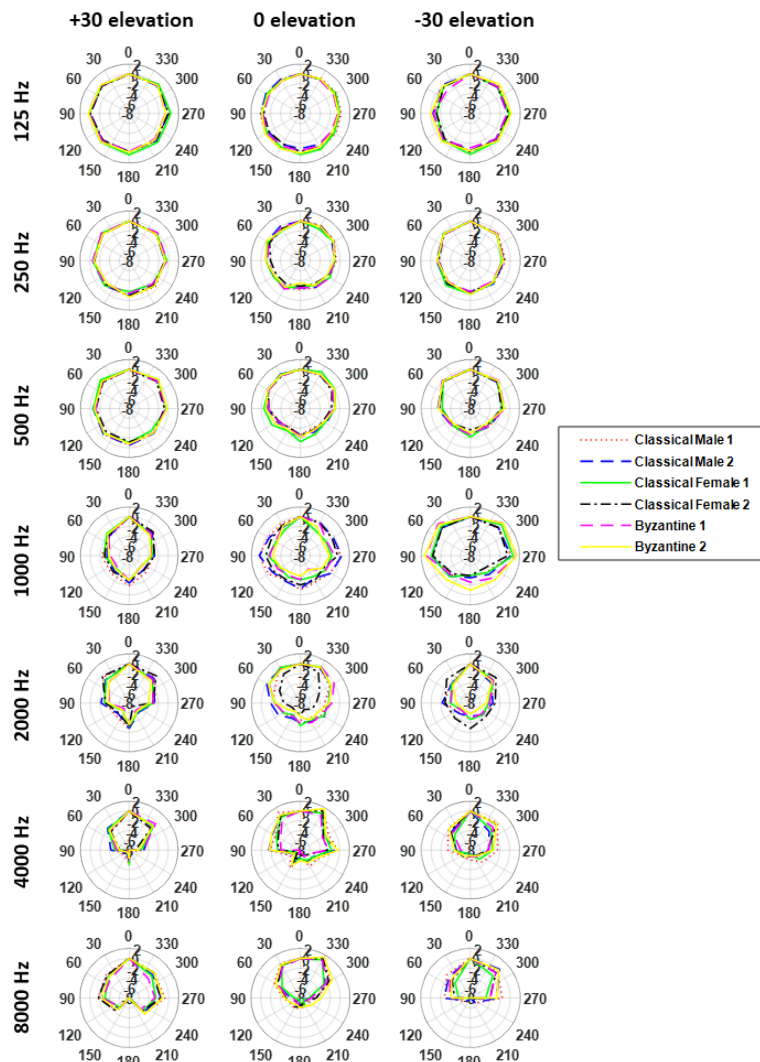
παραγωγής και εκφραστικότητας σε σύγκριση με τους υπόλοιπους, γεγονός που πιθανότατα επηρέασε τη συμμετρία στα μοτίβα κατευθυντικότητας.

Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει την τριτοκταβική ανάλυση των αποσπασμάτων των τραγουδιών που ηχογραφήθηκαν. Όπως φαίνεται, οι χαμηλές συχνότητες (παρουσιασμένες στις επιλεγμένες ζώνες των 125 Hz, 250 Hz και 500 Hz) ανύψωσης. Το αποτέλεσμα είναι πιο εμφανές στα 125 Hz. Στις επόμενες ζώνες συχνότητας η κατευθυντικότητα προς το πίσω ημιεπίπεδο περιορίζεται προοδευτικά. Στην περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων (1 kHz και 2 kHz) τα μοτίβα έχουν στενότερο σχήμα από αυτό της περιοχής των χαμηλών συχνοτήτων και σταδιακά γίνονται καρδιοειδή εστιάζοντας στο μπροστά ημιεπίπεδο στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων (4 kHz και 8 kHz). Για άλλη μια φορά, οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις μεταξύ των συμμετεχόντων είναι μάλλον μικρές, με εξαίρεση την περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, η οποία λειτουργεί ως μεταβατική περιοχή μεταξύ του παντοκατευθυντικού μοτίβου κατευθυντικότητας των χαμηλών συχνοτήτων και του καρδιοειδούς των υψηλών, με τις παρατηρούμενες προαναφερθείσες διακυμάνσεις να μην ξεπερνούν τα 2,5 dB.

### 3. Συζήτηση

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν επιβεβαιώνουν την υπάρχουσα βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία η προβολή της τραγουδιστικής φωνής παρουσιάζει συμμετρία αριστερά / δεξιά [6, 7]. Παρατηρήθηκε, επίσης, εξάρτηση της κατευθυντικότητας της φωνής από το συχνотικό εύρος και το τονικό ύψος. Όπως αναμενόταν, οι χαμηλότερες συχνότητες παρουσίασαν πιο παντοκατευθυντικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις υψηλότερες, οι οποίες είχαν καρδιοειδή σχήματα [6, 7, 9]. Κατά συνέπεια, κατά την εξέταση των χαρακτηριστικών κατευθυντικότητας σε όλο το εύρος συχνοτήτων της ανθρώπινης φωνής, οι άνδρες τραγουδιστές εμφάνισαν πιο ευρεία και παντοκατευθυντικά μοτίβα φωνητικής κατευθυντικότητας σε όλα τα επίπεδα ανύψωσης σε σύγκριση με τις γυναίκες.

Υπάρχει μια ευρέως διαδεδομένη πεποίθηση στους κύκλους της κλασικής μουσικής ότι οι τραγουδιστές της όπερας μπορούν να γεμίσουν μια αίθουσα συναυλιών με τον ήχο της φωνής τους χωρίς ηλεκτρακουστική ενίσχυση. Αυτή η ικανότητα σχετίζεται με δύο φωνητικά χαρακτηριστικά, την ένταση και την κατευθυντικότητα. Από άποψη έντασης / φωνητικής προβολής, αυτό μπορεί να αποδοθεί στα formants του τραγουδιστή (singer's formants), τα οποία ειδικά για τους άνδρες τραγουδιστές της όπερας βρίσκονται στην περιοχή των 2 kHz έως 4 kHz, ένα εύρος συχνοτήτων στο οποίο, όπως είναι γνωστό, το ανθρώπινο αυτί παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία [9]. Όσον αφορά στην κατευθυντικότητα, έχει παρατηρηθεί ότι οι τραγουδιστές όπερας παρουσιάζουν περισσότερο παντοκατευθυντικά μοτίβα κατευθυντικότητας σε σύγκριση με τραγουδιστές άλλων μουσικών ειδών (π.χ., [7, 8]). Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι η φωνή αυτών των τραγουδιστών γίνεται πιο κατευθυντική στην συχνотική περιοχή των formants τους (2 kHz έως 4 kHz) [9]. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, τα οποία αποκάλυψαν πιο ευρεία, δυνατά και παντοκατευθυντικά πρότυπα φωνητικής κατευθυντικότητας για τους άνδρες κλασικούς τραγουδιστές σε σύγκριση με τους άνδρες βυζαντινούς τραγουδιστές,



Σχήμα 2.4 Κανονικοποιημένα μοτίβα κατευθυντικότητας των αποσπασμάτων τραγουδιού των 6 τραγουδιστών όπως προέκυψε από την τριτοκταβική ανάλυσή τους.

παρά το γεγονός ότι όλοι οι συμμετέχοντες είχαν τραγουδήσει το ίδιο ακριβώς περιεχόμενο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, συμφωνεί με τα προαναφερθέντα προηγούμενα βιβλιογραφικά ευρήματα.

Στη συγκεκριμένη εργασία συμμετείχε ένα σχετικά περιορισμένο δείγμα τραγουδιστών το οποίο δεν επιτρέπει γενικές στατιστικές, καθώς αυτές απαιτούν πολύ μεγαλύτερους πληθυσμούς δειγμάτων. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι το μικρό μέγεθος δείγματος της τρέχουσας μελέτης καθιστά τα αποτελέσματά μας άμεσα συγκρίσιμα με σχετικές ερευνητικές μελέτες, η συντριπτική πλειονότητα των οποίων βασίζεται επίσης σε παρατηρήσεις από περιορισμένο δείγμα ατόμων, λόγω

απαίτησης ειδικών, επαγγελματιών τραγουδιστών, πολλαπλών μουσικών ειδών και μακρών πρωτοκόλλων μέτρησης τα οποία προϋποθέτουν περίπλοκες ρυθμίσεις.

Μελλοντικές εργασίες θα περιλαμβάνουν αύξηση του δείγματος των τραγουδιστών με συμμετέχοντες διαφορετικών επιπέδων εκπαίδευσης και ειδών, προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η πιθανή επίδραση της φωνητικής εκπαίδευσης και του στυλ τραγουδιού στην κατευθυντικότητα. Επίσης, θα γίνει ανάλυση formants προκειμένου να επεκταθεί η περιορισμένη, μέχρι σήμερα, σχετική έρευνα για την ελληνική τραγουδιστική φωνή.

#### 4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό έργο υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: HFRI-FM17-3832).

#### 5. Αναφορές

- [1] H. Dunn και D. Farnsworth, «Exploration of pressure field around the human head during speech,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, τόμ. 10, αρ. 3, pp. 184-199, 1939.
- [2] A. Marshall και J. Meyer, «The directivity and auditory impressions of singers.,» *Acta Acustica united with Acustica*, τόμ. 58, αρ. 3, pp. 130-140, 1985.
- [3] M. Kob και H. Jers, «Directivity measurement of a singer,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, τόμ. 105, αρ. 2, pp. 1003-1003, 1999.
- [4] M. Brandner, A. Sontacchi και M. Frank, «Real-Time Calculation of Frequency-Dependent Directivity Indexes in Singing,» σε *DAGA*, 2019.
- [5] M. Brandner, R. Blandin, M. Frank και A. Sontacchi, «A pilot study on the influence of mouth configuration and torso on singing voice diversity,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, τόμ. 148, αρ. 3, pp. 1169-1180, 2020.
- [6] B. Katz και C. d' Alessandro, «Directivity measurements of the singing voice,» σε *International Congress on Acoustics (ICA 2007)*, 2007.
- [7] B. B. Boren και A. Roginska, «Sound radiation of trained vocalizers,» σε *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013*, 2013.
- [8] D. Cabrera, P. J. Davis και A. Connolly, «Longterm horizontal vocal directivity of opera singers: Effects of singing projection and acoustic environment,» *Journal of Voice*, τόμ. 25, αρ. 6, pp. e291-e303, 2011.
- [9] M. Fric και I. Podzimková, «Comparison of sound radiation between classical and pop singers,» *Biomedical Signal Processing and Control*, τόμ. 66, p. 102426, 2021.
- [10] B. Boren και A. Roginska, «Multichannel Impulse Response Measurement in MATLAB,» σε *131st Audio Engineering Society Convention*, 2011.

- [11] J. Vanasse, A. Genovese και A. Roginska, «Multichannel impulse response measurements in MATLAB: An update on scanIR,» σε *Audio Engineering Society Conference: 2019 AES International Conference on Immersive and Interactive Audio*, 2019.

## **Ηχητική εφαρμογή πλοήγησης και προσανατολισμού σε κλειστούς χώρους για άτομα με προβλήματα όρασης**

Μωραΐτης Γεώργιος  
Ελληνικό Ανοικτό  
Πανεπιστήμιο  
std141356@ac.eap.gr

Δημούλας Χαράλαμπος  
Αριστοτέλειο  
Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης  
babis@eng.auth.gr

Κούτρας Αθανάσιος  
Πανεπιστήμιο  
Πελοποννήσου  
koutras@uop.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η όραση είναι μια από τις αισθήσεις του ανθρώπου που παίζει κυρίαρχο ρόλο στην διατήρηση της ψυχικής του και όχι μόνο υγείας. Είναι πολύ σημαντικό να αναγνωρίζουμε αντικείμενα στο χώρο και έτσι να μπορούμε να περιηγηθούμε σε αυτόν με απόλυτη ασφάλεια αποφεύγοντας κινδύνους και ενδεχόμενους τραυματισμούς. Σε αυτή την εργασία αναπτύξαμε μια ηχητική εφαρμογή πλοήγησης και προσανατολισμού για κλειστούς χώρους βοηθώντας κυρίως ανθρώπους με προβλήματα όρασης αλλά ενδεχομένως και άτομα με άλλες μορφές αναπηρίας και παθήσεις που σχετίζονται με την ηλικία ή ακόμα και για το ευρύ κοινό. Η εφαρμογή συνδέεται με ένα σύστημα εντοπισμού κλειστού χώρου και με τη βοήθεια των αισθητήρων του κινητού μπορεί να προσδιορίσει την θέση και τον προσανατολισμό του ατόμου στο χώρο. Μέσω ηχητικών μηνυμάτων και χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνολογίες όπως βάσεις δεδομένων (Database - DB), το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT), τεχνολογίες χαμηλής ενέργειας Bluetooth (Bluetooth Low Energy - BLE), αλλά και αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI), η εφαρμογή μας επιστρέφει το ανάλογο ακουστικό μήνυμα που αντιστοιχεί στη θέση και τον προσανατολισμό μας.*

### ***An audio application for indoor navigation and orientation for visually impaired persons***

#### **ABSTRACT**

*Vision is one of the human senses that plays a dominant role in maintaining one's mental and not only health. It is very important to recognize objects in the space and navigate avoiding dangers and possible injuries. In in this paper we developed an audio application for navigation and orientation in enclosed spaces, helping mainly people with vision impairments but (possibly) also people with other disabilities and diseases related to age or even for the general public. The application is connected with an indoor localization system and with the help of the mobile sensors it can determine the position and orientation of the person in the space. Through voice*



*messages, using a variety of technologies such as databases (Database - DB), the Internet of Things (IoT), Bluetooth Low Energy (BLE) technologies, but also artificial intelligence algorithms (Artificial Intelligence - AI), the application returns the corresponding audio message that corresponds to our position and orientation.*

## **Εισαγωγή**

Η στήριξη των ατόμων με προβλήματα όρασης για ανεξαρτησία στην περιήγηση τους σε ανοιχτούς αλλά και σε κλειστούς ιδιωτικούς και δημοσίους χώρους είναι επιτακτική και αναγκαία. Σε έρευνα που έκανε το 2007 σε 1000 ενήλικες Αμερικανούς το «American Foundation for the Blind» [1] σε ερώτημα σχετικά με το τι θεωρούν ότι θα τους ασκούσε μεγαλύτερη επιρροή στην ποιότητα της ζωής τους, απάντησαν ότι η τύφλωση θα έχει μεγαλύτερη επιρροή με ποσοστό 21%, από ότι πολύ σοβαρές ασθένειες όπως παράλυση ή HIV/AIDS ενώ ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας σε έρευνα που διεξήχθη το 2019 [2] ανακοίνωσε ότι σε παγκόσμιο επίπεδο τουλάχιστον 2.2 δισεκατομμύρια άνθρωποι αντιμετωπίζουν προβλήματα όρασης ή τύφλωσης.

Οι άνθρωποι με προβλήματα όρασης έχουν αναπτύξει διάφορες τεχνικές υποβοήθησης όπως είναι τα λευκά μπαστούνια ή οι σκύλοι οδηγοί. Η τεχνολογία έρχεται και αυτή με την σειρά της να δώσει κάποιες λύσεις στον προσανατολισμό και στην πλοήγηση των ατόμων με προβλήματα όρασης. Όλες οι παραπάνω τεχνικές έχουν τρωτά σημεία.

Ο στόχος της εφαρμογής που αναπτύξαμε είναι η δημιουργία ενός χώρου προσβάσιμου για άτομα με προβλήματα όρασης βοηθώντας τα άτομα αυτά να κάνουν την καθημερινότητα τους πιο εύκολη εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας χωρίς επιπλέον εξοπλισμό χρησιμοποιώντας μόνο το κινητό τηλέφωνο τους.

### **1. Επισκόπηση πεδίου**

Στο παρελθόν είχαν αναπτυχθεί πολλές εφαρμογές, και είχαν σχεδιαστεί διάφορα συστήματα με διαφορετικές τεχνολογίες που σκοπός τους ήταν να βοηθήσουν τα άτομα με προβλήματα όρασης να περιηγηθούν με ασφάλεια σε εσωτερικό χώρο. Στις μέρες μας αναπτύχθηκε η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης UWB (Ultra Wide Band) [3] η οποία είναι μια από της πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες σχετικά με τον εντοπισμό θέσης σε κλειστό χώρο. Εμείς θα παρουσιάσουμε τρεις τεχνολογίες συστημάτων που είναι και οι πιο ευρέως διαδεδομένες.

Αρχικά υπάρχουν τα συστήματα που έχουν ως βάση του πομποδέκτες υπερήχων είναι ως επί το πλείστον συστήματα αποφυγής εμποδίων και λιγότερο υπόδειξης της διαδρομής. Οι αισθητήρες προσαρμόζονται είτε στο σώμα του χρήστη, είτε στο λευκό μπαστούνι και κατά την κίνηση του ατόμου στέλνουν υπέρηχους οι οποίοι ανακλούν στα τυχόν εμπόδια, και στην συνέχεια υπολογίζουν την απόσταση του εμπόδιου από το άτομο προειδοποιώντας το ότι υπάρχει μπροστά του εμπόδιο [4].

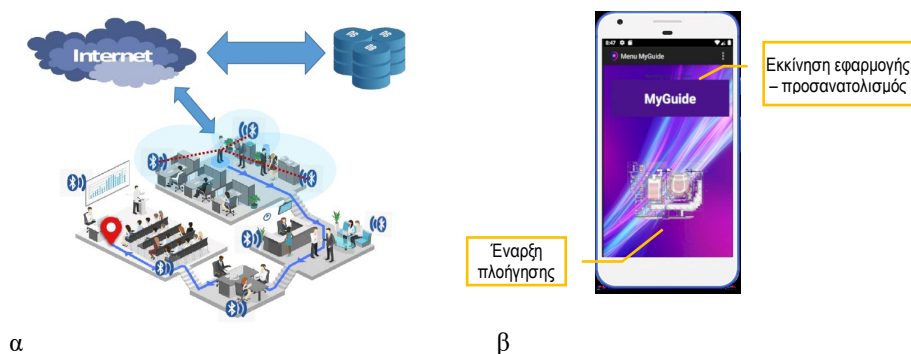
Υπάρχουν τα συστήματα με οπτικούς πομποδέκτες, οι πομποί είναι πηγές φωτός που μεταφέρουν κωδικοποιημένα μηνύματα, έτσι όταν ο δέκτης λάβει αυτά τα μηνύματα τα αποκωδικοποιεί και τα μεταφέρει στο χρήστη. Τα μηνύματα αυτά

μπορεί να έχουν πληροφορίες σχετικά με την θέση του χρήστη στο χώρο αλλά δεν μπορούν να τον προσανατολίσουν [5].

Τέλος τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ετικέτες αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων ή αλλιώς RFID (Radio Frequency Identification) έχουν σαν πυρήνα της λειτουργίας τους τεχνικές μέτρησης εμβέλειας σήματος. Οι τεχνικές αυτές υπολογίζουν την απόσταση του πομπού ραδιοσυχνοτήτων από το δέκτη είτε από την ισχύ της λήψης του εκπεμπόμενου σήματος RSS (Received signal strength), είτε από φάση του ληφθέντος σήματος RSP (Received signal strength) είτε από την ώρα άφιξης του σήματος ToA (Time of arrival) [6].

## 1. Σχεδιασμός συστήματος

Η βασική ιδέα της εφαρμογής που αναπτύξαμε βασίζεται σε ένα σύστημα εντοπισμού εσωτερικών χώρων τον οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία ασυρμάτων εκπομπών Bluetooth χαμηλής ενέργειας και ως δέκτες τα κινητά τηλεφωνα των χρηστών. Αφού το σύστημα εντοπίσει την θέση του χρήστη τότε μέσω της εφαρμογής θα αναζητήσει σε μια βάση δεδομένων αν υπάρχει κάποιο σχετικό ηχητικό μήνυμα που πρέπει να αναπαραχθεί και αν η απάντηση είναι θετική, τότε ο χρήστης θα ακούσει το αντίστοιχο μήνυμα (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2.1 α) Εννοιολογικό διάγραμμα με τις κύριες λειτουργίες της εφαρμογής.  
β) Βασική οθόνη διεπαφής της εφαρμογής με τους δυο επιλογείς πλοήγησης και προσανατολισμού.

Ειδικότερα οι φάροι Bluetooth τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο [7] και ο χρήστης θα πρέπει να έχει εγκαταστήσει στο κινητό του τηλέφωνο την εφαρμογή. Αφού αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο και ενεργοποιήσει το Bluetooth του τηλεφώνου του, οι φάροι Bluetooth στέλνουν κωδικοποιημένα σήματα με τη ταυτότητα τους [8], τα οποία λαμβάνει το κινητό του χρήστη και μέσω του διαδικτύου τις αποστέλλει στον εξυπηρετητή, ο οποίος με τη σειρά του ενημερώνει την εφαρμογή σχετικά με τη θέση τους στο χώρο. Η εφαρμογή υπολογίζει την ακριβή θέση του χρήστη στο χώρο και την αποστέλλει μαζί με το προσανατολισμό της [9] στη βάση δεδομένων ζητώντας να της αποστείλει αν υπάρχει κάποιο μήνυμα σχετικά με τη θέση της. Στην περίπτωση που υπάρχει

μήνυμα η εφαρμογή, το διαβάζει με τη τεχνολογία μετατροπής κειμένου σε λόγο, και ο χρήστης ενημερώνεται σχετικά με το που βρίσκεται αλλά και το τι υπάρχει γύρω από αυτόν.

### *2.1 Εξοπλισμός*

Για τις ανάγκες τις εφαρμογής χρησιμοποιήσαμε τη μονάδα HM-10 BLE ως φάρο Bluetooth χωρίς να είναι αυτό δεσμευτικό για τη περαιτέρω έρευνα. Τις μονάδες HM-10 τις τροποποιούμε έτσι ώστε να λειτουργούν ως iBeacon με πολύ χαμηλότερο κόστος. Η μονάδα HM-10 είναι εύκολα προμηθεύσιμη και διαθέτει Bluetooth 4.0n χρησιμοποιεί τα chips της Texas Instruments CC2540 ή CC2541. Για να προγραμματίσουμε τη μονάδα HM-10 έτσι ώστε να λειτουργεί ως φάρος Bluetooth πρέπει να συνδέουμε το HM-10 με έναν σειριακό προσαρμογέα USB σε TTL RS232 και αυτόν με έναν υπολογιστή. Ο προσαρμογέας FTDI που επιλέξαμε είναι ο FT232RL.

Το κινητό τηλέφωνο στο οποίο εγκαταστήσαμε την εφαρμογή για να την αναπτύξουμε αλλά και να την δοκιμάσουμε είναι ένα smartphone Xiaomi Redmi note 8 με λογισμικό Android 11. Διαθέτει Wifi, Bluetooth και έχει αισθητήρες επιταχυνσιόμετρο και γυροσκοπίου. Οι μονοί περιορισμοί που έχει η εφαρμογή σχετικά με την λειτουργία της είναι το κινητό να έχει συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο (Wifi, 3G, 4G, 5G), να υποστηρίζει πρωτόκολλα Bluetooth, να έχει λογισμικό Android 7.0.1v Nougat ή μεγαλύτερο, να έχει αισθητήρα γυροσκοπίου και επιταχυνσιόμετρο και να υποστηρίζει την λειτουργία Talkback.

### *2.2 Λειτουργία εφαρμογής*

Εκκινώντας η εφαρμογή την λειτουργία της ενημερώνει τον χρήστη με ηχητικό μήνυμα ότι είναι σε λειτουργία. Ταυτόχρονα ελέγχει δυο βασικές παραμέτρους. Την ενεργοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth και τη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Σε περίπτωση που δεν έχει ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας Bluetooth η εφαρμογή μπαίνει σε κατάσταση αναμονής. Αφού ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας τότε η εφαρμογή ελέγχει σε δεύτερο χρόνο την σύνδεση στο διαδίκτυο όπου και εδώ αν δεν είναι ενεργοποιημένο το Wifi η εφαρμογή μπαίνει σε κατάσταση αναμονής αλλιώς επιτρέπει στο χρήστη από το μενού να επιλέξει το χώρο που βρίσκεται και θέλει να πλοηγηθεί.

Η εφαρμογή έχει ένα κεντρικό μενού με τους χαρτογραφημένους χώρους που μπορεί ο χρήστης να επιλέξει για πλοήγηση. Αφού ο χρήστης επιλέξει το χώρο, η εφαρμογή ανοίγει μια ασύνδετη επικοινωνία με τους φάρους που ενδεχομένως υπάρχουν στο χώρο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν φάροι στον χώρο ή ο χρήστης έχει επιλέξει άλλο χώρο πλοήγησης από αυτούς που βρίσκονται στην εφαρμογή τον ενημερώνει για τα δυο ενδεχόμενα δίνοντας του την ευκαιρία να επιλέξει εκ νέου χώρο. Έστω ότι η εφαρμογή έχει ταυτοποιήσει τους φάρους με το χώρο τότε πατώντας το κουμπί της έναρξης η εφαρμογή ξεκινάει την διαδικασία εντοπισμού θέσης και ανάκλησης μηνυμάτων από την βάση δεδομένων.

Η διαδικασία εντοπισμού έχει ως εξής. Αφού στείλουν οι φάροι Bluetooth τα δεδομένα τους, τα οποία είναι η ταυτότητα τους, η εφαρμογή σύμφωνα με την ισχύ του σήματος που θα λάβει κάνει εκτίμηση της απόστασης του φάρου από τον χρήστη και στέλνει τις ταυτότητες τους στη βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων με

την σειρά της θα επιστρέψει τις συνταγμένες των φάρων που βρίσκονται στο χώρο και χρησιμοποιώντας τριπλευρισμό [10], αφού είναι πλέον γνωστές οι αποστάσεις των φάρων από το χρήστη και οι συντεταγμένες τους στο χώρο, μπορεί να εντοπίσει την θέση του χρήστη σε αυτόν δηλαδή τις συντεταγμένες του χρήστη στο χώρο σύμφωνα με τις σχέσεις (1) και (2) όπου  $d_i$  οι αποστάσεις και  $x_i, y_i$  οι συντεταγμένες στο χώρο.

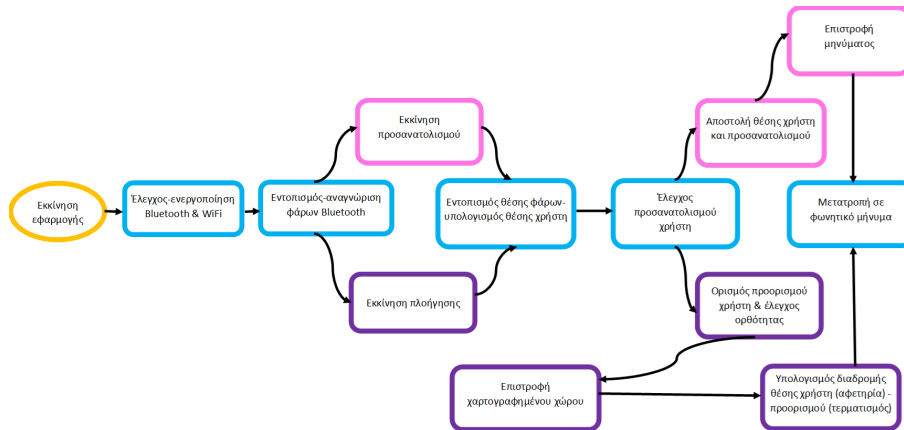
$$d_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$2 \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (d_2^2 - d_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Στην συνέχεια θα επικοινωνήσει ξανά με τη βάση δεδομένων στέλλοντας αυτή τη φορά τη θέση του χρήστη που υπολόγισε παραπάνω αλλά και το προσανατολισμό του, σύμφωνα με τα δεδομένα προσανατολισμού του γυροσκοπίου του κινητού. Η βάση θα ελέγξει αν υπάρχουν μηνύματα για την συγκεκριμένη θέση και αν υπάρχουν θα επιστρέψει το μήνυμα ανάλογα με το προσανατολισμό του χρήστη. Το μήνυμα που θα μας επιστρέψει η βάση θα είναι σε μορφή κειμένου και η εφαρμογή μέσω της τεχνολογίας Text-to-Speech [11] θα το μετατρέψει σε φωνητικό μήνυμα.

Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ακούσει ξανά το τελευταίο μήνυμα. Το τελευταίο μήνυμα που μας επιστρέφει η βάση δεδομένων αποθηκεύεται προσωρινά σαν κείμενο στη εφαρμογή και ο χρήστης έχει την δυνατότητα πατώντας παρατεταμένα ένα από τα δυο κουμπιά που διαθέτει η συσκευή να ξανακούσει τη τελευταία φωνητική εντολή. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα να μπει σε παύση η λειτουργία της εφαρμογής με ένα απλό πάτημα του ίδιου κουμπιού και η εφαρμογή ενημερώνει το χρήστη για την παύση, ενώ αν πατηθεί δεύτερη φορά ενημερώνεται ο χρήστης για την επανεκκίνηση της.

Επιλέγοντας το πλαίσιο πλοήγησης, ο χρήστης ενημερώνεται για την διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί και λέει το χώρο στον οποίο επιθυμεί να πάει. Η εφαρμογή χρησιμοποιώντας το Speech-to-Text [12] μετατρέπει σε κείμενο την ομιλία ενώ σε περίπτωση που δεν θα γίνει κατανοητός ο προορισμός ή δεν υπάρχει σαν προορισμός αποθηκευμένος στην εφαρμογή ενημερώνεται φωνητικά ο χρήστης και του ζητείται αν επιθυμεί να επαναλάβει τον προορισμό. Όταν ο προορισμός είναι έγκυρος τότε η εφαρμογή θα τον έχει συσχετισμένο με κάποιες συντεταγμένες. Η εφαρμογή ζητάει από τη βάση τη χαρτογράφηση του χώρου και η βάση την επιστρέφει (η χαρτογράφηση θα είναι ένα πλέγμα με τιμές). Τέλος ο προσανατολισμός του χρήστη και οι συντεταγμένες του εισάγονται σαν την αρχή μιας αναζήτησης με αλγόριθμο A-αστέρι [13] και στόχο τον προορισμό που ζητήθηκε. Το πεδίο αναζήτησης είναι ο χαρτογραφημένος χώρος όπου έχουμε δώσει τιμές ευρετικής συνάρτησης. Οι οδηγίες της αναζήτησης πάλι με την τεχνική Text-to-Speech εκφωνούνται στο χρήστη. Στο σχήμα 2-3 φαίνεται το διάγραμμα ροής της εφαρμογής.



Σχήμα 2.2 Συνοπτικό Μπλοκ Διάγραμμα Ροής Εφαρμογής.

### 3. Αποτελέσματα αξιολόγησης

Για να ορίσουμε το ποσοστό ανοχής μέτρησης απόστασης των οπτικών φάρων δράσαμε ως εξής. Σε πρώτη φάση μετρήσαμε την εμβέλεια που έχει ο φάρος και την ανοχή της μέτρησης της εφαρμογής σε σχέση με την πραγματική απόσταση. Η τιμή φυσικά της ανοχής διαφοροποιείται σε κλειστό περιβάλλον καθώς επηρεάζεται άμεσα από πολλούς παράγοντες όπως τα υλικοτεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά (θερμοκρασία και η υγρασία του χώρου) αφού έχουν άμεση επιρροή στην απώλεια διάδοσης του σήματος. Από τις μετρήσεις που έγιναν παρατηρήσαμε ότι υπάρχει μια διακύμανση στις τιμές σε σχέση με το χρόνο η οποία είναι εντονότερη για τα πρώτα 60sec κάνοντας προφανές ότι για να εισέλθει το σύστημα σε μια σχετική ισορροπία θα πρέπει να περάσουν κατά ελάχιστο 60sec ενώ η ανοχή στο 1m είναι περίπου 0.14m. Σχετικά με το ποσό επηρεάζει η γωνία λήψης στην οποία βρίσκεται το κινητό σε σχέση με το φάρο Bluetooth κάναμε 5 μετρήσεις για κάθε γωνία (0°, 45°, 90°, 125°, 180°, 225°, 270°, 315°) και ανά 1m για 5m δηλαδή συνολικά 200 μετρήσεις. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταλαβαίνουμε ότι παράγοντες που επηρεάζουν την σωστή μέτρηση είναι η απόσταση του χρήστη από τον φάρο και η γωνία λήψης με ιδανική απόσταση το 1m και ιδανική γωνία τις 0°.

Δημιουργώντας σε ένα χώρο ένα πλέγμα μικρών διαστάσεων (5m x 5m) τοποθετήσαμε το σύστημα εντοπισμού και μετρήσαμε σε όλες τις θέσεις του πλέγματος την εκτιμώμενη θέση που μας δίνει η εφαρμογή για τους τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρήσεις στη θέση του πλέγματος στο κέντρο του τριγώνου που ορίζουν οι θέσεις των φάρων. Σε αυτή τη θέση μέτρησης η εφαρμογή μας έδωσε ένα από τα τέσσερα σημεία που ορίζουν το τετράγωνο του πλέγματος με ποσοστό την επιτυχούς εύρεσης θέσης να είναι απόλυτο.

Για να αξιολογηθεί η ευχρηστία της εφαρμογής ενεργήσαμε ως εξής. Αρχικά δώσαμε την εφαρμογή να την εγκαταστήσουν στο κινητό τους 9 άτομα και να περιηγηθούν σε αυτήν επιλέγοντας τη κατάσταση προσομοίωσης. Αυτό το κάναμε

διότι είναι δύσκολο να γίνει εγκατάσταση του συστήματος σε δημόσιο χώρο όπου μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτόν πολλά άτομα έτσι ώστε να αξιολογηθεί η εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Στην συνέχεια δόθηκε στα άτομα αυτά που θα συγκροτήσουν και το πρώτο γκρουπ ατόμων αξιολογητών ερωτηματολόγιο και τους ζητήθηκε να το συμπληρώσουν. Για να γνωρίζουμε όμως το πώς συμπεριφέρεται η εφαρμογή και πως θα την αξιολογήσουν οι χρήστες στην πράξη εγκαταστήσαμε το σύστημα σε κλειστό χώρο και τους ζητήθηκε να ξεκινήσουν από ένα σημείο αφετηρίας χωρίς να έχουν ορατότητα και μόνο με τη βοήθεια της εφαρμογής και του λευκού μπαστούνιού να φτάσουν στον προορισμό.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ευχρηστίας της εφαρμογής είναι θετικά και με τα δυο γκρουπ αξιολογητών να την αξιολογούν με ποσοστά πάνω από 45% από πολύ έως και πάρα πολύ εύχρηστη σε όλα τα πεδία της ευρετικής αξιολόγησης όπως την προσβασιμότητα, την αυτονομία, την χρηστικότητα, την διεπαφή κ.ά. (26 ερωτήσεις 11 ευρετικά πεδία).

#### **4. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις**

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και η αξιολόγηση ευχρηστίας της εφαρμογής που έγινε από τους χρήστες έδειξε ότι αναπτύξαμε μια εφαρμογή η οποία είναι οικονομική, αποδοτική και βασίζεται σε ένα σύστημα εντοπισμού εσωτερικών χώρων που βοηθάει ανθρώπους με προβλήματα όρασης να κινηθούν με ασφάλεια στους κλειστούς χώρους. Η εφαρμογή εκμεταλλεύεται την υπολογιστική ισχύ που έχουν τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα και τους αισθητήρες που έχουν ενσωματωμένους καθώς και τους φάρους Bluetooth χαμηλού κόστους. Τα πλεονεκτήματός της εφαρμογής είναι ότι μπορεί να εγκατασταθεί σε όλους τους κλειστούς χώρους εύκολα (με την ανάλογη μελέτη), έχει χαμηλό κόστος, ο χρήστης δεν χρειάζεται να έχει επιπλέον εξοπλισμό μαζί του, ενώ είναι πολύ εύκολη στην χρήση καθώς η διεπαφή είναι σχεδιασμένη ειδικά για άτομα με προβλήματα όρασης βοηθώντας τα να αποφεύγουν τα απτικά λάθη

Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε κατά τη ανάπτυξη της εφαρμογής είναι ότι οι φάροι Bluetooth που χρησιμοποιήσαμε είναι v4.0 (BLE4) και ενώ η εμβέλεια τους σε ανοιχτό χώρο φτάνει τα 10m έχουν αρκετά μεγάλη ανοχή σε συνάρτηση με την απόστασή τους από το χρήστη. Δηλαδή κάτω από 1m το εκτιμώμενο λάθος είναι ανεκτό όμως σε απόσταση μεγαλύτερη των 3m το εκτιμώμενο λάθος μπορεί να ξεπεράσει και το 1m, μέτρηση η οποία δεν είναι ανεκτή καθώς η υπολογισμένη από το σύστημα θέση του χρήστη δεν θα αντιστοιχεί στην πραγματικότητα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας φάρους υπερεμβελείας ζώνης (UWB).

Η Ultra Wide Band είναι μια τεχνολογία εκπομπής ραδιοκυμάτων χαμηλής ενέργειας και μικρής εμβέλειας παρόμοιας με το Bluetooth και υψηλού εύρους ζώνης. Οι αισθητήρες UWB εκπέμπουν πολύ σύντομους παλμούς, περίπου έναν παλμό κάθε δυο νανοδευτερόλεπτα, αυτό μεταφράζεται σε περίπου πεντακόσια εκατομμύρια παλμούς το δευτερόλεπτο. Οι παλμοί είναι χαμηλής ισχύος και φασματικής πυκνότητας, κάνοντας τους να περνούν μέσα από φυσικά εμπόδια όπως τοίχους και αντικείμενα. Το 2019 κυκλοφόρησε η Apple, το πρώτο κινητό τηλέφωνο στον κόσμο με αισθητήρα UWB και στην συνέχεια ακολουθήσαν Samsung και η Huawei. Το UWB επιτρέπει τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο

συσκευών με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τη χρήση Bluetooth. Μέχρι και σήμερα οι εταιρείες δεν έχουν δώσει για κοινή χρήση της βιβλιοθήκες τους.

## 5. Αναφορές

[1] Douglas, G., Corcoran, C., & Pavey, S., *Network 1000: Opinions and Circumstances of Visually Impaired people in Great Britain: report based on over 1000 interviews*, University of Birmingham (2006).

[2] World Health Organization, *World report on vision*, ISBN 978-92-4-151657-0 (2019).

[3] Gigl T., Janssen G. J., Dizdarevic V., Witrals K., & Irahauten, Z., «Analysis of a UWB indoor positioning system based on received signal strength», in *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, IEEE*, pp. 97-101 (2007).

[4] Ulrich, I., & Borenstein, J. «The GuideCane-applying mobile robot technologies to assist the visually impaired», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, **31**(2), 131-136 (2001).

[5] Magatani, K., Sawa, K., & Yanashima, K., «Development of the navigation system for the visually impaired by using optical beacons», in *2001 Conference Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE*, Vol. 2, pp. 1488-1490 (2001, October).

[6] Kulyukin, V., Gharpure, C., Nicholson, J., & Pavithran, S., «RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired», in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No. 04CH37566)*, IEEE, Vol. 2, pp. 1979-1984 (2004, September).

[7] Wayfindr, *Open Standard for Audio-based Wayfinding*, online (retrieved on July, 2022): <http://www.wayfindr.net/wp-content/uploads/2018/07/Wayfindr-Open-Standard-Rec-2.0.pdf>, 2018.

[8] Lindh J., *Bluetooth low energy beacons*, Texas Instruments, online (July, 2022)

[https://www.decawave.com/wpcontent/uploads/2018/09/trek1000\\_user\\_manual.pdf](https://www.decawave.com/wpcontent/uploads/2018/09/trek1000_user_manual.pdf), 2015.

[9] Ayub, S., Bahraminasab, A., & Honary, B., «A sensor fusion method for smart phone orientation estimation», in *13th Annual Post Graduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, GBR* (2012).

[10] Πασιάς, Α. Α., *Συστήματα προσδιορισμού θέσης σε εσωτερικούς χώρους. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Πληροφορικής Πανεπιστήμιο Πειραιά* (2015).

[11] Eirini, S., *End-to-End Neural based Greek Text-to-Speech Synthesis*, Master's Thesis, Computer Science Department, University of Crete (2019).

[12] Nagdewani, S., & Jain, A., «A review on methods for speech-to-text and text-to-speech conversion», *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **2**(5), 4459-4464 (2020).

[13] Zhao, L., Ohshima, T., & Nagamochi, H. "A\* algorithm for the time-dependent shortest path problem", in *WAAC08: The 11th Japan-Korea Joint Workshop on Algorithms and Computation*, Vol. 10 (2008).

## ***Η κυκλική πόλη και η βιώσιμη διαχείριση του ακουστικού περιβάλλοντος***

Άγγελος Τσαλιγόπουλος<sup>1</sup>, Στέλλα-Σοφία, Κυβέλου<sup>2</sup>, Μιχάλης Χιωτίνης<sup>3</sup>, Αιμιλία Καραποστόλη<sup>4</sup>, Κορκόντζιλα Αναστασία<sup>5</sup>, Ελευθερία Κλώντζα<sup>6</sup>, Δημήτρης Λέκκας<sup>6</sup>, Γιάννης Ματσίνος<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PhD, Εργαστήριο Ακουστικής Οικολογίας, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 81100, Μυτιλήνη; tsaligoroulos@env.aegean.gr

<sup>2</sup>Καθηγήτρια, Τμήμα Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Σχολή Επιστημών Οικονομίας και Δημοσίας Διοίκησης, Πάντειο Πανεπιστήμιο Κοινωνικών και Πολιτικών Επιστημών, 17671 Αθήνα

<sup>3</sup>ΠΜΣ, Τμήμα Μηχανικών Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου, Ελλάδα- mchiotinis@mail.ntua.gr.

<sup>4</sup>PhD, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

<sup>5</sup>ΠΜΣ «Περιβαλλοντικός Αρχιτεκτονικός & Αστικός Σχεδιασμός» Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

<sup>6</sup>Εργαστήριο Διαχείρισης Αποβλήτων, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 81100, Μυτιλήνη

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η αυξανόμενη μετακίνηση του πληθυσμού προς τα αστικά κέντρα έχει επιφέρει σειρά περιβαλλοντικών πιέσεων μεταξύ των οποίων και ο περιβαλλοντικός θόρυβος, με επιπτώσεις στην ποιότητα της ζωής και στην ποιότητα του συνολικού περιβάλλοντος. Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας, είναι η ανάδειξη των μεθόδων κυκλικής οικονομίας με στόχο τη μείωση του αποτυπώματος του θορύβου. Βασικό εργαλείο της έρευνας ήταν η μοντελοποίηση και η χαρτογράφηση θορύβου. Στη συνέχεια σχηματίστηκαν και μοντελοποιήθηκαν σενάρια διαχείρισης θορύβου δομημένα σε ένα πλαίσιο κυκλικής οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι περιπτώσεις των πράσινων προσόψεων και των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν μια πτώση της τάξεως των 4 dB(A) κατόπιν εφαρμογής των δράσεων κυκλικής οικονομίας.*

### ***The circular city and the sustainable development of the acoustic environment***

#### **ABSTRACT**

*The increasing population movement towards urban centers has brought about a number of environmental pressures, including environmental noise, with implications for the quality of life and the quality of the overall environment. The purpose of this research is to highlight circular economy methods to reduce the noise footprint. The main tools of the research were noise modelling and mapping. Noise management scenarios structured in a circular economy framework were then formed and modelled. More specifically, the cases of green facades and electric*



*vehicles were studied. The results showed a decrease of 4 dB(A) following the implementation of the circular economy actions.*

## **1. Εισαγωγή**

Οι πόλεις βρίσκονται στην πρώτη γραμμή μιας παγκόσμιας αλλαγής και παρουσιάζουν μια διχοτομική τάση στο να είναι ταυτόχρονα η αιτία και η λύση για τα παγκόσμια και τοπικά φαινόμενα της κλιματικής κρίσης [1–4]. Σύμφωνα με στοιχεία της Παγκόσμιας Τράπεζας, περίπου το 75 % του πληθυσμού της Ευρώπης και περίπου το 57 % του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε αστικές περιοχές [5,6]. Οι πόλεις συγκεντρώνουν την πλειονότητα του ανθρώπινου πληθυσμού με αυξητική τάση και ταυτόχρονα ευθύνονται για την πλειονότητα της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [7]. Οι πρόσφατες προσπάθειες προς την κατεύθυνση της αστικής βιωσιμότητας και του βρόχου πόρων (resource looping) έχουν ενσωματωθεί στην πρόσφατα διευρυμένη έννοια της κυκλικής οικονομίας και της κυκλικής αστικής ανάπτυξης [8].

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι η μελέτη της συμβιωτικής σχέσης μεταξύ της αστικής κυκλικής ανάπτυξης και της αστικής ησυχίας. Πιο συγκεκριμένα, οι δράσεις της αστικής κυκλικής οικονομίας μπορούν να οδηγήσουν στο συν-όφελος της ησυχίας και ταυτόχρονα μπορεί να επιτευχθεί ένα πραγματικά ήσυχο αστικό ηχητικό περιβάλλον, το οποίο σχεδιάζεται με μια κυκλική προσέγγιση. Επιπλέον, διεξήχθη προκαταρκτική μελέτη για το ηχητικό περιβάλλον μιας αστικής περιοχής μικρής κλίμακας σε μια νησιωτική μεσογειακή πόλη.

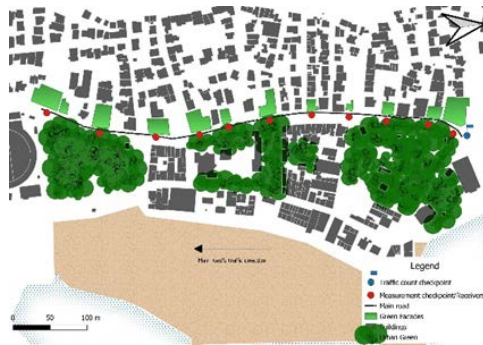
Τα κύρια στοιχεία μιας κυκλικής πόλης που αναμένεται να επηρεάσουν το αστικό ηχητικό περιβάλλον είναι οι υποδομές αστικού πρασίνου, η κινητικότητα και οι μεταφορές, καθώς και η συνολική αλλαγή του τρόπου ζωής. Οι πράσινοι τοίχοι και οι πράσινες στέγες μπορούν να λειτουργήσουν ως μικρότεροι βιότοποι που βελτιώνουν τη διασπορά των ειδών στον αστικό ιστό ενώ παίζουν κρίσιμο ρόλο στην οικολογική λειτουργικότητα κατακερματισμένων περιοχών [9]. Ο βαθμός ηχοαπορρόφησης ενός υλικού, συμπεριλαμβανομένων των πράσινων τοίχων ποικίλλει [10]. Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV), σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEV), θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη μείωση των περιβαλλοντικών πιέσεων και να συμβάλουν σε ένα πιο βιώσιμο σύστημα αστικών μεταφορών παρουσιάζοντας διάφορα συν-οφέλη, όπως η μείωση των επιπέδων θορύβου [11].

## **2. Μεθοδολογία**

Για την αξιολόγηση των συνθηκών θορύβου της συγκεκριμένης περιοχής εφαρμόστηκαν οι οδηγίες που παρέχονται από το μοντέλο οδικού κυκλοφοριακού θορύβου CNOSSOS-EU [12,13]. Το μοντέλο θορύβου CNOSSOS-EU που χρησιμοποιεί το λογισμικό πρόβλεψης θορύβου CadnaA θεωρεί τους ψηφιοποιημένους δρόμους ως πηγές θορύβου και τις ψηφιοποιημένες αστικές δομές (κτίρια) ως εμπόδια για την παρεμβολή του θορύβου. Τα δεδομένα σχετικά με την ισοδύναμη συνεχή ηχοστάθμη (Leq, dBA), μαζί με τις ταυτόχρονες μετρήσεις της κυκλοφορίας, συλλέχθηκαν για μια περίοδο 10 ημερών και αργότερα υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2022 (25/07/2022 - 10/08/2022) αποφεύγοντας τα Σαββατοκύριακα. Παράλληλα, συγκεντρώθηκαν τοπογραφικά δεδομένα όπως το ύψος των κτιρίων, το υλικό των

προσώπων, η κατηγορία και η μορφή του δρόμου και τέλος, η ταχύτητα των οχημάτων.

Πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις στάθμης θορύβου σε 11 σημεία ελέγχου. Τα σημεία ελέγχου είχαν απόσταση 50 μέτρων το ένα από το άλλο και κάθε 10λεπτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε ύψος 1,5 μέτρου από το επίπεδο του εδάφους κατά τη διάρκεια της ημέρας (9.00 - 10.00 π.μ.). Χρησιμοποιήθηκε το ηχόμετρο 01dB Fusion, το οποίο βαθμονομήθηκε πριν τη συλλογή δεδομένων, όπως απαιτείται για όλα τα όργανα μέτρησης κατηγορίας 1 και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου EN61326-1:1997+A1:1998. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των οχημάτων στον υπό μελέτη δρόμο χρησιμοποιώντας τις κατηγορίες ελαφρά οχήματα, μέτρια βαριά, βαριά, μοτοσυκλέτες και μηχανές μεγάλου κυβισμού. Ένας βασικός παράγοντας που καθορίζει τις ιδιότητες ηχοαπορρόφησης ενός συστήματος πράσινου τοίχου, είναι το πορώδες του υλικού και το πάχος της στρώσης του. Για την παρούσα έρευνα, ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης των προσώπων της περιοχής αυξήθηκε σε βαθμό  $\alpha = 0,40$ . Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1, αυξήθηκε ο συντελεστής απορρόφησης των προσώπων των κτιρίων που βλέπουν απευθείας στα 11 σημεία ελέγχου.

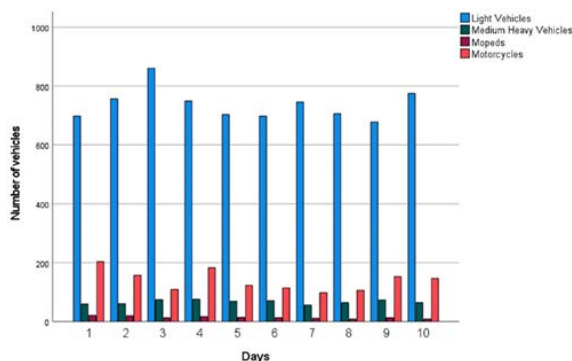


Σχήμα 1. Περιοχή μελέτης

Προκειμένου να προσομοιωθεί η εισαγωγή των EV στο οδικό δίκτυο της συγκεκριμένης περιοχής, εφαρμόστηκαν διορθωτικοί συντελεστές στα επίπεδα θορύβου των καταμετρημένων ελαφρών οχημάτων σύμφωνα με τις οδηγίες του μοντέλου CNOSSOS-EU.

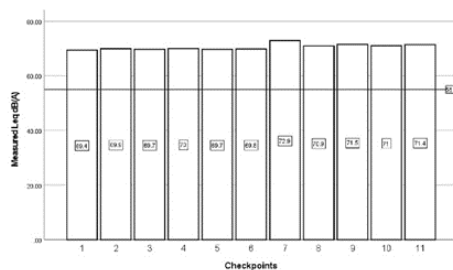
### 3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της καταμέτρησης των οχημάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 2.



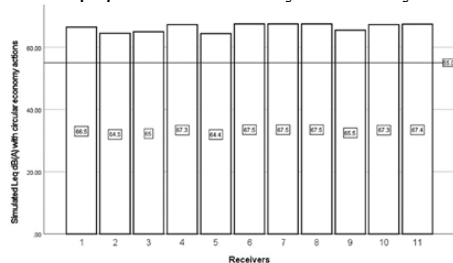
Σχήμα 2. Αποτελέσματα καταμέτρησης και κατηγοριοποίησης οχημάτων.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Τα μετρούμενα επίπεδα θορύβου παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις για κάθε ημέρα καταγραφής, με τα επίπεδα να είναι πάνω από τα προτεινόμενα από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) επίπεδα των 55 dB(A).



Σχήμα 3. Αποτελέσματα δειγματοληψιών θορύβου

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εισαγωγή δράσεων κυκλικής οικονομίας, εξακολουθούν να παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα θορύβου πάνω από τις συστάσεις του ΠΟΥ.



Σχήμα 4. Αποτελέσματα προσομοίωσης δράσεων κυκλικής οικονομίας

Τα μετρούμενα και τα προσομοιωμένα επίπεδα θορύβου στα 11 σημεία ελέγχου/δέκτες συγκρίθηκαν στατιστικά. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος t-test για ζεύγη δειγμάτων προκειμένου να διαπιστωθεί εάν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωμένων επιπέδων θορύβου. Τα αποτελέσματα για τα μετρούμενα επίπεδα θορύβου, σε σχέση με τα υπολογιζόμενα επίπεδα θορύβου με την εισαγωγή δράσεων κυκλικής ανάπτυξης, διαφέρουν σημαντικά με μέση διαφορά 4,17 dB(A).

#### 4. Συμπεράσματα

Η μετάβαση μιας πόλης στην κυκλική οικονομία οδηγεί σε πολλά οφέλη βιωσιμότητας, μεταξύ των οποίων η δημιουργία αστικής ησυχίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναδεικνύουν τον συνδυασμό των ηλεκτρικών οχημάτων και των πράσινων τοίχων, ως πολλά υποσχόμενους συντελεστές προς ένα υγιές αστικό ηχητικό περιβάλλον. Ως εκ τούτου, συνάγεται το συμπέρασμα ότι θα πρέπει να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός μέτρων στο πλαίσιο μιας προσέγγισης κυκλικής οικονομίας, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επιβάρυνση από τον περιβαλλοντικό θόρυβο.

#### 5. Αναφορές

1. Puppim de Oliveira, J.A.; Bellezoni, R.A.; Shih, W.; Bayulken, B. Innovations in Urban Green and Blue Infrastructure: Tackling Local and Global Challenges in Cities. *Journal of Cleaner Production* **2022**, *362*, 132355, doi:10.1016/j.jclepro.2022.132355.
2. Oliveira, J.A.P. de Sustainability Challenges in an Urban Century: Can We Change Urbanization Paths to Make Cities the Solutions for Rather than the Drivers of Global Problems? *Challenges in Sustainability* **2019**, *7*, 1–4, doi:10.12924/cis2019.07010001.
3. Susskind, L.; Kim, A. Building Local Capacity to Adapt to Climate Change. *Climate Policy* **2022**, *22*, 593–606, doi:10.1080/14693062.2021.1874860.
4. Byrne, L.B. Ecology with Cities. *Urban Ecosyst* **2022**, *25*, 835–837, doi:10.1007/s11252-021-01185-5.
5. Urban Population (% of Total Population) - European Union | Data Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=EU> (accessed on 25 July 2022).
6. Urban Population (% of Total Population) | Data Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS> (accessed on 25 July 2022).
7. Urban Environment — European Environment Agency Available online: <https://www.eea.europa.eu/themes/urban/intro> (accessed on 28 May 2022).
8. Ganten, D.; Haines, A.; Souhami, R. Health Co-Benefits of Policies to Tackle Climate Change. *The Lancet* **2010**, *376*, 1802–1804, doi:10.1016/S0140-6736(10)62139-3.
9. Williams, N.S.G.; Lundholm, J.; Scott MacIvor, J. FORUM: Do Green Roofs Help Urban Biodiversity Conservation? *Journal of Applied Ecology* **2014**, *51*, 1643–1649, doi:10.1111/1365-2664.12333.

10. D’Alessandro, F.; Asdrubali, F.; Mencarelli, N. Experimental Evaluation and Modelling of the Sound Absorption Properties of Plants for Indoor Acoustic Applications. *Building and Environment* **2015**, *94*, 913–923, doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.004.
11. Campello-Vicente, H.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Velasco-Sanchez, E. The Effect of Electric Vehicles on Urban Noise Maps. *Applied Acoustics* **2017**, *116*, 59–64, doi:10.1016/j.apacoust.2016.09.018.
12. Kephelopoulos, S.; Paviotti, M.; Anfosso-Lédée, F. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU) Available online: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC72550> (accessed on 27 August 2022).
13. Kephelopoulos, S.; Paviotti, M.; Anfosso-Lédée, F.; Van Maercke, D.; Shilton, S.; Jones, N. Advances in the Development of Common Noise Assessment Methods in Europe: The CNOSSOS-EU Framework for Strategic Environmental Noise Mapping. *Science of The Total Environment* **2014**, *482–483*, 400–410, doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.031.

We acknowledge support of this work by the project “Center of Sustainable and Circular Bioeconomy [Aegean\_BIOECONOMY]” (MIS 5045851) which is implemented under the Action “[Reinforcement of the Research and Innovation Infrastructure](#)”, funded by the Operational Programme "Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation" (NSRF 2014-2020) and co-financed by Greece and the European Union (European Regional Development Fund).

## **Σύνθεση ηχοτοπίου με σκοπό την αστική βιωσιμότητα**

Μαμπζής Χριστίνα<sup>1</sup>, Τσαλιγόπουλος Άγγελος<sup>2</sup>, Λαμπρινή Παππά<sup>3</sup>, Μασίνος Γιάννης<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου [env16047@env.aegean.gr](mailto:env16047@env.aegean.gr)

<sup>2</sup>PhD, Εργαστήριο Ακουστικής Οικολογίας, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, [tsaligoroupos@env.aegean.gr](mailto:tsaligoroupos@env.aegean.gr)

<sup>3</sup>Καθηγήτρια, Σχολή Γεωπονίας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων [lrappa@uoi.gr](mailto:lrappa@uoi.gr)

<sup>4</sup>Καθηγητής, Εργαστήριο Ακουστικής Οικολογίας, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, [matsinos@aegean.gr](mailto:matsinos@aegean.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας, ήταν η δημιουργία μιας εύχρηστης πλατφόρμας ανάδειξης ηχητικών προτιμήσεων που αφορούν ένα υποθετικό δημόσιο ηχητικό περιβάλλον. Για τη συγκεκριμένη έρευνα πραγματοποιήθηκαν ηχογραφήσεις που αφορούν τις κατηγορίες της ανθρωποφωνίας, της βιοφωνίας και της γεωφωνίας, χρησιμοποιώντας φορητό ψηφιακό καταγραφέα. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες του λογισμικού Audacity, μελετήθηκαν οι απόψεις των κατοίκων μιας συνοικίας της Αθήνας, όσον αφορά το συνδυαστικό περιεχόμενο των ηχογραφήσεων. Οι προτιμήσεις των συμμετεχόντων, χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή μιας νέας ηχητικής σύνθεσης δημιουργώντας ένα μοναδικό για κάθε συμμετέχοντα ηχητικό περιβάλλον και συνεπώς ηχοτόπιο. Οι νέες αυτές συνθέσεις, αναλύθηκαν με σκοπό την εξαγωγή των ακουστικών δεικτών βιοποικιλότητας και μελετήθηκαν όσον αφορά το βαθμό ηχητικής πολυπλοκότητας και ποικιλίας.

### ***Soundscape synthesis for urban sustainability***

#### **ABSTRACT**

*The aim of this research was to create an easy-to-use platform for highlighting sound preferences related to a hypothetical public sound environment. Sound recordings were conducted in the categories of anthropophony, biophony and geophony using a digital recorder. Utilizing the capabilities of the Audacity software, the opinion of the residents of an Athenian neighborhood were studied in regard of the combined content of the recordings. The participants' preferences were used in order to extract a new sound composition, creating a unique sound environment and thus soundscape for each participant. These new compositions were analyzed in order to extract the acoustic biodiversity indicators and later studied in terms of acoustic complexity and diversity.*

## Εισαγωγή

Ο κόσμος είναι γεμάτος από ήχους που εκπέμπονται από μια πληθώρα πηγών, με ποικιλία τρόπων, για διαφορετικούς λόγους. Μπορούν να παραχθούν εσκεμμένα ή όχι και αντίστοιχα, μπορούν να γίνουν αντιληπτοί συνειδητά ή μη. Περίπου οι μισοί από όλους τους πολίτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ζουν σε περιοχές που δεν παρέχουν ηχητική άνεση στους κατοίκους της [1]. Σε αντίθεση με πολλά άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, τα παράπονα του κοινού σχετικά με τον περιβαλλοντικό θόρυβο έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια [2]. Η διαχείριση του θορύβου και η δημιουργία ήσυχων και ευεργετικών ηχητικά περιοχών, αποτελεί σημαντική πρόκληση που απαιτεί καινοτόμες προσεγγίσεις.

Σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας, ήταν η δημιουργία μιας εύπλαστης πλατφόρμας ανάδειξης ηχητικών προτιμήσεων που αφορούν ένα “υποθετικό” δημόσιο ηχητικό περιβάλλον. Η συγκεκριμένη έρευνα αποτελεί ένα αρχικό στάδιο με σκοπό την υποστήριξη μιας πιο συμμετοχικής διακυβέρνησης του τόπου και του αστικού περιβάλλοντος.

### 1. Θεωρητικό υπόβαθρο

#### 1.1 Η έννοια του ηχοτοπίου

Ως ηχοτοπίο έχει οριστεί το ηχητικό περιβάλλον με έμφαση στον τρόπο που γίνεται αντιληπτό και κατανοητό από τα άτομα ή από μια κοινωνία [3]. Παράλληλα όμως, ως ηχοτοπίο έχει χαρακτηριστεί η συνύπαρξη των βιολογικών, γεωφυσικών και ανθρωπογενών ήχων που προέρχονται από το τοπίο αντανακλώντας βασικές οικοσυστημικές διεργασίες και ανθρώπινες δραστηριότητες [4]. Το ηχοτοπίο, αν και έχει οικολογικές ρίζες διότι σχετίζεται με το φυσικό περιβάλλον και τις αμοιβαίες σχέσεις του με τους ζωντανούς οργανισμούς, έχει χρησιμοποιηθεί ως όρος από διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως εκείνους των φυσικών και κοινωνικών επιστημών, καθώς και των τεχνών. Τόσο από φυσιοκεντρική όσο και από ανθρωποκεντρική σκοπιά, η έννοια του ηχοτοπίου έχει ενσωματωθεί σε ποικίλες επιστημονικές μελέτες με αποτέλεσμα να θεωρείται πλέον διαθεματική και αρκετά ευρεία.

#### 1.2 Επιστήμες ήχου

Η ακουστική οικολογία έχει βασιστεί στη θεώρηση και στην ακρόαση του ηχητικού περιβάλλοντος ως μια μουσική σύνθεση. Σύμφωνα με τη θεωρία της ακουστικής οικολογίας ένα ηχοτοπίο συντίθεται από ήχους υποβάθρου και ήχους προσκηνίου, ενώ παράλληλα μελετά χαρακτηριστικά ηχητικά γεγονότα που ονομάζονται ηχώσημα (soundmarks), που σε αντιστοιχία με τα τοπόσημα, αφορούν ήχους που ταυτίζονται με συγκεκριμένους τόπους.

Η οικολογική ακουστική αφορά τη μελέτη του οικολογικού περιεχομένου του ήχου σε ένα ευρύ φάσμα χωρικής και χρονικής κλίμακας ώστε να αντιμετωπιστούν οικολογικά ζητήματα όπως η διαχείριση της βιοποικιλότητας. Αν και στενά συνδεδεμένη με την βιοακουστική, διαφέρει στο γεγονός πως αναγνωρίζει τον ήχο ως δείκτη οικολογικών διεργασιών σε επίπεδο πληθυσμού και κοινότητας, ενώ η βιοακουστική είναι πεδίο έρευνας συμπεριφοράς ειδών μελετώντας τον ήχο ως

σήμα που μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ ατόμων [5]. Η οικολογική ακουστική αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την αξιολόγηση βιοποικιλότητας αξιοποιώντας δεδομένα ηχοτοπίου. Το γεγονός πως κάθε αλλαγή στο περιβάλλον έχει άμεσο αντίκτυπο στην ακουστική συμπεριφορά των οργανισμών, καθιστά τους ήχους σημαντικό εργαλείο ανίχνευσης συμπεριφορικών διαφοροποιήσεων που συνδέονται και με την κλιματική αλλαγή σε κλίμακα μεμονωμένων ειδών, πληθυσμών, κοινοτήτων και τοπίων.

### *1.3 Ακουστικοί δείκτες*

Ως ακουστικός δείκτης μπορεί να οριστεί, το στατιστικό μέγεθος που συνοψίζει κάποια πτυχή της κατανομής της ακουστικής ενέργειας και άλλων πληροφοριών σε μια ηχογράφηση. Ο δείκτης ηχοτοπίου NDSI (Normalized Difference Soundscape Index), εκτιμά το επίπεδο της ανθρώπινης διαταραχής στο ηχοτοπίο, υπολογίζοντας την αναλογία βιοήχων και ανθρωποήχων σε ένα ηχητικό δείγμα. Στόχος του δείκτη είναι η εκτίμηση του επιπέδου των ανθρωπογενών διαταραχών στο ηχοτοπίο, αξιοποιώντας το γεγονός πως οι ανθρωποήχοι κυμαίνονται κυρίως μεταξύ του εύρους συχνοτήτων 1 - 2 kHz, ενώ οι βιοήχοι μεταξύ 2 - 8 kHz. Ο δείκτης ακουστικής πολυπλοκότητας (Acoustic Complexity Index, ACI), βασίζεται στην παρατήρηση πως οι βιοτικοί ήχοι όπως το τραγούδι των πουλιών, χαρακτηρίζονται από μια μεταβλητότητα εντάσεων, ενώ οι ανθρωπογενείς ήχοι (π.χ. θόρυβος οδικής κυκλοφορίας) παρουσιάζουν σταθερές τιμές έντασης. Πιο συγκεκριμένα, ο συγκεκριμένος δείκτης, υπολογίζει τον αριθμό των μεγάλων κορυφώσεων (peaks) όσον αφορά την ένταση, σε ένα φασματογράφημα [6].

## **2. Μεθοδολογία**

### *2.1 Συλλογή δεδομένων*

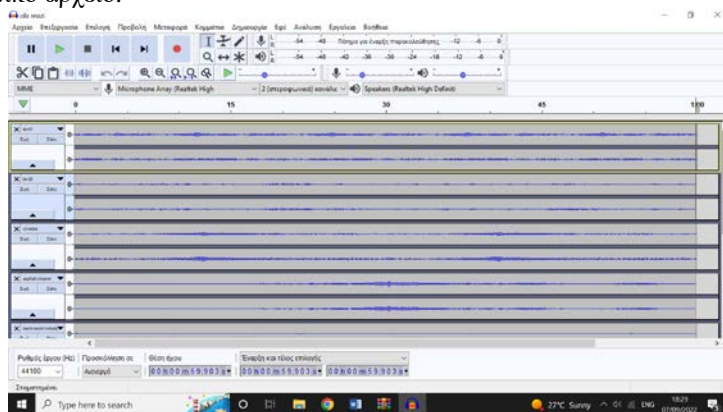
Για τη συγκεκριμένη έρευνα πραγματοποιήθηκαν ηχογραφήσεις που αφορούν τις κατηγορίες της ανθρωποφωνίας, της βιοφωνίας και της γεωφωνίας, χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό φορητό καταγραφέα TASCAM DR-05X. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν καταγραφές 2 λεπτών των παρακάτω ηχόσημων: Πουλιά, Γρύλος, Έντομα, Σκύλοι, Νερό - Σιντριβάνι, Φύλλα και άνεμος, Ρυάκι, Κούνια, Μουσική υποβάθρου, Ήχοι HVAC, Φωνές, Θόρυβος οδικής κυκλοφορίας και Ηλεκτρικός θόρυβος. Το ανοιχτού κώδικα λογισμικό Audacity χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των ηχητικών αρχείων wave που συγκεντρώθηκαν. Η επεξεργασία αφορούσε την αφαίρεση τμημάτων του ηχητικού αρχείου στην αρχή ή στο τέλος της ηχογράφησης να υπάρχει ομοιομορφία στη διάρκεια των ηχητικών αρχείων.

### *2.2 Εξαγωγή νέων δεδομένων*

Αξιοποιώντας τις δυνατότητες του λογισμικού Audacity, μελετήθηκαν οι στάσεις και οι απόψεις 40 κατοίκων μιας συνοικίας της Αθήνας, όσον αφορά το συνδυαστικό περιεχόμενο των ηχογραφήσεων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, οι προτιμήσεις των συμμετεχόντων, χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή μιας



νέας ηχητικής σύνθεσης δημιουργώντας ένα μοναδικό για κάθε συμμετέχοντα ηχητικό περιβάλλον και συνεπώς ηχοτοπίο. Πρακτικά, κάθε συμμετέχοντα αυξομείωνε την ένταση των καταγεγραμμένων ηχόσημων δημιουργώντας ένα νέο ηχητικό αρχείο.

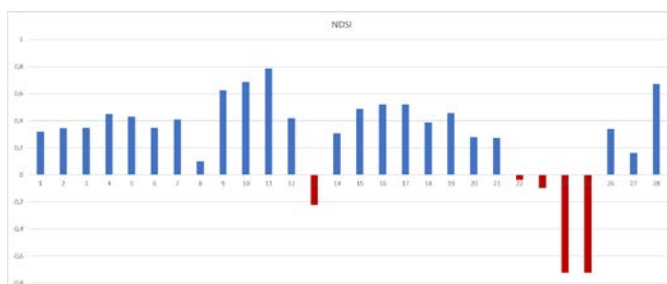


Σχήμα 1 Το λογισμικό Audacity όπως χρησιμοποιήθηκε από τους συμμετέχοντες

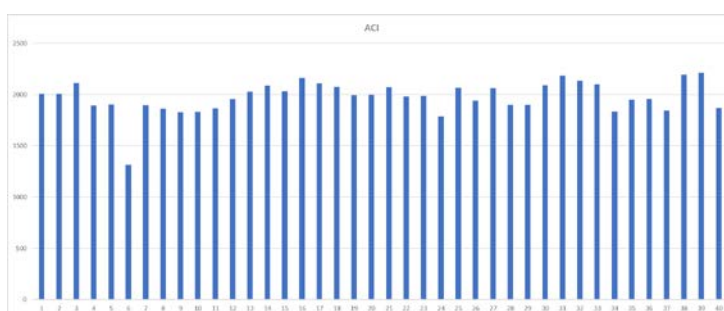
Οι νέες αυτές συνθέσεις, αναλύθηκαν στο λογισμικό R statistics με σκοπό την εξαγωγή των ακουστικών δεικτών βιοποικιλότητας και μελετήθηκαν όσον αφορά το βαθμό ηχητικής πολυπλοκότητας και ποικιλίας. Το λογισμικό R Statistics χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την εξαγωγή ακουστικών δεικτών βιοποικιλότητας. Πιο συγκεκριμένα, τα υπολογιστικά πακέτα της R, seewave και soundecology χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εύρεση ακουστικών δεικτών οικολογίας ηχοτοπίου. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό SPSS, πραγματοποιήθηκε η στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων, ο οποία ανέδειξε τις κοινές απόψεις και στάσεις των συμμετεχόντων όσον αφορά το ηχητικό περιβάλλον στο οποίο επιθυμούν να ζουν.

## 1. Αποτελέσματα

Από τους 40 συμμετέχοντες προέκυψαν 40 νέα ηχητικά αρχεία τα οποία μελετήθηκαν όσον αφορά το φασματικό τους περιεχόμενο. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επιπέδων του δείκτη NDSI. Εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις (οι πέντε μπάρες με κόκκινο χρώμα με αρνητικό πρόσημο), στα περισσότερα ηχοτοπία που συντέθηκαν από τους συμμετέχοντες κυριαρχεί η βιοφωνία και η γεωφωνία. Παράλληλα, στο σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη ακουστικής πολυπλοκότητας.



Σχήμα 2 Τα αποτελέσματα του δείκτη NDSI από τα 40 νέα ηχητικά αρχεία που προέκυψαν



Σχήμα 3 Τα αποτελέσματα του δείκτη ACI από τα 40 νέα ηχητικά αρχεία που προέκυψαν

Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση μεταβλητών. Συνεπώς, δημιουργήθηκαν οι τρεις νέες μεταβλητές της ανθρωποφωνίας, βιοφωνίας και της γεωφωνίας. Αυτές οι νέες μεταβλητές παρουσιάζουν τις τρεις διαστάσεις που περιγράφουν τους κύριους προβληματισμούς της έρευνας μέσω των μέσων όρων των απαντήσεων που δόθηκαν. Οι τρεις διαστάσεις και τα ηχόσημα - ερωτήσεις που τις σχηματίζουν παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Οι τρεις διαστάσεις της έρευνας

Ανθρωποφωνία	Βιοφωνία	Γεωφωνία
Θόρυβος οδικής κυκλοφορίας	Πουλιά	Ήχοι νερού – σιντριβάνι
Ήχοι HVAC	Έντομα	Ρυάκι
Κούνια	Γρύλοι	Άνεμος – φύλλα
Μουσική υποβάθρου	Σκύλοι	
Ηλεκτρικοί ήχοι		
Φωνές		

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περιγραφικής στατιστικής των νέων ομαδοποιημένων μεταβλητών, της ανθρωποφωνίας, της γεωφωνίας και της βιοφωνίας. Όπως φαίνεται, οι μεταβλητές δεν ακολουθούν κανονική κατανομή

(Kurtosis Ανθρωποφωνία = -1.445, βιοφωνία = -1.716 και γεωφωνία = -1.656 > ±1) και παρουσιάζουν μια λεπτόκυρτη κατανομή.

Πίνακας 2 Περιγραφική στατιστική ομαδοποιημένων μεταβλητών

	Ανθρωποφωνία	Βιοφωνία	Γεωφωνία
N	40	40	40
Mean	2.4542	3.6850	4.0250
Median	2.6667	4.0000	4.8333
Std. Deviation	.92063	1.76513	1.89825
Variance	.848	3.116	3.603
Skewness	-.110	-.015	-.184
Std. Error of Skewness	.374	.374	.374
Kurtosis	<b>-1.445</b>	<b>-1.716</b>	<b>-1.656</b>
Std. Error of Kurtosis	.733	.733	.733
Minimum	1.00	1.00	1.00
Maximum	4.00	6.40	6.67

## 2. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να αναδείξει τις συνέπειες και τα οφέλη των ηχητικών προτιμήσεων των κατοίκων μιας αστικής περιοχής, όσον αφορά τα επίπεδα ακουστικής πολυπλοκότητας και ποικιλίας. Η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου προκαταβολικά των δράσεων αστικού και ηχητικού σχεδιασμού, μπορεί να προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα πριν την υλοποίηση τους και τελικά να συνεισφέρουν στην αστική βιωσιμότητα.

## 3. Αναφορές

1. Truax, B. Acoustic Sustainability in Urban Design: Lessons from the World Soundscape Project. *Cities & Health* **2021**, *5*, 122–126, doi:10.1080/23748834.2019.1585133.
2. Gidlöf-Gunnarsson, A.; Öhrström, E. Attractive “Quiet” Courtyards: A Potential Modifier of Urban Residents’ Responses to Road Traffic Noise? *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2010**, *7*, 3359–3375, doi:10.3390/ijerph7093359.
3. Committee ISO/TC 043 “Acoustics” Available online: <https://isotc.iso.org/livelink/livelink/open/tc43> (accessed on 25 June 2022).
4. Pijanowski, B.C.; Villanueva-Rivera, L.J.; Dumyahn, S.L.; Farina, A.; Krause, B.L.; Napolitano, B.M.; Gage, S.H.; Pieretti, N. Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. *BioScience* **2011**, *61*, 203–216, doi:10.1525/bio.2011.61.3.6.
5. Sœur, J.; Farina, A. Ecoacoustics: The Ecological Investigation and Interpretation of Environmental Sound. *Biosemiotics* **2015**, *8*, 493–502, doi:10.1007/s12304-015-9248-x.
6. Pieretti, N.; Farina, A. Application of a Recently Introduced Index for Acoustic Complexity to an Avian Soundscape with Traffic Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America* **2013**, *134*, 891–900, doi:10.1121/1.4807812.

***Μεθοδολογία για τον ηχητικό σχεδιασμό, σύνθεση και αξιολόγηση ιστορικών ηχοτοπίων. Μελέτη περίπτωσης: Η Κρήτη του 19<sup>ου</sup> αιώνα υπό το βλέμμα του περιηγητή Robert Pashley***

Γιώργος Δεδούσης  
Υποψήφιος διδάκτορας  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
gdedousis@music.uoa.gr

Αρετή Ανδρεοπούλου  
Επίκουρη Καθηγήτρια  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
a.andreopoulou@music.uoa.gr

Αναστασία Γεωργάκη  
Καθηγήτρια  
Εργαστήριο Μουσικής  
Ακουστικής Τεχνολογίας  
ΕΚΠΑ  
georgaki@music.uoa.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα έρευνα περιγράφει τον σχεδιασμό ιστορικά ενημερων ηχοτοπίων προς ενσωμάτωση σε σύγχρονες εφαρμογές ταξιδιωτικών περιηγήσεων, που έλαβε χώρα στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου TRACCE (Travelogue with Augmented Cultural & Contemporary Experience). Εκτός από τη δημιουργική διαδικασία και τις τεχνικές λεπτομέρειες, παρουσιάζονται οι προκλήσεις σχεδιασμού, οι οποίες προκύπτουν κυρίως από α) τα περιορισμένα δεδομένα που είναι διαθέσιμα και θα επέτρεπαν μία ακριβή και πειστική ανακατασκευή του ακουστικού περιβάλλοντος, β) την ανάγκη για ποικίλες ακουστικές απεικονίσεις που θα κρατούν αμείωτη την προσοχή των χρηστών και γ) τη δυσκολία στο σχεδιασμό ηχοτοπίων που να είναι ενδιαφέροντα, κατάλληλα και κατατοπιστικά για ένα ευρύ κοινό διαφόρων ηλικιακών ομάδων, μορφωτικού υπόβαθρου και αισθητηριακών ικανοτήτων. Το άρθρο κλείνει με την παρουσίαση αποτελεσμάτων μιας πρώτης αξιολόγησης των σχεδιασμένων ηχοτοπίων.*

***Methodology for the design, composition, and evaluation of historically informed soundscapes. A case study of Robert Pashley's 19<sup>th</sup> century Crete.***

### **ABSTRACT**

*This paper describes the design of historically informed soundscapes to be incorporated in modern travel-guide applications. The work stems from the research project TRACCE (TRavelogue with Augmented Cultural & Contemporary Experience). Apart from the creative process and technical details, this paper discusses the design challenges, which mainly stem from a) the limited data available which would allow for an accurate and convincing reconstruction of the acoustic environments, b) the need for diverse auditory displays which would grasp the users' attention, and c) the difficulty in designing soundscapes which would be interesting, appropriate, and informative for a wide audience of various age groups, educational backgrounds, and sensory abilities. The paper concludes with preliminary results from a user evaluation study of the designed soundscapes.*

## Εισαγωγή

Ο όρος Ηχοτοπίο (Soundscape), που εισήχθη το 1969 από τον Murray Schafer [1], έχει αποκτήσει πλέον διάφορες επιστημονικές και δημιουργικές πτυχές. Σχετίζεται με σπουδές στην Ακουστική Οικολογία και περιγράφει την ακουστική ενέργεια/πληροφορία που υπάρχει σε έναν τόπο. Έχει υποστηριχθεί ότι οι ήχοι στο προσκήνιο που, είτε προκαλούνται από, είτε απαιτούν την άμεση προσοχή του ακροατή, είναι αυτοί που συνδέονται λιγότερο με το τοπίο. Αντιθέτως, οι ήχοι παρασκήνιου, που είναι γεγονότα χαμηλού επιπέδου, προερχόμενα από πολλαπλές πηγές ήχου, αναμειγμένα σε ένα δυσδιάκριτο σώμα, σχετίζονται ιδιαίτερα με αυτό [2]. Οι σύγχρονες συνθέσεις ηχοτοπίων σχετίζονται με διάφορα ακουστικά φαινόμενα που κυμαίνονται από ήχους φύσης μέχρι καλλιτεχνικές δημιουργίες [3].

Οι ηχητικοί περίπατοι και οι καθοδηγούμενες ξεναγήσεις, που έχουν εμπλουτιστεί με προ-ηχογραφημένες πληροφορίες (ηχογραφήσεις ηχοτοπίων, αφήγηση, μουσική, κλπ.) και συνήθως αναπαράγονται μέσω ακουστικών, εξελίσσονται σε πολύ ενδιαφέροντα τρόπο επαύξησης της εμπειρίας του χρήστη σε μουσεία, αρχαιολογικούς χώρους, γκαλερί κλπ. [4]. Ταυτόχρονα, οι περιηγήσεις με εικονικό ήχο προσφέρουν στους χρήστες τη δυνατότητα να ταξιδέψουν νοητά σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου και να εμβυθιστούν σε διαφορετικά ηχοτοπία από την άνεση των σπιτιών τους [5]–[7] δημιουργώντας μια νέα μορφή εικονικού ηχητικού τουρισμού.

Αυτή η εργασία παρουσιάζει τη διαδικασία σχεδιασμού ιστορικά ενήμερων ηχοτοπίων που θα ενσωματωθούν σε σύγχρονες εφαρμογές ταξιδιωτικών οδηγιών. Περιγράφονται η δημιουργική διαδικασία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά, ακολουθούμενα από ανάλυση των σχεδιαστικών προκλήσεων. Αυτές οι προκλήσεις προκύπτουν από την έλλειψη δεδομένων, που είναι χαρακτηριστικά της ηχητικής ποιότητας των ηχοτοπίων δύο αιώνων πριν, την ανάγκη για ποικίλους ακουστικούς σχεδιασμούς που θα αιχμαλωτίζουν την προσοχή των χρηστών, καθώς και τις δυσκολίες στο σχεδιασμό κατάλληλου και ενημερωτικού περιεχομένου για ένα ευρύ κοινό διαφόρων ηλικιακών ομάδων, μορφωτικού υποβάθρου και αισθητηριακών ικανοτήτων. Το άρθρο κλείνει με την παρουσίαση αποτελεσμάτων μιας πρώτης αξιολόγησης των σχεδιασμένων ηχοτοπίων.

### 1. Σχεδιασμός ιστορικά ενήμερων ηχοτοπίων

Ο σχεδιασμός ιστορικά ενήμερων ηχοτοπίων, που έχουν δηλαδή σχεδιαστεί να προσομοιάζουν κατά το δυνατόν στα ηχητικά πεδία που αντιλαμβάνονταν οι ταξιδιώτες στα συγκεκριμένα φυσικά σημεία κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής στιγμής στο παρελθόν, απαιτεί εκτεταμένη έρευνα. Στην περίπτωση του παρόντος έργου, κύριες πηγές πληροφοριών για την ακουστική οικολογία αυτών των περιοχών, αιώνες πριν, είναι οι περιγραφές του τοπίου μέσα από τα κείμενα των ημερολογίων ταξιδιών των περιηγητών, που ορισμένες φορές περιλαμβάνουν αναφορές σε ήχους της φύσης ή των ανθρώπων. Τις περισσότερες φορές, οι ακουστικές πληροφορίες ήταν έμμεσες και, ως εκ τούτου, οι πιθανές πηγές ήχου συνάγονταν από την γενικότερη περιγραφή του περιβάλλοντος από τον συγγραφέα.

Τα «ακουστικά παζλ» συμπληρώθηκαν με πληροφορίες που αντλήθηκαν από ζωγραφιές και σκίτσα που περιέχονταν στα κείμενα και στη γενικότερη

εικονογραφική βάση του ερευνητικού έργου, καθώς και από τη σύγχρονη χαρτογραφία. Τα ηχοτοπία προέκυψαν ως συνθέσεις πρόσφατων ηχογραφήσεων in-situ και ηχητικών δειγμάτων από δημόσιες βιβλιοθήκες, συνδυασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να περιγράφουν τα επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος. Το περιεχόμενο εμπλουτίστηκε με αφηγήσεις σύντομων αποσπασμάτων από το πρωτότυπο κείμενο, που στόχευαν να βοηθήσουν τους ακροατές να κατανοήσουν την ιστορία που εκτυλίσσεται σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος, καθώς και από αφηρημένα μουσικά στοιχεία (συνθέσεις ηλεκτροακουστικής μουσικής) [8].

## 2. Αρχιτεκτονική ηχοτοπίων

Όπως τα μουσεία, τα επιστημονικά/πολιτιστικά κέντρα, οι ζωολογικοί κήποι και λοιποί χώροι που αποσκοπούν στη διαπαιδαγώγηση και την ψυχαγωγία ετερόκλιτου πληθυσμού επισκεπτών, η πλατφόρμα του έργου TRACCE, που προωθεί τις επαυξημένες πολιτιστικές διαδρομές, εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής των Informal Learning Environments (ILEs) [9]. Ως εκ τούτου, το περιεχόμενο των ηχοτοπίων, που δημιουργήθηκαν για να ενισχύσουν αυτήν την εμπειρία, πρέπει να είναι ενδιαφέρον και κατάλληλο για ένα ευρύ κοινό διαφόρων ηλικιακών ομάδων, εκπαιδευτικού υπόβαθρου και αντιληπτικών ικανοτήτων.

Σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, το περιεχόμενο των ηχοτοπίων χωρίστηκε σε τέσσερα διαφορετικά ηχητικά επίπεδα: Ήχοι Περιβάλλοντος (*Background*), Ήχοι Διάδρασης (*Storytelling*), Αφήγηση (*Narration*) και Μουσική (*Music*). Κάθε ένα από αυτά μπορεί να σταθεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, αλλά, ταυτόχρονα, μπορούν να αναπαραχθούν σε οποιονδήποτε συνδυασμό, με τους χρήστες να έχουν πλήρη ελευθερία ελέγχου όσον αφορά το περιεχόμενο του ηχοτοπίου που ακούν, δημιουργώντας εξατομικευμένες εκδόσεις των ηχοτοπίων που ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες και τις προτιμήσεις τους. Όλες οι συνθέσεις ακολουθούν μια οπτική σε πρώτο πρόσωπο, αυτή του ταξιδιώτη - συγγραφέα. Αυτή η προσέγγιση των πολλαπλών ηχητικών επιπέδων βασίζεται σε προηγούμενες έρευνες και μελέτες ηχοτοπίων που συνδύαζαν προ-ηχογραφημένο κείμενο, μουσική και ήχους περιβάλλοντος [10], [11].

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή της αρχιτεκτονικής των συνθέσεων. Αναλυτικότερη περιγραφή της εν λόγω αρχιτεκτονικής έχει δημοσιευτεί στο [8].

- *Background*: Πρόκειται για στερεοφωνικό αρχείο ήχου, το οποίο περιλαμβάνει ήχους, στατικούς και κινούμενους, που χαρακτηρίζουν το ηχητικό περιβάλλον του περιηγητή, τη στιγμή της ιστορικής περιήγησης.
- *Storytelling*: Πρόκειται για αμφιωτικό αρχείο ήχου, το οποίο περιλαμβάνει ήχους που προκαλούνται από τη διάδραση του περιηγητή με τον περιβάλλοντα χώρο, καθώς και ήχους που προκαλούνται από άλλους παράγοντες, οι οποίοι όμως έχουν άμεση σχέση με τη δράση της ιστορίας.
- *Narration*: Πρόκειται για μονοφωνικό αρχείο ήχου, που τοποθετείται στο κέντρο της μίξης, και περιλαμβάνει αφήγηση επιλεγμένων αποσπασμάτων από το κείμενο, στη γλώσσα συγγραφής τους, το περιεχόμενο των οποίων αναδεικνύει πτυχές της ιστορίας που είναι δύσκολο ή αδύνατο να αποδοθούν καθαρά μέσω της ακουστικής ανακατασκευής του ηχοτοπίου.
- *Music*: Πρόκειται για αμφιωτικό αρχείο ήχου, το οποίο περιλαμβάνει μία σύγχρονη σύνθεση ηλεκτροακουστικής μουσικής βασισμένη σε

στοχαστικές ερμηνείες των υπόλοιπων τριών επιπέδων. Με αυτόν τον τρόπο η μουσική αναμειγνύεται ομαλά με το υπόλοιπο περιεχόμενο, διατηρώντας παράλληλα τα μοναδικά χαρακτηριστικά της.

Στο πλαίσιο του εν λόγω έργου, και με βάση την παραπάνω αρχιτεκτονική, σχεδιάστηκε πληθώρα ηχοτοπίων, καθένα από τα οποία βασιζόταν σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως αυτά περιγράφονταν στο ημερολόγιο ταξιδιού του εκάστοτε περιηγητή, που επισκέφτηκε την Ελλάδα μερικούς αιώνες πριν, ακολουθώντας διαδρομές τις οποίες και κατέγραψε. Στην παρούσα εργασία επικεντρώναστε στην αξιολόγηση ιστορικά ενήμερων ηχοτοπίων της Κρήτης του 19<sup>ου</sup> αιώνα, βασισμένα στις περιγραφές του ταξιδιωτικού ημερολογίου του Robert Pashley [12].

### 3. Πειραματική διαδικασία

Στόχος ήταν η διεξαγωγή ενός οικολογικά έγκυρου πειράματος, το οποίο να προσομοιάζει, κατά το δυνατόν, τις πραγματικές συνθήκες ακρόασης των ηχοτοπίων που ο σχεδιασμός είναι να πραγματοποιούνται εντός του σύγχρονου αστικού και υπαίθριου ιστού της Ελλάδας. Πιο συγκεκριμένα, τα υπό αξιολόγηση ηχοτοπία, τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένους προορισμούς (σημεία ενδιαφέροντος) στο νησί της Κρήτης, πρόκειται να ακουστούν από τους χρήστες in-situ μέσω της διαδραστικής ταξιδιωτικής εφαρμογής TRACCE, καθώς αυτοί «ακολουθούν τα βήματα» του Pashley. Σε τέτοιες συνθήκες ακρόασης σε εξωτερικούς χώρους, όπου, τόσο οι ηχητικές παρεμβολές από τον περιβάλλοντα χώρο, όσο και η ποιότητα των ακουστικών ακρόασης είναι μη ελεγχόμενες, είναι αναμενόμενο μια πληθώρα εξωγενών παραγόντων να επηρεάζει την ποιότητα της ακουστικής εμπειρίας των χρηστών. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα πειραματικό πλαίσιο ταυτόχρονης ακρόασης των υπό-αξιολόγηση ιστορικών ηχοτοπίων της Κρήτης με προ-ηχογραφημένα αποσπάσματα του σύγχρονου ηχοτοπίου του νησιού. Στο πείραμα συμμετείχαν συνολικά 25 άτομα (11 άντρες, 14 γυναίκες), φοιτητές/τριες ή απόφοιτοι του Τμήματος Μουσικών Σπουδών ΕΚΠΑ, ηλικίας 20 έως 45 ετών (mean: 23 έτη, STD: 6,3 έτη).

Τα σύγχρονα ηχοτοπία ηχογραφήθηκαν κατά τη διάρκεια επιτόπιας έρευνας τον Οκτώβριο του 2021 στην Κρήτη. Σύμφωνα με το ταξιδιωτικό ημερολόγιο του Pashley [12] περιλάμβαναν πληθώρα σταθμών ενδιαφέροντος σε Χανιά, Ρέθυμνο και Ηράκλειο. Οι τρισδιάστατες ηχογραφήσεις σε μορφή 1<sup>st</sup> order Ambisonics, έγιναν με τον φορητό καταγραφέα ήχου Zoom H3-VR, και οι αντίστοιχες τιμές στάθμης έντασης (dBA) στους χώρους ηχογράφησης καταγράφηκαν με τον αναλυτή ήχου Brüel & Kjaer, 2260 Investigator. Η καταγραφή των μέσων τιμών στάθμης έντασης in-situ παρείχε τη δυνατότητα αναπαραγωγής των σχετικών αρχείων ήχου σε ρεαλιστικές εντάσεις, αντίστοιχες με αυτές που θα βίωνε ο ακροατής αν βρισκόταν επί τόπου στο σημείο ενδιαφέροντος, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την οικολογική εγκυρότητα του πειράματος. Η κάθε καταγραφή διαρκούσε περίπου 10 λεπτά. Η διάρκεια εξαρτιόταν από την ηχητική πολυπλοκότητα του ηχοτοπίου.

Του πειράματος προηγήθηκε διεξοδική ακρόαση των ηχογραφήσεων προκειμένου, αφενός να επιλεγούν τα καταλληλότερα και πιο ενδιαφέροντα ηχητικά αποσπάσματα και αφετέρου να αφαιρεθούν αποσπάσματα το περιεχόμενο των οποίων μπορούσε να θεωρηθεί ακατάλληλο. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιλέχθηκαν αποσπάσματα ηχογραφημένων ηχοτοπίων από τις ακόλουθες περιοχές:

*Κέντρο Χανίων, Είσοδος Φαραγγιού Σαμαριάς, Μονή Γωνιά (Κολυμβάρι) και Σπηλιά Μελιδονίου.* Η επεξεργασία των ηχογραφήσεων έγινε στο λογισμικό Reaper.

Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο ελεγχόμενο περιβάλλον ακρόασης του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας (LabMAT) του ΕΚΠΑ. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε 8 ηχεία, KRK ROKIT 5 RPG2, τοποθετημένα σε κυκλική διάταξη ακτίνας 1.7m, συνδεδεμένα σε κάρτα ήχου Steinberg UR-824, και έναν φορητό υπολογιστή Dell G5 15. Η στάθμη έντασης κάθε ηχείου βαθμονομήθηκε στα 72dB. Η εν λόγω διάταξη έλεγχε την αναπαραγωγή των προαναφερθέντων, σύγχρονων, ηχογραφημένων ηχοτοπίων της Κρήτης. Με χρήση της σουίτας εφαρμογών SPARTA, στο DAW Reaper, οι αμφιφωνικές ηχογραφήσεις 1<sup>ης</sup> τάξης (1<sup>st</sup> order Ambisonics) αναπαρήχθησαν σε οκτακάναλη περιφωνική διάταξη. Όπως προαναφέρθηκε, η αναπαραγωγή των ηχογραφήσεων γινόταν στις πραγματικές στάθμες έντασης των ηχοτοπίων, όπως αυτές είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια της εγγραφής τους στην Κρήτη.

Στο κέντρο της περιφωνικής διάταξης (acoustic sweet-spot) τοποθετούνταν το εκάστοτε υποκείμενο του πειράματος. Χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή MacBook Pro M1 2020, συνδεδεμένο σε μια κάρτα ήχου Steinberg UR-22C, μέσω διεπαφής στο περιβάλλον Max/MSP και ενσύρματων ακουστικών της επιλογής τους, τα υποκείμενα μπορούσαν να ακούσουν τα υπό αξιολόγηση ιστορικά ηχοτοπία ταυτόχρονα με τα αντίστοιχά τους σύγχρονα ηχοτοπία, τα οποία αναπαράγονταν από τα ηχεία, και να απαντήσουν σε ερωτήσεις αξιολόγησης. Η επιλογή της συγκεκριμένης διάταξης και της μεθόδου ταυτόχρονης ακρόασης έγινε προκειμένου η πειραματική διαδικασία να προσομοιώνει τις συνθήκες αναπαραγωγής των ηχοτοπίων in-situ από μια εφαρμογή κινητού τηλεφώνου, με τα προσωπικά ακουστικά του κάθε χρήστη. Η διαδικασία αξιολόγησης ενός ηχοτοπίου διαρκούσε 10 έως 15 λεπτά, με τα υποκείμενα να αξιολογούν, κατά μέσο όρο, 2 ηχοτοπία το καθένα.

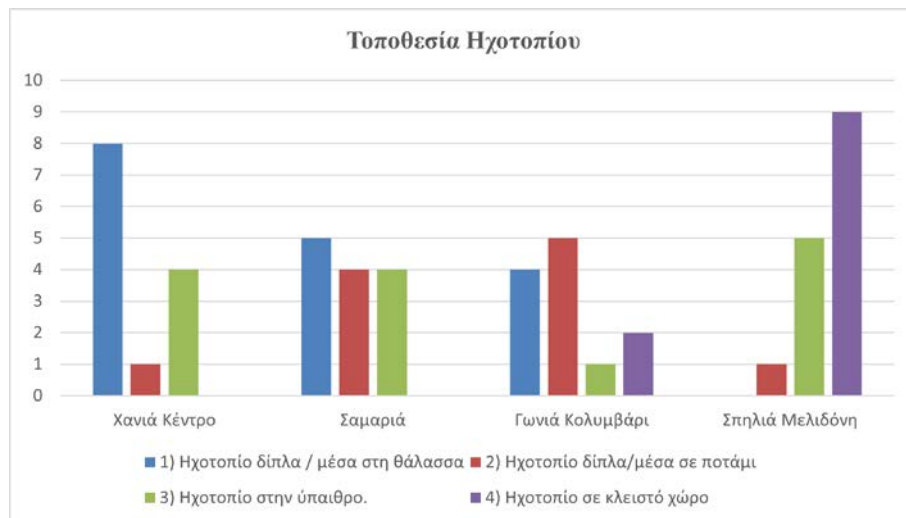
#### **4. Αποτελέσματα Αξιολόγησης**

Οι 25 συμμετέχοντες απάντησαν σε πληθώρα ερωτήσεων για την αξιολόγηση της ηχητικής σύνθεσης, της μουσικής υπόκρουσης, της αρχιτεκτονικής των ηχοτοπίων, της διάδρασης με τον χρήστη, του συσχετισμού μεταξύ σύγχρονου και ιστορικού ηχοτοπίου κ.ά. Για λόγους συντομίας η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε 3 ερωτήσεις.

Στην πρώτη από αυτές εξετάζεται το κατά πόσο οι χρήστες ήταν σε θέση να αναγνωρίσουν την τοπολογία του ιστορικού ηχοτοπίου, χωρίς να τους παρέχονται στοιχεία για τον χώρο που διαδραματιζόταν η δράση της ιστορίας. Η κατανομή των απαντήσεων παρουσιάζεται στο *Σχήμα 4.1*. Όπως φαίνεται, η πλειοψηφία των συμμετεχόντων αναγνώρισαν σωστά την τοποθεσία του Κέντρου Χανίων και της Σπηλιάς Μελιδονίου, ενώ παρατηρείται σχετική σύγχυση για το Φαράγγι της Σαμαριάς και τη Μονή Γωνιά. Στην πρώτη περίπτωση οι ήχοι από το ποτάμι στο Φαράγγι οδήγησαν στη σκέψη ότι η σκηνική δράση διαδραματίζεται κοντά στη θάλασσα, ενώ οι ήχοι της φύσης πιθανώς οδήγησαν στην εκτίμηση ότι το ηχοτοπίο διαδραματίζεται στην ύπαιθρο. Ομοίως, στην περίπτωση της Μονής Γωνιά, η παρουσία ήχων θάλασσας στην ηχογράφηση του σύγχρονου ηχοτοπίου, οδήγησε αρκετά υποκείμενα στη σκέψη ότι η σκηνική δράση του ιστορικού ηχοτοπίου



διαδραματίζεται κοντά στη θάλασσα, ενώ κάποια επέλεξαν τον κλειστό χώρο, καθώς στο τέλος του ηχητικού αποσπάσματος ο περιηγητής ακούγεται να εισέρχεται στο μοναστήρι. Παρά το γεγονός ότι το ηχοτοπίο στη Σπηλιά Μελιδονίου διαδραματίζεται σε κλειστό χώρο με έντονα στοιχεία αντήχησης, αρκετά από τα υποκείμενα το χαρακτήρισαν ως ύπαιθρο, πράγμα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



Σχήμα 4.1 Κατανομή απαντήσεων αναγνώρισης γεωγραφικού χώρου κάθε ηχοτοπίου



Σχήμα 4.2 Κατανομή απαντήσεων αξιολόγησης συσχετισμού ιστορικών και σύγχρονων ηχοτοπίων

Η δεύτερη ερώτηση διερευνούσε τον ηχητικό συσχετισμό μεταξύ ιστορικών και σύγχρονων ηχοτοπίων. Η κατανομή των αξιολογήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Συνολικά 11 υποκείμενα χαρακτήρισαν ως «Μέτρια / Μεγάλη» τη συσχέτιση

των 2 ηχοτοπίων στο Φαράγγι της Σαμαριάς και 12 ως «Μέτρια / Μεγάλη / Πολύ Μεγάλη» στην περίπτωση της Σπηλιάς Μελιδονίου. Δεδομένου ότι και τα δύο αυτά σημεία είναι χώροι προστατευμένοι, η επίδραση που άσκησε πάνω τους ο σύγχρονος δυτικός αστικός πολιτισμός είναι πολύ περιορισμένη. Στην περίπτωση του Φαραγγιού της Σαμαριάς υπάρχει διαφορά στις εποχές του χρόνου που λαμβάνουν χώρα τα δύο ηχοτοπία (ιστορικό χειμώνα και σύγχρονο φθινόπωρο), γεγονός που ίσως ώθησε πολλά υποκείμενα να χαρακτηρίσουν τη συσχέτιση ως «Μέτρια». Στην περίπτωση του Κέντρου των Χανίων η συσχέτιση μεταξύ των 2 ηχοτοπίων χαρακτηρίστηκε ως «Μέτρια / Μεγάλη», πιθανό αποτέλεσμα του γεγονότος ότι ο χώρος σκηνικής δράσης, δίπλα στον Φάρο, στο λιμάνι, διατηρεί κατά το δυνατόν τον ιστορικό του χαρακτήρα ακόμα και σήμερα. Μικρότερα ποσοστά συσχέτισης παρατηρούνται στη Μονή Γωνιά, καθώς μεγάλο μέρος της σκηνικής δράσης διαδραματίζεται στον εξωτερικό χώρο της Μονής, δίπλα από τον οποίο σήμερα περνάει το οδικό δίκτυο του νησιού. Σημαντικός παράγοντας στα αποτελέσματα είναι ότι κάποια υποκείμενα χρησιμοποιούσαν ακουστικά τεχνολογίας ακύρωσης θορύβου και δεν μπορούσαν να ακούσουν το σύγχρονο ηχοτοπίο που αναπαράγονταν από τα ηχεία κατά τη διάρκεια του πειράματος, γεγονός που αποτυπώνεται και στις απαντήσεις τους.

Χανιά Κέντρο					Φαράγγι Σαμαριάς				
#	Background	Storytelling	Music	Narration	Background	Storytelling	Music	Narration	
1	87%	69%	61%	100%	59%	63%	50%	100%	
2	61%	100%	87%	100%	91%	93%	95%	100%	
3	0%	0%	100%	0%	90%	55%	100%	81%	
4	42%	57%	57%	100%	100%	75%	75%	71%	
5	48%	58%	45%	100%	98%	100%	78%	56%	
6	60%	100%	83%	80%	100%	98%	100%	100%	
7	72%	72%	68%	100%	46%	86%	100%	32%	
8	71%	71%	71%	100%	100%	50%	89%	47%	
9	81%	100%	86%	45%	94%	100%	88%	76%	
10	72%	62%	93%	100%	98%	100%	98%	94%	
11	100%	81%	87%	50%	100%	98%	78%	67%	
12	57%	45%	100%	66%	100%	73%	89%	39%	
13	58%	66%	100%	58%	61%	100%	61%	100%	
14									
mean	62%	68%	80%	77%	87%	84%	85%	74%	
STD	24,49%	26,90%	17,92%	31,46%	18,93%	18,58%	15,77%	24,59%	

Μονή Γωνιά Κολομβάρι					Σπηλιά Μελιδόνη				
#	Background	Storytelling	Music	Narration	Background	Storytelling	Music	Narration	
1	71%	40%	61%	100%	73%	63%	68%	100%	
2	57%	88%	52%	100%	71%	85%	100%	95%	
3	100%	79%	85%	91%	36%	25%	100%	0%	
4	100%	77%	91%	79%	52%	45%	66%	100%	
5	100%	85%	88%	59%	100%	76%	100%	56%	
6	100%	68%	75%	31%	100%	55%	52%	70%	
7	95%	78%	100%	89%	56%	74%	100%	63%	
8	94%	95%	94%	100%	87%	62%	100%	37%	
9	100%	36%	49%	40%	53%	63%	100%	77%	
10	90%	54%	100%	65%	100%	46%	76%	38%	
11	41%	53%	58%	100%	100%	76%	69%	61%	
12					57%	100%	57%	100%	
13					71%	100%	94%	75%	
14					71%	85%	85%	100%	
mean	86%	68%	78%	78%	73%	68%	83%	69%	
STD	20,57%	19,87%	19,38%	25,32%	21,26%	21,32%	18,09%	29,91%	

Πίνακας 4.1 Κατανομή σταθμών έντασης των 4 layers ανά αξιολογητή και ιστορικό ηχοτοπίο, κανονικοποιημένες σύμφωνα με το δυνατότερο από τα layers. Περιλαμβάνονται Μέσες Τιμές, και Τυπικές Αποκλίσεις, ανά layer και ηχοτοπίο.

Το τρίτο ερώτημα ζητούσε από τα υποκείμενα να δημιουργήσουν τις δικές τους μίξεις μεταξύ των 4 επιπέδων του κάθε ηχοτοπίου, με βάση τα προσωπικά αισθητικά τους κριτήρια, όπως ακριβώς θα μπορούσαν να κάνουν και μέσω της εφαρμογής TRACCE. Στόχος ήταν να διαπιστωθεί αν παρατηρείται κάποια γενική τάση στην προτιμώμενη ισορροπία μεταξύ των επιπέδων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1, κάποια τέτοια τάση δεν φαίνεται να υπάρχει. Υπάρχουν ενδείξεις ότι, τόσο στο Φαράγγι της Σαμαριάς, όσο και στη Σπηλιά Μελιδονίου, όπου ο περιβάλλον χώρος είναι πλούσιος σε ήχους της φύσης και η σκηνική δράση σχετικά απλή και περιορίζεται στην περιήγηση στα συγκεκριμένα σημεία, τα υποκείμενα έτειναν να θέτουν το layer της αφήγησης σε χαμηλότερα επίπεδα, από ό,τι στα άλλα δύο ηχοτοπία, στα οποία, τόσο οι ήχοι του περιβάλλοντος όσο και η σκηνική δράση, είναι πιο περίπλοκα. Επίσης, το επίπεδο *Music*, το μόνο που ουσιαστικά δεν σχετίζεται άμεσα με την πλοκή της ιστορίας, και στα 4 ηχοτοπία λαμβάνει κατά μέσο όρο αρκετά ψηλή ένταση στη μίξη, γεγονός που ενισχύει την πεποίθησή μας ότι αφενός η μουσική αυτή βρίσκεται σε αρμονία με το υπόλοιπο περιεχόμενο, αφετέρου ότι προσδίδει στην εμπειρία των χρηστών.

## 5. Επίλογος

Στις περιπτώσεις εκπαιδευτικών και ταξιδιωτικών εφαρμογών, η επαύξηση του περιεχομένου με ηχητικές συνθέσεις, μουσική και αφήγηση θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική πρακτική [13], [14]. Ωστόσο ανακύπτει ένας προβληματισμός σχετικά με την αποτελεσματικότητα αυτής της πρακτικής στην περίπτωση που διαταράσσεται, έστω και στιγμιαία, η αρμονία μεταξύ του επαυξημένου διδακτικού υλικού και των ήχων του φυσικού περιβάλλοντος [15]. Η παρούσα εργασία παρουσίασε τη μεθοδολογία σύνθεσης και αξιολόγησης ηχοτοπίων του παρελθόντος χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης την περιήγηση του Pashley στην Κρήτη του 19<sup>ου</sup> αιώνα [12]. Ενώ η in-situ ακρόαση του ηχητικού περιεχομένου αποσκοπεί στο να εμβυθίσει τους χρήστες σε μια εικονική ακουστική φωτογραφία της Κρήτης πριν από δύο αιώνες, το πιθανό στιγμιαίο αποσταθεροποιητικό αποτέλεσμα που δημιουργείται από την άμεση σύγκριση του σύγχρονου με το ιστορικό ηχοτοπίο, στην πραγματικότητα επιζητείται, καθώς επιτρέπει μια σύγκριση που διαφορετικά δεν θα ήταν εφικτή. Η εμπειρία των χρηστών αξιολογήθηκε από ένα οικολογικά έγκυρο πείραμα, προκαταρκτικά αποτελέσματα του οποίου συζητήθηκαν παραπάνω.

## 6. Αναφορές

- [1] R. M. Schafer, *The New Soundscape: A Handbook for the Modern Music Teacher*. Don Mills, Ont: BMI Canada, 1969.
- [2] A. Farina, *Soundscape Ecology*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. doi: 10.1007/978-94-007-7374-5.
- [3] J. Wyness, «Perspectives on Landscape, Sound, and Music», τ. 34, τχ. 4, σσ. 303–311, Ιούλιος 2015, doi: 10.1080/07494467.2016.1140469.
- [4] T. Butler, «A walk of art: the potential of the sound walk as practice in cultural geography», *Social & Cultural Geography*, τ. 7, τχ. 6, σσ. 889–908, Δεκέμβριος 2006, doi: 10.1080/14649360601055821.

- [5] B. Boren, A. Andreopoulou, M. Musick, H. Mohanraj, και A. Roginska, «I Hear NY3D: Ambisonic Capture and Reproduction of an Urban Sound Environment», παρουσιάστηκε στο Audio Engineering Society Convention 135, Οκτώβριος 2013. Ημερομηνία πρόσβασης: Απρίλιος 2021. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16996>
- [6] M. Musick, A. Andreopoulou, B. Boren, H. Mohanraj, και A. Roginska, «I Hear NY3D: An Ambisonic Installation Reproducing NYC Soundscapes», παρουσιάστηκε στο Audio Engineering Society Convention 135, Οκτώβριος 2013. Ημερομηνία πρόσβασης: Σεπτέμβριος 2022. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16997>
- [7] B. Boren, M. Musick, J. Grossman, και A. Roginska, «I Hear NY4D: Hybrid Acoustic and Augmented Auditory Display for Urban Soundscapes», New York, NY, Ιούνιος 2014. Ημερομηνία πρόσβασης: Απρίλιος 2021. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/52082>
- [8] G. Dedousis, K. Katsantonis, A. Georgaki, και A. Andreopoulou, «Designing historically informed soundscapes for the augmentation of modern travel-guides: Challenges and compromises», Ιούνιος 2021, doi: 10.21785/icad2021.036.
- [9] B. N. Walker, M. T. Godfrey, J. E. Orlosky, C. Bruce, και J. Sanford, «Aquarium sonification: Soundscapes for accessible dynamic informal learning environments», στο *Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display (ICAD2006)*, London, UK, Ιούνιος 2006, σ. 241. Ημερομηνία πρόσβασης: Απρίλιος 2021. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/50426>
- [10] A. Hazzard, S. Benford, και G. Burnett, «Sculpting a Mobile Musical Soundtrack», στο *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Απρίλιος 2015, σσ. 387–396. doi: 10.1145/2702123.2702236.
- [11] A. Hazzard, J. Spence, C. Greenhalgh, και S. McGrath, «The Rough Mile: Reframing Location Through Locative Audio», στο *Proceedings of the 12th International Audio Mostly Conference on Augmented and Participatory Sound and Music Experiences*, New York, NY, USA, Αύγουστος 2017, σσ. 1–8. doi: 10.1145/3123514.3123540.
- [12] R. Pashley, *Travels in Crete*, τ. 1, 2 τ. John W. Parker, 1837.
- [13] B. N. Walker, J. Kim, και A. Pendse, «Musical soundscapes for an accessible aquarium: Bringing dynamic exhibits to the visually impaired», στο *International Computer Music Conference, ICMC 2007*, Copenhagen, Denmark, Αυγούστος 2007, σσ. 268–275.
- [14] M. Gallagher, «Audio Recording as Performance», στο *Non-Representational Theory and the Creative Arts*, C. P. Boyd και C. Edwardes, Επιμ. Singapore: Springer, 2019, σσ. 277–292. doi: 10.1007/978-981-13-5749-7\_18.
- [15] C. F. Underriner, «The Sound-Poetry of the Instability of Reality: The audio reality effect and mimesis», *Organised Sound*, τ. 22, τχ. 1, σσ. 20–31, Απρίλιος 2017, doi: 10.1017/S1355771816000303.

## **Αξιολόγηση της ηχοπροστασίας αστικών κήπων την εποχή της πανδημίας**

P. Δεληγιαννίδου - Κ. Καρακώστα - Ξ. Σίσκου - Αγγ. Χατζηκυριάκος - Ν. Μπάρκας  
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι δημόσιοι κήποι των μεσογειακών πόλεων αποτελούν χώρους εκτόνωσης, αναψυχής και κοινωνικής συναναστροφής, ιδίως κατά την εκτεταμένη θερινή περίοδο. Ο σχεδιασμός τους απαιτεί την αξιοποίηση των βιοκλιματικών παραμέτρων που αποτελούν αντικείμενα μελέτης και συνεργασίας πολλαπλών τεχνικών και γεωτεχνικών ειδικοτήτων. Βασικός δείκτης αξιολόγησης, μεταξύ άλλων, έχει αναδειχθεί η ηχοπροστασία από τους θορύβους του περιβάλλοντος, παράμετρος που συμβάλλει στην εξασφάλιση νησίδων ηρεμίας μέσα στον αστικό ιστό.

Η προτεινόμενη ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας συνεχιζόμενης έρευνας που αξιολογεί διάφορους χώρους αστικού πρασίνου, με στόχο τη μελέτη και την κατανόηση των βιοκλιματικών συνθηκών, σε ένα δείγμα είκοσι (20) κήπων της Κύπρου και της Ξάνθης.

### ***Evaluation of the sound protection in urban gardens during the pandemic***

#### **ABSTRACT**

The public gardens in the Mediterranean cities are places of relaxation, recreation and social interaction, especially during the extended summer period. Their design requires the utilization of bioclimatic parameters that constitute objects of study and result from the collaboration among multiple technical and geotechnical specialties. Sound protection from environmental noises has emerged as a key evaluation indicator, a parameter that contributes to ensuring spaces of tranquility within the urban area.

The proposed announcement is part of an ongoing research that evaluates various urban green spaces, with the objective of studying and understanding the bioclimatic conditions, in a sample of twenty (20) gardens in Cyprus and Xanthi.

#### **Εισαγωγή**

Η ανακοίνωση αποτελεί τμήμα διαδοχικών προπτυχιακών ερευνών που διεξάγονται στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. με σκοπό τη συγκρότηση ενός καταλόγου βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων για την αξιολόγηση των υπαίθριων αστικών χώρων και παράλληλα την χαρτογράφηση των ανέσεων σε κήπους διαφόρων πόλεων.

Η συγκεκριμένη δημοσίευση επικεντρώνεται στη διερεύνηση και συγκριτική αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης ενός δείγματος δώδεκα (12) δημόσιων χώρων πράσινου στο πολεοδομικό συγκρότημα της Ξάνθης και οκτώ (8) παραθαλάσσιων ή μεσόγειων κήπων σε τρεις (3) πόλεις της Κύπρου (Λευκωσία, Πάφο, Λάρνακα).



Σχήμα 1.1 & 1.2 Τα εξώφυλλα των ερευνητικών εργασιών [5], [6]

## 1. Παράμετροι της κλιματικής ποιότητας του αστικού χώρου

Η ραγδαία ανάπτυξη των πόλεων μετά τη βιομηχανική επανάσταση (18ος αιώνας) επέφερε το παγκόσμιο φαινόμενο της αστικοποίησης. Σταδιακά το πράσινο της φύσης αντικαταστάθηκε από το γκρίζο των δομικών κατασκευών. Η προσπάθεια αντιστροφής αυτής της άσχημης εξέλιξης οδήγησε στην πρόβλεψη αστικών νησίδων πράσινου σε κήπους, πάρκα, πλατείες και πεζοδρόμια. Το αστικό πράσινο αποτελεί πλέον λειτουργικό στοιχείο μιας πόλης, αυξάνοντας την ελκυστικότητα της περιοχής και ανεβάζοντας την αξία των εγγύς αστικών ακινήτων. [1]

Οι πράσινοι χώροι αποτελούν χώρους κοινωνικής συναναστροφής, συμβάλουν στη ψυχική υγεία και συγκροτούν τα τελευταία καταφύγια βιοποικιλότητας στα αστικά κέντρα, φιλτράρουν την ατμόσφαιρα, απορροφούν τους θορύβους, μειώνουν τον κίνδυνο πλημμυρών και τη θερμοκρασία κατά τη θερινή περίοδο. Πρόσθετα, μετατρέπονται σε τόπους συγκέντρωσης των κατοίκων σε συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Οι διαθέσιμοι χώροι βλάστησης στην πλειονότητα των πόλεων μειώνονται χρόνο με το χρόνο. Παραμένουν διάσπαρτοι στον αστικό ιστό και αποτελούν αναμνηστική μικρογραφία των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούσαν παλαιότερα. Ο κίνδυνος της εξαφάνισης, αλλά και η προφανής συμβολή τους στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου οδήγησε στη θέσπιση εθνικών νόμων και διεθνών συνθηκών. [2]

Ο σχεδιασμός του αστικού πράσινου είναι μια διαδικασία που απαιτεί τη συνεργασία πολλών τεχνικών και γεωτεχνικών ειδικοτήτων. Ως αστικό πράσινο αναφέρεται ο ελεύθερος χώρος που σχηματίζεται από τεχνικά και φυσικά υλικά (έδαφος, νερό, ξύλα, φυτά και χρώματα) αρμονικά συντιθέμενα μεταξύ τους. Το αστικό πράσινο δεν μπορεί να λύσει τα προβλήματα της αστικής ρύπανσης, αλλά μπορεί να τα αμβλύνει σε μεγάλο βαθμό. Η βιοκλιματική αναβάθμιση των αστικών, υπαίθριων χώρων στοχεύει στη βελτίωση της κλιματικής ποιότητας του δημόσιου χώρου, παράλληλα με την εξοικονόμηση ενέργειας στα γειτονικά κτίρια. Προς τούτο διερευνώνται τα στοιχεία του περιβάλλοντος, που επηρεάζουν την κλιματική ποιότητα και σχετικές παράμετροι όπως η θερμοκή, οπτική και ακουστική άνεση, η ποιότητα της ατμόσφαιρας, η χρήση υδάτων και η κατανομή χρήσεων στο δημόσιο χώρο. [3]

Ειδικά όσον αφορά την ακουστική άνεση, στο αστικό ηχητικό περιβάλλον εντοπίζονται δυσάρεστοι θόρυβοι (πχ κυκλοφορία, δομικά μηχανήματα), αλλά και ευχάριστα ακούσματα (πχ κελαηδήματα, καταιονισμοί σιντριβανιών) που αξίζει να διατηρηθούν, επειδή το ήπιο αστικό ηχόχρωμα προάγει την θετική εικόνα μιας περιοχής και συντελεί σε καλές συνθήκες διαβίωσης.

Το πλαίσιο παρόμοιων ερευνών περιλαμβάνει την καταγραφή των ηχητικών πηγών και των βασικών χαρακτηριστικών τους (ένταση, συχνότητα, ρυθμός, διάρκεια), τη θέση (και την απόσταση) ή την τροχιά της κίνησης τους, τις γωνίες εκπομπής / λήψης, την ηχοαπορρόφηση στο έδαφος (φυτεύσεις), την επίδραση του περιβάλλοντος χώρου στην ηχοδιάδοση (ανακλάσεις, αντήχηση, θόρυβος βάθους, χωρική κατανομή των εντάσεων), καθώς και τις αντιλήψεις των κατοίκων της περιοχής, ως προς την αναμενόμενη ησυχία [4].

## 2. Η μεθοδολογία της έρευνας

Οι ηχητικές μετρήσεις στην Κύπρο πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια δύο περιόδων (Ιανουάριος / Αύγουστος 2019). Επιλέχθηκαν οχτώ ( 8) κήποι, που αντιπροσωπεύουν το αστικό πράσινο της Κύπρου (στην Πάφο : πάρκο Baracas, Δασούδι, Δημοτικό πάρκο και Δημοτικός κήπος, στη Λεμεσό : Δημοτικός κήπος και Μόλος, στη Λευκωσία : πάρκο Αθαλάσσιας και πάρκο Ακρόπολης). [5]

Στην Ξάνθη, οι ηχητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια δύο περιόδων (Φεβρουάριος, Μάιος, 2021), σε δώδεκα (12) πάρκα, με κριτήριο την διασπορά τους στην πόλη (πάρκα Σαγγαρίου, Ιντερσαλόνικα, Μ. Αλεξάνδρου, Πεσότων Ηρώων, Μεξικάνια, Κυψέλης, ΑΟΞ και Φόρου, πλατεία Εμπορίου, Λιμνίο, Κήπος και Παιδική Χαρά οδού Βενιζέλου). [6]

Σε κάθε κήπο επιλέχθηκαν δύο (2) θέσεις παρατήρησης, που να εξασφαλίζουν διαφορετικές ηχητικές συνθήκες, όπως κοντά ή μακριά από πηγές θορύβου ή υδάτινους καταιονισμούς (με όριο ακτίνας 5μ).

Σ' όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν απλά όργανα μέτρησης, με τις ίδιες ψηφιακές εφαρμογές, σχετικής ακρίβειας, αλλ' όμως εύκολα για την επανάληψη παρόμοιων ερευνών. Για την καταγραφή των δεδομένων σχεδιάστηκαν πρωτότυπες καρτέλες, με την περιοχή, τις θέσεις παρατήρησης, την ημερομηνία και τις καιρικές συνθήκες, φωτογραφίες και σχόλια.

### 3. Ανάλυση ηχομετρήσεων

Στην Κύπρο, οι στάθμες των θορύβων στις θέσεις των οκτώ επιλεγμένων κήπων του δείγματος κυμαίνονται μεταξύ 46,5 - 81,5 dB[A] κατά τη χειμερινή περίοδο και 40,5 - 80 dB[A] κατά τη θερινή περίοδο.

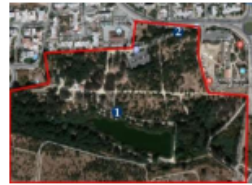
#### ΠΑΡΚΟ ΑΘΑΛΑΣΣΑΣ ΛΕΥΚΩΣΙΑ

Μετρήσεις κατά την θερινή περίοδο.

Ημερομηνία : 24.8.19

Ωρα : 15:10

Καιρός- Φαινόμενα: Ηλιοφάνεια



	ΘΕΣΗ 1 (ΗΣΥΧΙΑ)	ΘΕΣΗ 2 (ΘΟΡΥΒΟΣ)
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:	32.5 °c	33.7 °c
ΥΓΡΑΣΙΑ:	40.5 %	49.7 %
ΦΩΣ :	4076.00 Lux	4214.00 Lux
ΠΙΕΣΗ:	992.56 hpa	992.67 hpa
ΥΨΟΜΕΤΡΟ:	190 m	191 m
ΘΟΡΥΒΟΣ:	54.0 dB (15 Sec)	64 dB (15 Sec)
ΑΝΕΜΟΣ:	0.5 m/s (10 Sec)	2.5 m/s (10 Sec)



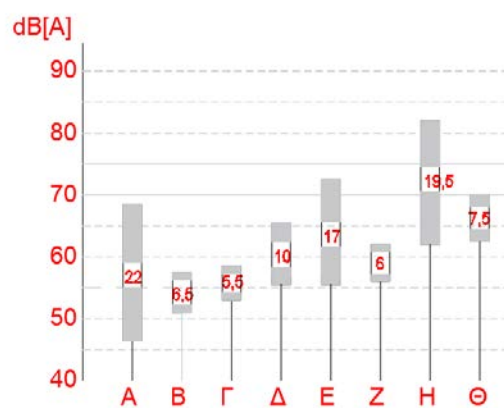
Σχήμα 3.2 Η καρτέλα καταγραφής στο πάρκο Αθαλάσσης [5]

Γενικά, κατά τη χειμερινή περίοδο οι στάθμες ήταν σχετικά υψηλότερες, ενώ οι τιμές στην εσωτερική θέση μέτρησης ήταν αισθητά μικρότερες, από τις τιμές των μετρήσεων στις περιφερειακές θέσεις.



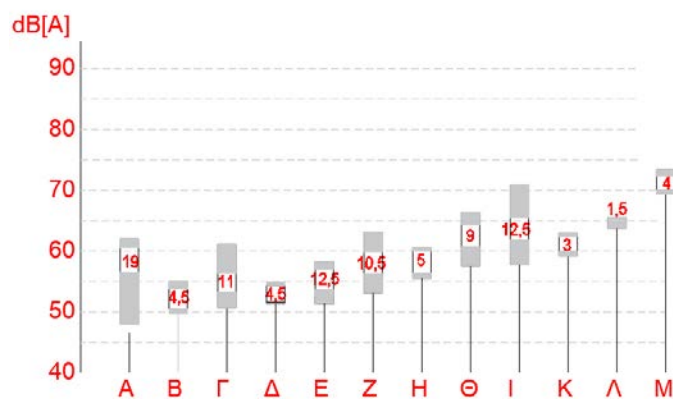
Το χειμώνα η χαμηλότερη στάθμη θορύβου (46,5dB[A]) καταγράφηκε στο εσωτερικού του πάρκου Αθαλάσσας (κάτω από πυκνή βλάστηση), ενώ η ψηλότερη (81,5 dB[A]) στην εξωτερική περίμετρο του πάρκου Baracas, κοντά στο χώρο στάθμευσης. Τη θερινή περίοδο, η χαμηλότερη στάθμη θορύβου (50,5dB[A]) σημειώθηκε στην εσωτερική θέση του Δημοτικού Κήπου Πάφου (κάτω από πυκνή βλάστηση), ενώ η ψηλότερη τιμή (80 dB[A]) πάλι στην περιφερειακή θέση του πάρκου Baracas.

Μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο θέσεων παρατηρήθηκε στο πάρκο Baracas, στο Δασούδι Πάφου και στο πάρκο Αθαλάσσας, κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο.



Σχήμα 3.2 Οι χειμερινές μετρήσεις του δείγματος στην Κύπρο. Στο μέσο των ράβδων η διαφορά στάθμης μεταξύ των 2 θέσεων.

A πάρκο Αθαλάσσας, B Δημοτικό πάρκο Πάφου, Γ Δημοτικός κήπος Πάφου, Δ πάρκο Ακροπόλεως, E Δασούδι, Z Δημοτικός κήπος Λεμεσού, H πάρκο Baracas, Θ Μόλος Λεμεσού



Σχήμα 3.3 Οι χειμερινές μετρήσεις του δείγματος στην Ξάνθη. Στο μέσο των ράβδων η διαφορά στάθμης μεταξύ των 2 θέσεων.

A πάρκο M. Αλεξάνδρου, B Κήπος, Γ πλατεία Εμπορίου, Δ πάρκο ΑΟΞ, E πάρκο Σαγγάριου, Z πάρκο Μεξικάνα, H πάρκο Φόρου, Z Λιμνίο, I πάρκο Ιντερσαλόνικα, K Ηρώων, Λ πάρκο Κυψέλης, M Παιδική Χαρά

Κεντρική είσοδος του πάρκου,  
ποδηλατόδρομος



Μοναπάτι δέλτα στον Κασινθό ποταμό

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 17.06.2020 ΩΡΑ: 12:00  
ΚΑΙΡΟΣ: Συννεφιά

ΧΕΙΜΕΡΙΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΘΕΣΗ Α	ΘΕΣΗ Β	ΜΟΝΑΔΕΣ
ΘΟΡΥΒΟΣ	57,5	66,6	dB
ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑ	3,057	4,939	lux
ΑΝΕΜΟΣ	0,184	0,081	m/s
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	15	15	°C
ΥΓΡΑΣΙΑ	82	83	%
ΒΛΑΣΤΗΣΗ	Ψηλή και χαμηλή βλάστηση		
ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΝΕΡΟΥ	Κασινθος ποταμός		

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 25.05.2021 ΩΡΑ: 12:00  
ΚΑΙΡΟΣ: Ηλιοφάνεια

ΕΑΡΙΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΘΕΣΗ Α	ΘΕΣΗ Β	ΜΟΝΑΔΕΣ
ΘΟΡΥΒΟΣ	52,9	55,6	dB
ΦΩΤΕΙΝΟΤΗΤΑ	7,968	51,187	lux
ΑΝΕΜΟΣ	1,92	0,259	m/s
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	26	26	°C
ΥΓΡΑΣΙΑ	62	62	%
ΒΛΑΣΤΗΣΗ	Ψηλή και χαμηλή βλάστηση		
ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΝΕΡΟΥ	Κασινθος ποταμός		

**Π6** ΛΙΜΝΙΟ  
ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΩΝ ΟΔΩΝ ΒΑΣ. ΣΟΦΙΑΣ, ΠΑΛΛΑΔΗ

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:**

Το Πάρκο Λιμνίο είναι το μεγαλύτερο πάρκο της Ξάνθης με χώρους περιφραγμένους (λεπτογυρί με αράχιο) και διαμορφωμένους για παιδικές δραστηριότητες. Βρίσκεται ανάμεσα στην Πολυτεχνική Σχολή (συγκρότημα προκάτι) και τον Κασινθο ποταμό. Διαθέτει διαδρομές για περίπατο, κανόγρηστα καθιστικά, ποδηλατόδρομο, αλλά και πάρκο για κατοικίδια ζώα. Έχει πλάσσια, ψηλή και χαμηλή βλάστηση, αλλά και εκτάσεις με γκαζόν για παιχνίδια παιδιών κάθε ηλικίας, ενώ περιμετρικά εξυπηρετεί τους περιπάτους των μεγαλύτερων ηλικιών.

Σχήμα 3.4 Η καρτέλα του Λιμνίου στην Ξάνθη [6]

Στο δείγμα των κήπων της Ξάνθης οι τιμές κατά τη χειμερινή περίοδο κυμάνθηκαν από 43 dB[A] στο πάρκο Μεγάλου Αλεξάνδρου έως 73,5 dB[A] στην Παιδική Χαρά, ενώ την εαρινή περίοδο από 45 dB[A] έως 71,5 dB[A] στους ίδιους κήπους. Γενικά, οι αποκλίσεις των τιμών ανάμεσα στις δύο θέσεις κάθε κήπου είναι μικρές,

επειδή οι περιμετρικές θέσεις βρίσκονται κοντά σε δρόμους στο κέντρο της πόλης, ενώ παραδόξως στις εσωτερικές θέσεις οι τιμές ήταν σχετικά υψηλές λόγω των συναθροίσεων την περίοδο της καραντίνας.

#### 4. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα δεδομένα της έρευνας μας, στους επιλεγμένους κήπους της Κύπρου καταγράφηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο επιλεγμένες θέσεις παρατήρησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν :

-μεγάλων αντιθέσεων, το πάρκο Αθαλάσσας συνδυάζει φυσικό βιότοπο με καλλιεργημένη βλάστηση (υψηλή και χαμηλή) μεγάλης έκτασης, τεχνικά στοιχεία (σκέπαστρα, σιντριβάνια) και ασφαλτοστρωμένους δρόμους με χαμηλή βλάστηση στην περίμετρο. Βρίσκεται στο ΝΑ άκρο της Λευκωσίας, έχει συνολική έκταση 840 εκτάρια, με λίμνη, αναψυκτήριο και παιχνιδότοπο. Προσφέρεται για αναψυχή, γυμναστική, πεζοπορία και περιβαλλοντική εκπαίδευση,

-μικρών αντιθέσεων, το πάρκο Baracas, σχετικά πρόσφατο, μικρής έκτασης, με χαμηλή βλάστηση. [5]

Σύμφωνα με τα αντίστοιχα δεδομένα της έρευνας στην Ξάνθη, διαπιστώνουμε πως η πόλη διατηρεί ένα σημαντικό ποσοστό πράσινου στο αστικό κέντρο της, εξασφαλίζοντας βιώσιμες κλιματικές συνθήκες, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες, χάρη στον Κόσινθο ποταμό που τη διατρέχει στο δυτικό άκρο και το τεχνητό φράγμα του Νέστου στα ΒΔ της περιοχής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αντιθέσεων ανάμεσα στις δύο θέσεις παρατήρησης, αποτελούν :

-μεγάλων αντιθέσεων, το Λιμνίο, κήπος μεγάλης έκτασης στα όρια της εγκιβωτισμένης κοίτης του ποταμιού, σε μια περιοχή που εξυγιάνθηκε από τις παλιότερες υπερχειλίσεις, με θεματικά πάρκα, χαμηλή και υψηλή φύτευση, παιχνίδια, περιπάτους και αστικό εξοπλισμό,

-μικρών αντιθέσεων, το πάρκο Μεξικάνα, μικρής έκτασης περικυκλωμένο από επτάωροφες πολυκατοικίες, όπως και το πάρκο ΑΟΞ, στενού πλάτους με χαμηλή και αραιή φύτευση. [6]

Όσον αφορά την παράμετρο του θορύβου, η έρευνα πέτυχε ιδιαίτερες συνθήκες εξαιτίας της καραντίνας, με τον κόσμο να συρρέει στα πάρκα, εμφανίζοντας υψηλές στάθμες θορύβου και στις δύο θέσεις παρατήρησης, είτε σε περιμετρικές ζώνες λόγω της οδικής κυκλοφορίας, είτε σε ενδότερες ζώνες, με κοινωνικές συναθροίσεις και παιχνίδια. Ωστόσο ευδιάκριτα χαμηλότερες ήταν οι στάθμες που καταγράφηκαν στα ενδότερα των κήπων, στις περιπτώσεις με σημαντική έκταση, υψηλή βλάστηση, τεχνητά ηχοφράγματα και ευεργετικά ακούσματα από σιντριβάνια και καταιονισμούς σε ευρείες λίμνες ηρεμίας.

Αποδεικνύεται, λοιπόν, πως οι περιβαλλοντικές συνθήκες των ελεύθερων αστικών χώρων επηρεάζονται από τις εποχιακές διακυμάνσεις και το θόρυβο. Η ορθή διαχείριση των βιοκλιματικών παραμέτρων τους συμβάλλει στη δημιουργία άνετων περιβαλλοντικών συνθηκών, εξασφαλίζοντας φυσικούς πνεύμονες και πόλους έλξης των κατοίκων. Σημαντική (και παραγνωρισμένη) παράμετρο επισκεψιμότητας αποτελεί ο αστικός εξοπλισμός των κήπων (παγκάκια, κιόσκια) και ο χαρακτήρας του χώρου (ιδιωτικός με τραπεζοκαθίσματα, ή δωρεάν με παγκάκια). Όπως διαπιστώθηκε οι

κάτοικοι προτιμούν τους οργανωμένους κήπους με υψηλή βλάστηση και ελεύθερο αστικό εξοπλισμό για μικρές αποδράσεις αναψυχής και κοινωνικής συναναστροφής.

Ιδανική λύση για τη βελτίωση του μικροκλίματος μιας πόλης είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου δικτύου τέτοιων αστικών και περιαστικών πράσινων χώρων. Οι συνήθως ασύνδετες νησίδες που ενυπάρχουν σε διάφορες μορφές (πάρκα, αστικά και περιαστικά άλση, ελεύθεροι χώροι και πλατείες) ως μεμονωμένα χωρικά τμήματα βλάστησης θα πρέπει να συνδεθούν, προς όφελος του αστικού κλίματος, της βιοποικιλότητας και της αποτροπής των κινδύνων της κλιματικής αλλαγής (πλημμύρες, διάβρωση εδαφών κλπ).

## 5. Βιβλιογραφικές αναφορές

[1] Nikolopoulou M., Baker N., Steemers K. «Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter», *Solar Energy*, 70 (3), 2001

[2] Ανδρεαδάκη – Χρονάκη Ε. : Βιοκλιματικός Σχεδιασμός : Κλιματική Αλλαγή - Περιβάλλον – Βιωσιμότητα, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 2017

[3] ΚΑΠΕ : Σχεδιασμός Υπαίθριων Αστικών Χώρων με Βιοκλιματικά Κριτήρια, Ερευνητικό πρόγραμμα RUROS, ISBN 960-86907-2-2, 2004

[4] Μπάρκας Ν. : Αστικές Αναπλάσεις & Πράσινο Σχεδιασμός, Σημειώσεις του μαθήματος, ΤΑΜ - ΔΠΘ, Ξάνθη, 2014

[5] Χατζηκυριάκος, Α. : Βιοκλιματικές Παράμετροι σε Δημόσιους Κήπους της Κύπρου, Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, ΤΑΜ-ΔΠΘ, Ξάνθη, 2020

[6] Καρακώστα, Κ. - Σίσκου, Π. : Συγκριτική Διερεύνηση και Αξιολόγηση σε Πάρκα της Ξάνθης, Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, ΤΑΜ-ΔΠΘ, Ξάνθη, 2021

# **Σχεδιασμός Ηχοτοπίων για ένα Μουσείο: Παραγωγή ενός Podcast Ηχοτοπίων ως ένας Εναλλακτικός Τρόπος Βιώματος της Μουσειακής Εμπειρίας του Μουσείου Σύγχρονης Τέχνης του MOMus**

Έλενα Ιγνατιάδου, Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια  
Πλατεία Ιπποδρομίου 6, Θεσσαλονίκη, 54621  
[elenaigntd@gmail.com](mailto:elenaigntd@gmail.com)

Μαρία Ματσιώλα, Επίκουρη Καθηγήτρια  
Επικοινωνίας και Ψηφιακών Μέσων, ΠΔΜ  
[mmatsiola@uowm.gr](mailto:mmatsiola@uowm.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Αυτή η εργασία στοχεύει στη δημιουργία ενός podcast ηχοτοπίων ως ένας εναλλακτικός τρόπος βιώματος της μουσειακής εμπειρίας. Βασίζεται στο Μουσείο Σύγχρονης Τέχνης του MOMus (Μητροπολιτικός Οργανισμός Μουσείων Εικαστικών Τεχνών Θεσσαλονίκης). Πιο αναλυτικά, θέλοντας να εκσυγχρονίσει την περιήγηση μέσα στο μουσείο, ώστε οι επισκέπτες να έχουν μια πιο καθηλωτική εμπειρία μέσω της χρήσης των σύγχρονων ψηφιακών μέσων και τεχνολογιών, προβαίνει στη δημιουργία ηχοτοπίων. Τα τελευταία ξεναγούν τους επισκέπτες στη μόνιμη έκθεση του μουσείου, παρέχουν βασικές πληροφορίες για τα επιλεγμένα εκθέματα και εμψυχούν στους επισκέπτες τα συναισθήματα πίσω από την τέχνη. Επιπρόσθετα της παραγωγής ηχοτοπίων, η εργασία αυτή εξετάζει τη θεωρία πίσω από ήχο και τα ηχοτοπία, και ερευνά παρόμοια έργα.*

## **Soundscape Design in a Museum: Production of a Soundscape Podcast as an Alternative Way to Live the Experience of the Museum of Contemporary Art of MOMus**

### **ABSTRACT**

*This dissertation aims to create a podcast consisting of soundscapes as an alternative way to live the museum experience. It is based on the museum of contemporary arts of MOMus (Metropolitan Organization of Museums of Visual Arts of Thessaloniki). In more detail, wanting to modernize the museum's guided tour, so guests can have a more augmented and immersive experience through the usage of current media trends and digital technologies, soundscapes are produced. The latter guide guests through the museum's permanent exhibition, provide basic information about the selected showpieces, and transfuse to the visitors the feelings behind them. Additionally to the production of soundscapes, it reviews the theory behind podcasts and soundscapes, and it investigates similar projects.*

## 1. Η Σημασία του Ήχου

### 1.1 Γιατί η Έμφαση στον Ήχο είναι σημαντική;

Οι ήχοι περιβάλλουν συνεχώς τους ανθρώπους προσθέτοντας στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνονται τον κόσμο γύρω τους. Για παράδειγμα, παρακολουθώντας τα κύματα της θάλασσας και παράλληλα ακούγοντας τον ήχο που παράγουν, βελτιώνεται η κατανόηση του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η ακοή είναι τόσο ισχυρή αίσθηση που ακόμα και όταν τα μάτια κάποιου είναι κλειστά, ο κόσμος μπορεί να γίνει κατανοητός απλώς ακούγοντας προσεκτικά τους ήχους που υπάρχουν. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι οι μέχρι-τόρα εμπειρίες των ατόμων και η αντίληψη του περιβάλλοντος που έχουν, επηρεάζουν την ερμηνεία των ηχητικών στοιχείων, γεγονός που προσδίδει στον ήχο έναν πιο κοινωνικό χαρακτήρα. Για παράδειγμα, κάποιος που ζει σε μια δασική περιοχή είναι συνηθισμένος στο ηχητικό τοπίο ενός δάσους, επομένως τα ηχητικά στοιχεία που σχετίζονται με ένα δάσος μπορεί να του δημιουργήσουν μια αίσθηση οικειότητας. Από την άλλη πλευρά, εάν ένα άτομο έχει μεγαλώσει σε παραθαλάσσια περιοχή και δεν έχει επισκεφτεί ποτέ ξανά κάποιο δάσος, αυτό το ηχητικό τοπίο μπορεί να του ακούγεται περίεργο, σαν κάτι ξένο που δεν μπορεί να καταλάβει εύκολα και ολοκληρωτικά.

### 1.2 Ορισμός Ηχοτοπίων

Τι είναι όμως τα ηχοτοπία; Τα ηχοτοπία είναι ένα φαινόμενο που είναι πανταχού παρόν στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, παρόλο που τα άτομα μπορεί να μην το αντιλαμβάνονται από την πρώτη στιγμή. Όλοι οι ήχοι που συναντώνται από τη στιγμή που κάποιος ξυπνά μέχρι την ώρα που θα ξανακοιμηθεί, και ο συνδυασμός αυτών των ήχων αποτελούν τα ηχοτοπία. Ωστόσο, η σκέψη των ηχοτοπίων κάτω από αυτόν τον σύντομο και πολύ γενικό ορισμό είναι αρκετά αφηρημένη. Για τον λόγο αυτό η ενότητα αυτή εξετάζει δύο ορισμούς που έχουν αποδοθεί στον όρο.

Αρχικά, ο όρος ηχοτοπία εισήχθη για πρώτη φορά από τον Raymond Murray Schafer το 1969. Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε τότε, τα ηχητικά τοπία περιλαμβάνουν οποιοδήποτε ακουστικό πεδίο μελέτης και σχετίζονται με όλους τους πανταχού παρόντες θορύβους στο περιβάλλον των ανθρώπων [1]. Επιπλέον, όπως εξηγεί η Jenny Ek [2] στην εργασία της, τα ηχοτοπία αποτελούν έναν συνδυασμό όλων των ήχων που προέρχονται τόσο από το φυσικό ακουστικό περιβάλλον όσο και από τους περιβαλλοντικούς ήχους που παράγονται από τον άνθρωπο.

Μια άλλη προσέγγιση του όρου είναι αυτή που δόθηκε από τον Theo van Leeuwen το 1999. Ο Van Leeuwen εξέτασε τον όρο από σημειωτική άποψη και έδωσε τον ακόλουθο ορισμό: «Το ηχοτοπία είναι ένα σύνθετο σημειωτικό σύστημα που αποτελείται από ομιλία, μουσική και ήχους. Είναι σπάνια σταθερό και στατικό, καθώς η παρουσία, η συνάφεια και η αλληλεπίδραση των ήχων αλλάζουν συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, είτε αυθόρμητα είτε ως αποτέλεσμα χειραγώγησης τους» [3]. Με αυτήν την προσέγγιση, γίνεται αντιληπτό ότι ο ορισμός του συμφωνεί με αυτόν του Schafer, καθώς παραδέχεται ότι τα ηχητικά τοπία μπορούν να αποτελούνται από οποιοδήποτε είδος ήχου, ενώ προσθέτει δύο νέα χαρακτηριστικά στο φαινόμενο: τον

μη στατικό του χαρακτήρα και τη σχέση του ήχου με τους ανθρώπους, τον χρόνο και τον τόπο.

### *1.3 Η Σημασία του Ήχου στον Μουσειακό Χώρο*

Σύμφωνα με τον Tom Everett [4], οι ήχοι έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τη συνολική ατμόσφαιρα ενός μουσείου ή μιας έκθεσης και μπορούν να το κάνουν αυτό προσδίδοντας μια εντύπωση εμβύθισης. Αυτή η αίσθηση εμβύθισης σε έναν άλλο «εξωπραγματικό» κόσμο επιτυγχάνεται, όταν οι άνθρωποι για ένα μικρό χρονικό διάστημα αποσπώνται από τον πραγματιστικό χρόνο και χώρο και αρχίζουν να εμπλέκονται συναισθηματικά σε έναν δεύτερο που δημιουργείται μέσω των ήχων.

Επιπλέον, οι ήχοι μπορούν να βοηθήσουν στην παράδοση ασυνήθιστου ερμηνευτικού περιεχομένου και να συμβάλουν σε μια πιο ενεργή, πολυαισθητηριακή εμπλοκή με τα εκθέματα. Οι ήχοι έχουν την ικανότητα να δημιουργούν συναισθήματα, όπου τα τελευταία μπορούν να λειτουργήσουν ως παιδαγωγικά εργαλεία και στρατηγικές για συναισθηματικά φορτισμένη μάθηση [5]. Η χρήση του ήχου, για παράδειγμα, με δραματουργικό τρόπο μπορεί να τονίσει την αφηγηματική δομή μιας έκθεσης. Κάνοντας κατάλληλη χρήση της μουσικής υπόκρουσης, ένας σχεδιαστής πολυμέσων θα μπορούσε να ενοποιήσει τα εκθέματα που εμφανίζονται σε θεματικές υποενότητες. Η σημασία του ήχου στο μουσειακό περιβάλλον αναγνωρίζεται και υποστηρίζεται επίσης από ειδικούς στον τομέα της ψυχολογίας. Πιο αναλυτικά, οι γνωστικοί ψυχολόγοι υποστηρίζουν ότι στη χωρική επίγνωση, η οπτική και η ακουστική μας επίγνωση συνεργάζονται για τη δημιουργία μιας ολιστικής εικόνας [6]. Αυτό σημαίνει ότι για να δούμε πλήρως και διεξοδικά το περιβάλλον, πρέπει να ακούσουμε.

## **2. Ο Σχεδιασμός και Παραγωγή του Podcast Ηχοτοπίων**

### *2.1 Πρώτα Βήματα*

Το πρότζεκτ βασίστηκε στα βήματα υλοποίησης της έκθεσης Sound by Design (μια μόνιμη έκθεση 600 τετραγωνικών μέτρων που πρωτοπαρουσιάστηκε τον Νοέμβριο του 2017 στο Καναδικό Μουσείο Επιστήμης και Τεχνολογίας). Πρώτο βήμα αποτέλεσε μία επίσκεψη στο μουσείο σε μια προσπάθεια επιλογής των εκθεμάτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το podcast, εύρεσης ήχων που θα μπορούσαν να συσχετιστούν με τα εκθέματα, και κατανόησης του τρόπου περιήγησης ενός επισκέπτη στον χώρο του μουσείου. Έπειτα, έχοντας επιλέξει κάποια από τα έργα της μόνιμης συλλογής, επόμενο βήμα αποτέλεσε η συγκεκριμενοποίηση των ήχων που θα χρειαζόνταν για το podcast ηχοτοπίων – ήχοι που θα χρειαζόταν είτε να παραχθούν, είτε να ηχογραφηθούν, είτε να βρεθούν στο διαδίκτυο.

### *2.2 Το Σενάριο*

Προχωρώντας στη συγγραφή του σεναρίου, εκτός από τους ήχους που θα συμπεριλαμβάνονταν, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί και μια φωνητική αφήγηση, ώστε να διευκολύνεται η εμπειρία του επισκέπτη κατά την περιπλάνηση στο χώρο του μουσείου. Πιο αναλυτικά, για το πρότζεκτ επιλέχθηκαν συγκεκριμένα εκθέματα της μόνιμης συλλογής και έτσι ο επισκέπτης θα χρειαζόταν κάποιες επιπρόσθετες πληροφορίες, για να καταλάβει πού πρέπει να εστιάσει. Επιπλέον, οι πληροφορίες αυτές έχουν τη δυνατότητα να βοηθήσουν τον επισκέπτη να αντιληφθεί περισσότερο για τα έργα τέχνης. Η φωνητική αφήγηση, ακόμη και με ελλειπτικό τρόπο, μπορεί να κάνει τον επισκέπτη να εντοπίσει λεπτομέρειες στα εκθέματα και να προσφέρει οδηγίες, για να τον κάνει να κατανοήσει τις προθέσεις των καλλιτεχνών. Επιπλέον, στο μουσείο υπάρχουν κάποια εκθέματα που παράγουν ήχο όταν κάποιος τα πλησιάζει. Θέλοντας λοιπόν ο κόσμος να βιώσει και αυτά τα ηχητικά στοιχεία, θεώρησα απαραίτητο να ζητήσω από τον ακροατή να αφαιρέσει τα ακουστικά του για λίγα δευτερόλεπτα, και αυτό θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί χωρίς καμία λεκτική οδηγία.

### 2.3 Συλλογή Ήχων

Μετά την ολοκλήρωση του σεναρίου, το επόμενο βήμα ήταν η συλλογή όλων των ηχητικών στοιχείων που χρειαζόνταν. Κάποιοι από τους ήχους παράχθηκαν με την τεχνική foley, κάποιοι άλλοι απλώς ηχογραφήθηκαν και κάποιοι βρέθηκαν μέσω διαδικτύου.

Αρχικά, ο όρος foley συνδέεται κυρίως με τον κινηματογράφο και το θέατρο και αφορά την αναπαραγωγή καθημερινών ήχων, ώστε το κοινό να έχει την ευκαιρία να απολαύσει μια πιο ρεαλιστική ηχητική εμπειρία. Πιο αναλυτικά, η ηχογράφηση foley επινοήθηκε από τον Jack Foley στα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1920, όταν οι ταινίες άρχισαν να ενσωματώνουν ήχο. Αν και τότε η τεχνική σχετιζόταν με την προβολή ταινιών σε ηχητικές σκηνές, σήμερα έχει αποκτήσει ένα ευρύτερο νόημα. Τώρα, η ηχογράφηση foley είναι πιθανό να περιλαμβάνει μια συσκευή εγγραφής πολλαπλών κομματιών ή έναν σταθμό εργασίας, έτσι ώστε διαφορετικά περάσματα εγγραφής να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσθήκη επιπέδων ή διαφορετικών εφέ, δημιουργώντας ένα πλήρες σύνολο [7]. Είναι μια τεχνική που επιτρέπει στους δημιουργούς να παράγουν τεχνητά ρεαλιστικούς ήχους συνδυάζοντας μεμονωμένα ακουστικά κομμάτια.

Για την ηχογράφηση όλων απαραίτητων ήχων χρησιμοποιήθηκε μια επαγγελματική συσκευή στερεοφωνικής εγγραφής. Πιο συγκεκριμένα, όλες οι εγγραφές εκτελέστηκαν μέσω του ZOOM H1n Handy Recorder, σε ποιότητα 44,1 kHz, 16 bit και αποθηκεύτηκαν σε μορφή WAV.

Οι ήχοι που ηχογραφήθηκαν αυτούσιοι ήταν κατά κύριο λόγο ήχοι της φύσης, όπως η βροχή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως έχοντας επίγνωση του ότι ο επισκέπτης θα φοράει ακουστικά κατά τη διάρκεια της περιήγησης του στο μουσείο και συνεπώς δεν θα μπορεί να ακούει τους περιβαλλοντικούς ήχους, αποφάσισα να ηχογραφήσω το ηχοτοπίο του μουσείου και να το χρησιμοποιήσω στο podcast μου ως ηχητικό υπόβαθρο, ώστε να μην αποκόψω τελείως τον επισκέπτη από το χώρο όπου βρίσκεται.

Όσον αφορά την εύρεση ηχητικών κομματιών στο διαδίκτυο, ήταν απαραίτητο η αναζήτηση να αφορά ανοιχτό περιεχόμενο, πράγμα που σημαίνει ότι δεν έπρεπε να υπάρξει παραβίαση πνευματικών δικαιωμάτων κατά τη λήψη των απαιτούμενων



ακουστικών κομματιών. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ήχοι κυρίως από το YouTube και το SoundCloud, όπου αναγραφόταν ότι τα συγκεκριμένα κομμάτια ήταν ελεύθερα πνευματικών δικαιωμάτων.

#### 2.4 Διαδικασία Επιμέλειας

Πριν τη διαδικασία της επιμέλειας, υπήρξε ένα ακόμη στάδιο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το podcast θα μεριμνούσε για τις ανάγκες των επισκεπτών, όσον αφορά το μεσοδιάστημα της μετάβασης από το ένα έκθεμα στο άλλο, και τον χρόνο που απαιτείται για την θέαση και εμπειρία των έργων τέχνης, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες χρονικές μετρήσεις. Για αυτές τις χρονικές στιγμές, άτομα κλήθηκαν να επισκεφτούν το μουσείο, και εκεί τους ζητήθηκε να ακολουθήσουν την επιλεγμένη διαδρομή και ενώ περπατούσαν ενημερώνονταν για τα εκθέματα στα οποία έπρεπε να δώσουν προσοχή.

Έχοντας και τους απαραίτητους χρόνους μετάβασης από το ένα έκθεμα στο άλλο, ξεκίνησε η διαδικασία της επιμέλειας. Η τελευταία έλαβε χώρα στο λογισμικό Adobe Audition. Στη φάση αυτή συνδυάστηκαν όλοι οι ήχοι που είχαν ηχογραφηθεί ή βρεθεί στο διαδίκτυο, καθώς και η φωνή του αφηγητή. Λαμβάνοντας υπόψη που θα έπρεπε να δοθεί έμφαση κάθε στιγμή, αυξανόταν ή μειωνόταν η ένταση του κάθε κομματιού. Επιπρόσθετα, επιθυμώντας να υπάρχει μία ηχητική συνοχή στο podcast, μεριμνήθηκε ώστε να υπάρχουν ομαλές μεταβάσεις από το ένα ηχητικό στοιχείο στο άλλο. Τέλος, όλο το podcast κανονικοποιήθηκε στο -1dB και εξήχθη σε μορφή mp3, ώστε να μπορεί να παίζει σε όλες τις κινητές συσκευές.

### 3. Διαδικασία Αξιολόγησης

Ο αριθμός των ατόμων που συμμετείχαν στη διαδικασία αξιολόγησης ήταν δεκαοκτώ. Η δεξαμενή των ατόμων αποτελούσε ένα βολικό δείγμα, καθώς αυτοί οι άνθρωποι προσκλήθηκαν προσωπικά στο μουσείο για την αξιολόγηση του podcast. Τα άτομα επισκέφτηκαν τον εκθεσιακό χώρο της μόνιμης συλλογής, άκουσαν το ηχητικό υλικό και στη συνέχεια, αναλογίστηκαν την εμπειρία τους συμπληρώνοντας ένα ερωτηματολόγιο.

Ήταν εκπληκτικά ενδιαφέρον το γεγονός ότι όλοι οι καλεσμένοι απόλαυσαν την επίσκεψή τους. Στην ερώτηση αν τους άρεσε η εμπειρία που παρέχεται μέσω του podcast ηχοτοπίων, σε κλίμακα από το ένα έως το πέντε, όπου το ένα υποδήλωνε ότι δεν άρεσε καθόλου και πέντε ότι άρεσε πάρα πολύ, το 66,7% των συμμετεχόντων επέλεξε πέντε, ενώ το υπόλοιπο 33,3% επέλεξε το τέσσερα.

Γενικά, ο κόσμος θεώρησε ότι οι ήχοι που ακούγονταν αντανακλούσαν τα έργα τέχνης που έβλεπαν και επιπλέον, θεώρησαν ότι τόσο η αφήγηση όσο και το υπόλοιπο ηχητικό υλικό μετέφεραν μηνύματα, έδιναν ζωή στα εκθέματα και σίγουρα κέντριζαν την προσοχή τους. Πιο αναλυτικά, το 83,3% από αυτούς πίστευε ότι όλοι οι ήχοι που ακούγονταν ταίριαζαν απόλυτα με αυτό που έβλεπαν, ενώ το 16,7% πίστευε ότι υπήρχαν ήχοι που δεν είχαν σχέση με τα έργα τέχνης.

Η τελευταία ενότητα του ερωτηματολογίου επικεντρωνόταν στις τελικές σκέψεις των επισκεπτών για το έργο. Το πρώτο πράγμα που ρωτήθηκαν σε αυτή την ενότητα

ήταν αν θεωρούσαν ενδιαφέρον τον συνδυασμό ήχων-εικαστικών τεχνών. Σε αυτήν την ερώτηση, σε μια κλίμακα από το ένα έως το πέντε, το 66,7% των συμμετεχόντων εξέφρασε ότι θεώρησε τον συνδυασμό ως εντυπωσιακά ελκυστικό, το 27,8% τον θεώρησε πολύ ενδιαφέρον και το 5,6% ένιωθε ουδέτερο για αυτό.

Η επόμενη ερώτηση ζητούσε από τους επισκέπτες να μοιραστούν αν θα επισκέπτονταν περισσότερα μουσεία αν είχαν την ευκαιρία να τα γνωρίσουν με πιο καθηλωτικούς τρόπους. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία, το 72,2% των επισκεπτών δήλωσε ότι θα το έκανε σίγουρα, το 22,2% υποστήριξε ότι πιθανότατα ναι και μόνο το 5,6% ήταν αβέβαιο.

#### **4. Συμπεράσματα**

Αυτό το πρότζεκτ είχε στόχο να αμφισβητήσει τις συμβατικές απόψεις και αντιλήψεις σχετικά με το πώς οι άνθρωποι μπορούν να βιώσουν τις εκθέσεις και τα μουσεία σήμερα. Ήταν ενδιαφέρον ότι όλοι οι συμμετέχοντες εκτίμησαν την εναλλακτική περιήγηση και οι περισσότεροι από αυτούς την απόλαυσαν. Επιπλέον, το γεγονός ότι η συντριπτική πλειοψηφία δήλωσε ότι θα επισκεπτόταν περισσότερα μουσεία και εκθέσεις σε περίπτωση που είχαν τη δυνατότητα να τα γνωρίσουν με πιο ζωντανούς, συναρπαστικούς και καθηλωτικούς τρόπους, επαλήθευσε τον σκοπό αυτού του έργου: ότι τα μέσα και οι ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στην κατανόηση της τέχνης και να ενισχύσουν την ξενάγηση ενός μουσείου.

Αναγνωρίζοντας τα οφέλη του ήχου για τους μουσειακούς χώρους και έχοντας υπόψη το γεγονός ότι σήμερα τα σύγχρονα μουσεία θεωρούνται ως «προνομιούχα μέσα επικοινωνίας» [7] κάποιος θα μπορούσε να ερευνήσει το πώς άλλα μέσα και τεχνολογικά εργαλεία θα μπορούσαν να αναβαθμίσουν παρόμοιες εμπειρίες και τους χώρους των μουσείων, καλύπτοντας διαφορετικές αισθητηριακές απόψεις.

#### **5. Βιβλιογραφία**

- [1] Schafer R., *Our Sonic Environment*, Destiny Books, Rochester (1977).
- [2] J. Ek, «Audio Storytelling in Today's Visual World: The Necessary Components of a Successful Soundscape for an Audio Play», Arcada University (2016).
- [3] Fina M., *The Sound of Art: Soundscape in Pictorial Descriptions*, Università Ca' Foscari Venezia (2020).
- [4] Rodéhn, C., «Emotions in the Museum of Medicine. An investigation of How Museum Educators Employ Emotions and what these Emotions Do», *International Journal of Heritage Studies*, pp 201-213, (2018).
- [5] De Jong, S., «Sentimental Education. Sound and Silence at History Museums. Museum and Society», *Museum and Society* (2018).
- [6] Dakic, Vesna, *Sound Design for Film and Television*, GRIN Publishing (2009).
- [7] Carrozzino, M. and Bergamasco, M., «Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums», *Journal of Cultural Heritage*, pp 452-458 (2010).

## **Αναγνώριση πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης από ηχητικό αποτύπωμα**

Μαρίνα Ειρήνη  
Σταματιάδου  
Υπ. Διδάκτωρ  
mstamat@jour.auth.gr

Λάζαρος  
Βρύσης  
PhD  
lvrysis@auth.gr

Νικόλαος  
Βρύζας  
PhD  
nvryzas@auth.gr

Χαράλαμπος  
Δημούλας  
Αν. Καθηγητής  
babis@auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Οι αστικές περιοχές είναι εκείνες στις οποίες παρατηρούνται υψηλά επίπεδα περιβαλλοντικού θορύβου και χαμηλά επίπεδα ποιότητας αέρα. Η άρτια ενημέρωση των πολιτών συντελεί στην ευαισθητοποίησή τους και στην ενεργό συμμετοχή τους σε δράσεις για τον περιορισμό των προβλημάτων αυτών. Η παρούσα έρευνα βασίζεται στην υπόθεση ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση δεν είναι ανεξάρτητες αλλά, αντίθετα, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους, σε βαθμό και έκταση που είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Ο στόχος της εργασίας είναι διττός: αφενός, η αναγνώριση πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχοντας ως δεδομένο το ηχητικό τους αποτύπωμα και, αφετέρου, η προτυποποίηση ενός εργαλείου μαζικής συλλογής δεδομένων μέσω του οποίου οι πολίτες θα τροφοδοτούν με περιβαλλοντικά ηχητικά δεδομένα ένα σύστημα μηχανικής μάθησης.*

### **Identifying sources of air pollution from their audio footprints**

#### **ABSTRACT**

*Urban areas are those in which high levels of environmental noise and low levels of air quality are observed. Properly informed citizens become much more aware and active in participating in actions towards limiting such problems. The present research is based on the assumption that there is a correlation between air and noise pollution, up to an extent which is still under investigation. The aim of this work is twofold: on the one hand, to identify sources of air pollution given their environmental audio footprint and, on the other hand, to prototype a crowdsourcing application which will allow citizens to contribute environmental audio data to a machine learning system.*

#### **Εισαγωγή**

Η διασφάλιση καλής ποιότητας αέρα και χαμηλού επιπέδου θορύβου είναι μία σημαντική πρόκληση για την επίτευξη υγιούς και βιώσιμης ανάπτυξης της ανθρωπότητας. Παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση υποβαθμίζουν την ποιότητα ζωής και κρίνονται επικίνδυνοι τόσο για την υγεία όσο και για την ψυχολογία των πολιτών [1]. Καρδιοαναπνευστικές παθήσεις, αλλεργικές αντιδράσεις, ακόμη και αυτοάνοσα νοσήματα έχουν συνδεθεί με τα αυξημένα επίπεδα ανίχνευσης αέριων ρύπων. Αντίστοιχα, έρευνες έχουν δείξει ότι η ηχορύπανση σχετίζεται με διαταραχές του ύπνου και υψηλά επίπεδα άγχους και στρες [2]. Τα

παραπάνω προβλήματα εντείνονται περισσότερο στις αστικές περιοχές, στις οποίες ζει και εργάζεται το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού. Συνεπώς, σε αυτές παρατηρείται αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση επιβατικών και επαγγελματικών οχημάτων και έντονη εμπορική και βιομηχανική δραστηριότητα.

Η παρούσα έρευνα βασίζεται στην υπόθεση ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση δεν είναι ανεξάρτητες αλλά αντίθετα, υπάρχει μεγάλος βαθμός συσχέτισης μεταξύ τους. Ένα κλασικό παράδειγμα αυτής της υπόθεσης είναι η ευρεία χρήση μηχανοκίνητων οχημάτων. Ο τρόπος και ο βαθμός συσχέτισής τους αποτελούν ένα πεδίο που είναι ακόμα υπό διερεύνηση, όμως έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία περιβαλλοντικού θορύβου μπορεί να αποτελέσει ένδειξη παρουσίας κάποιας πηγής ατμοσφαιρικής ρύπανσης [1].

Στόχο της εργασίας αποτελεί αφενός η αναγνώριση πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το ηχητικό τους αποτύπωμα και, αφετέρου, η προτυποποίηση ενός εργαλείου μαζικής συλλογής δεδομένων, μέσω του οποίου οι πολίτες θα τροφοδοτούν με περιβαλλοντικά ηχητικά δεδομένα ένα σύστημα μηχανικής μάθησης.

## 1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 1.1 Ρύπανση στο αστικό περιβάλλον

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλείται από την υψηλή συγκέντρωση αέριων ρύπων (CO, NO<sub>x</sub>, PM) στην ατμόσφαιρα, ενώ η ηχορύπανση προκαλείται όταν υπάρχει διαρκής έκθεση σε επίπεδα θορύβου άνω των 65dB. Σύμφωνα με έρευνες, τα φαινόμενα αυτά οφείλονται κατά κύριο λόγο στην αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση και στην βιομηχανική και εμπορική δραστηριότητα, κυρίως στα αστικά κέντρα.

Η προσπάθεια συσχετισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της ηχορύπανσης δεν είναι νέα. Πολλές εργασίες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των επιπέδων θορύβου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όμως η στατιστική συσχέτιση και η ακριβής μοντελοποίησή της είναι μια διαδικασία με μεγάλη πολυπλοκότητα. Μία τέτοια προσέγγιση στοχεύει στην μοντελοποίηση του ευρύτερου περιβάλλοντος και των παραμέτρων του, εφαρμόζοντας τεχνικές LIME σε συστάδες ατμοσφαιρικών και ηχητικών δεδομένων που συλλέγονται από εθελοντές, σε ένα περιβάλλον ελέγχου [3]. Εφαρμόζοντας κανονική ανάλυση συσχέτισης (Canonical Correlation Analysis – CCA) μεταξύ αντικειμενικών και υποκειμενικών δεδομένων αέρα και ήχου, η εργασία [4] εξάγει ποσοτικά συμπεράσματα για τη συσχέτιση ποιότητας αέρα και θορύβου σε ζώνες περιπάτου. Η εργασία [5] αξιοποιεί διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα και συσκευές χαμηλού κόστους για την καταγραφή ήχου για να τροφοδοτήσει μια τοπολογία ANN με στόχο την πρόβλεψη συγκέντρωσης αέριων ρύπων σε αστικές περιοχές, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, σε σημεία όπου δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση μόνιμων αισθητήρων. Κοινές μετρήσεις περιβαλλοντικού θορύβου και συγκέντρωσης PM που πραγματοποιήθηκαν στην πόλη Έσσεν της Γερμανίας έδειξαν πως όταν τα επίπεδα κυκλοφοριακού θορύβου μειώνονται ή όταν οι πηγές περιβαλλοντικού θορύβου είναι απομακρυσμένες από το σημείο μέτρησης παρατηρείται βελτίωση στην ποιότητα του αέρα [6].

Στα εξεταζόμενα αστικά περιβάλλοντα τα επίπεδα συγκέντρωσης αέριων ρύπων δεν είναι πάντα σταθερά, αλλά παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ενώ υπάρχουν

περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονται μεγάλες αιχμές. Γεγονότα όπως π.χ. η διέλευση ενός φορτηγού οχήματος από κάποιο σημείο παρατήρησης μπορούν να σημειώσουν τέτοιες αιχμές (ή «ακραίες» τιμές), οι οποίες συσχετίζονται ταυτόχρονα και με γεγονότα αυξημένου περιβαλλοντικού θορύβου [1]. Τεχνικές μηχανικής μάθησης και σημασιολογικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως για την καλύτερη κατηγοριοποίηση ή/και ομαδοποίηση περιβαλλοντικών ήχων και την κατανόηση του αστικών και περιαστικών ηχοτοπίων [8]. Στο [3] γίνεται ομαδοποίηση ατμοσφαιρικών και ηχητικών δεδομένων με στόχο την μετέπειτα εκπαίδευση ενός μοντέλου το οποίο θα μπορεί να αντιστοιχίσει σημασιολογική πληροφορία σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Μια βελτιωμένη μέθοδος ολοκλήρωσης χρονικών χαρακτηριστικών για την καλύτερη κατηγοριοποίηση περιβαλλοντικών ήχων παρουσιάζεται στο [9] και μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις αναγνώρισης ρυπογόνων πηγών που παράγουν κάποιο ηχητικό αποτύπωμα.

## 1.2 Επιστήμη των πολιτών

Η *επιστήμη των πολιτών* (*citizen science*) στοχεύει στην ενεργό συμμετοχή του κοινού στην επιστημονική έρευνα<sup>1</sup>. Έτσι, εκτός από τις ενέργειες που γίνονται και τα μέτρα που λαμβάνονται σε παγκόσμιο επίπεδο για τον περιορισμό των αέριων και ηχητικών ρύπων, πιστεύεται ότι η άρτια ενημέρωση των πολιτών θα συντελέσει στην ευαισθητοποίησή τους και στην ενεργό συμμετοχή τους σε δράσεις για τον περιορισμό των προβλημάτων αυτών. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια, με την ευρεία διάδοση της τεχνολογίας και των φορητών συσκευών, γίνεται μια συστηματική προσπάθεια μαζικής συλλογής δεδομένων από τους ίδιους τους χρήστες.

Στο [10] μια συμμετοχική προσέγγιση στοχεύει στο να αυξήσει την ευαισθητοποίηση των παιδιών απέναντι στην ατμοσφαιρική ρύπανση, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα τη διαδικασία μάθησης και κατανόησης των βασικών παραμέτρων αυτής. Στο [11] εξετάζεται η έκθεση των πολιτών στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στο θόρυβο σε σχέση με την υποκειμενική άποψή τους για το πώς αντιλαμβάνονται οι ίδιοι την έκθεση αυτή. Το συμπέρασμα είναι ότι οι πολίτες δεν αντιλαμβάνονται σωστά ή επαρκώς την έκθεσή τους στους ρυπογόνους παράγοντες και κρίνεται αναγκαία η καλύτερη ενημέρωση και ευαισθητοποίησή τους, ιδιαίτερα μέσω της χρήσης της τεχνολογίας και των φορητών συσκευών. Η επιστήμη των πολιτών σε συνδυασμό με στρατηγικές αφοσιωμένων χρηστών (*user engagement*) που εφαρμόζονται σε εφαρμογές πληθοπορισμού (*crowdsourcing apps*) ενισχύει τα υπάρχοντα σετ δεδομένων και πρόκειται να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των μοντέλων μηχανικής μάθησης.

## 2. Σύστημα αναγνώρισης ρυπογόνων πηγών από ηχητικό αποτύπωμα

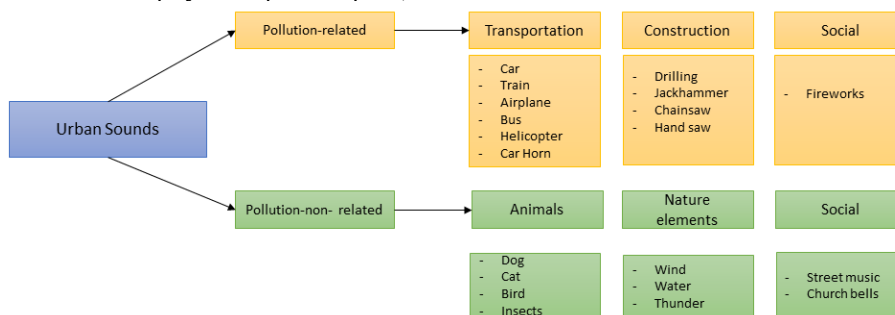
### 2.1 Μεθοδολογία

<sup>1</sup> <https://eu-citizen.science/>

Η παρούσα έρευνα έχει χωριστεί σε τρία διακριτά στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη δημιουργία του κατάλληλου σετ δεδομένων το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση ενός συνελκτικού νευρωνικού δικτύου προκειμένου να κατηγοριοποιούνται οι διαθέσιμοι ήχοι σε δύο διακριτές κλάσεις: (1) σχετιζόμενοι με πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης (related – R) και (2) μη σχετιζόμενοι με πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης (non-related – NR). Το δεύτερο στάδιο σχετίζεται με τη στρατηγική προσέγγισης πολιτών και αφοσιωμένων χρηστών για τη συλλογή ηχητικών αποσπασμάτων σε πραγματικές συνθήκες ενώ το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την εκπαίδευση ενός συστήματος αναγνώρισης πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις ηχητικές καταγραφές που έχουν τροφοδοτηθεί στο σύστημα από τους χρήστες.

## 2.2 Σετ δεδομένων και εκπαίδευση

Για τη δημιουργία του κατάλληλου σετ δεδομένων έγινε μια εκτενής έρευνα, καταγραφή και ενσωμάτωση των πιο διαδεδομένων αστικών ήχων από αντίστοιχα σετ δεδομένων (datasets) που έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε το σετ δεδομένων Urban Air-Noise Pollution (UrANP), το οποίο αποτελεί επέκταση του σετ δεδομένων UrESC22 [1], ως μια προσπάθεια ενσωμάτωσης όσων αστικών ήχων μπορούν να συσχετισθούν με πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης [12]. Επιπλέον, δημιουργήθηκε η ταξινόμια που φαίνεται στο *Σχήμα 1*, λαμβάνοντας υπ' όψη αντίστοιχες ταξονομίες της βιβλιογραφίας [13], [14]. Ο περαιτέρω διαχωρισμός των κλάσεων πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες απόδοσης μετα-πληροφορίας, για μελλοντικές επεκτάσεις και ευρύτερο πεδίο εφαρμογής. Το UrANP περιλαμβάνει ηχητικές καταγραφές από πραγματικό περιβάλλον συνολικής διάρκειας 8,5 ωρών (04:20 ώρες από την κλάση R και 04:10 ώρες από την κλάση NR).



*Σχήμα 1: Ταξινόμια των αστικών ήχων του UrANP*

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη δημιουργία του συνόλου δεδομένων προηγήθηκε ανάμιξη (shuffling) των ηχογραφήσεων για κάθε κλάση πριν την ενσωμάτωσή τους σε ένα αρχείο .wav, έτσι ώστε το τελικό αρχείο να περιέχει αποσπάσματα με ισοσταθμισμένο τρόπο. Ο λόγος αυτής της προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι το UrANP αποτελείται από ηχητικά αποσπάσματα διαφορετικής διάρκειας (π.χ. συνεχές απόσπασμα από διάφορα κλιματιστικά διάρκειας 6 λεπτών, απόσπασμα από ένα τρυπάνι διάρκειας 5 δευτερολέπτων). Όσον αφορά τη χρήση του συνόλου δεδομένων,

συνιστάται 3-πλη διασταυρωμένη επικύρωση (3-fold cross validation) με σημεία διαχωρισμού για τα υποσύνολα εκπαίδευσης/δοκιμής (train/test subsets) 0.00-0.66/0.66-1.00, 0.00-0.33&0.66-1.00/0.33-0.66 και 0.33-1.00/0.00-0.33 για κάθε μία από τις τρεις πτυχές (folds). Τέλος, η αξιολόγηση προτείνεται να εκτελείται σε επίπεδο δειγμάτων με διάρκεια από 0.5 έως 2.0 δευτερόλεπτα.

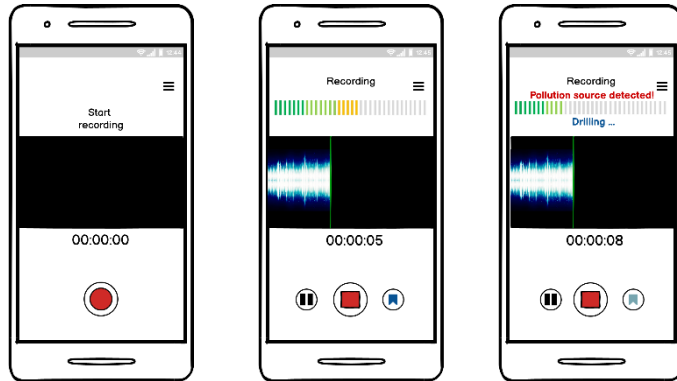
Στη συνέχεια, το UrANP χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση ενός συνελκτικού νευρωνικού δικτύου. Πρόκειται για έναν ταξινομητή 2 κλάσεων, ο οποίος κατηγοριοποιεί την ηχητική είσοδο σε R και NR, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Επιλέχθηκε η τοπολογία ενός τυπικού συνελκτικού δικτύου μίας διάστασης (1D-CNN). Η διαδικασία ταξινόμησης μπορεί να επεξεργαστεί πρωτογενή δεδομένα κυματομορφών ακολουθώντας τις πιο πρόσφατες προσεγγίσεις, όπως περιγράφονται στις εργασίες [15] και [16]. Το δίκτυο αποτελείται από τρία διαδοχικά CPD blocks συμπεριλαμβάνοντας διαδοχικά επίπεδα Συνέλιξης (Convolutional), Συγκέντρωσης (Pooling) και Εγκατάλειψης (Dropout), ένα επίπεδο Μέσης Συνολικής Συγκέντρωσης (Global Average Pooling), και δύο πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα, όπως παρουσιάζεται στο [1]. Τα συνελκτικά επίπεδα διαθέτουν 32, 64 και 96 φίλτρα για τα τρία επίπεδα συνέλιξης αντίστοιχα και μέγεθος πυρήνα 8. Οι υπόλοιποι παράμετροι του συστήματος περιλαμβάνουν: ReLU ως συνάρτηση ενεργοποίησης για τα ενδιάμεσα και τα πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα, SoftMax για το επίπεδο εξόδου, Categorical Cross-Entropy συνάρτηση σφάλματος και βελτιστοποίηση Adam. Ο ρυθμός εγκατάλειψης έχει οριστεί στο 25%. Αναφορικά με τη διαδικασία ελέγχου, αξίζει να σημειωθεί ότι ακολουθείται μια στρατηγική 3-fold cross-validation, ενώ το ηχητικό σήμα καταταμήθηκε σε δείγματα διάρκειας του 1 δευτερολέπτου με επικάλυψη 0.5 δευτερολέπτων.

### *2.3 Στρατηγική προσέγγισης πολιτών – πρωτότυπες οθόνες εφαρμογής*

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η ανάπτυξη μιας φορητής εφαρμογής μέσω της οποίας θα δίνεται η δυνατότητα στους πολίτες να συνεισφέρουν ηχητικά δεδομένα που οι ίδιοι συλλέγουν, χρησιμοποιώντας τα έξυπνα κινητά τους τηλέφωνα. Για κάθε καταγραφή που θα διαμοιράζεται ο χρήστης, θα λαμβάνει κάποια ανταμοιβή. Ο τρόπος ανταμοιβής θα προσδιοριστεί σε επόμενο στάδιο, όταν και θα έχει ολοκληρωθεί η ανάπτυξη όλης της εφαρμογής. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιούνται ως σετ ελέγχου για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου.

Με τον τρόπο αυτό δίνεται κίνητρο στους πολίτες να συμμετέχουν ενεργά στη διαδικασία παρακολούθησης, καταγραφής και ανάλυσης περιβαλλοντικών δεδομένων που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια μιας «εκστρατείας» οι χρήστες καλούνται να ηχογραφήσουν ήχους οι οποίοι πιστεύουν ότι σχετίζονται με αυξημένους ρύπους (π.χ. ήχους από οχήματα). Ως μέγιστη διάρκεια καταγραφής ορίζεται το 1 λεπτό, ενώ ως ελάχιστη τα 10 δευτερόλεπτα. Παράλληλα με την ηχογράφηση, η εφαρμογή ζητά πρόσβαση και σε γεωγραφικά δεδομένα (μέσω του ενσωματωμένου GPS του κινητού τηλεφώνου). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι οθόνες χαμηλής πιστότητας και η αρχιτεκτονική του συστήματος σε διαγραμματική μορφή.



Εικόνα 2: Προτότυπες οθόνες εφαρμογής

#### 2.4 Πειράματα και αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης τοπολογίας πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία ταξινόμησης, χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Ως μετρική αξιολόγησης επιλέχθηκε η ακρίβεια, η οποία δίνει μια γενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας αναγνώρισης. Η ακρίβεια μετρήθηκε ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των δειγμάτων που ταξινομήθηκαν σωστά προς τον συνολικό αριθμό των δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν ακρίβεια στην ταξινόμηση **77.5%** με τυπική απόκλιση **0.9%**. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την εκτέλεση του πειράματος ακολουθήθηκε η προτεινόμενη, για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, διαδικασία αξιολόγησης που καθορίζει 3-πλη διασταυρωμένη επικύρωση (3-fold cross validation) με τα προκαθορισμένα σημεία διαχωρισμού.

### 3. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια προτεινόμενη μεθοδολογία αναγνώρισης πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το ηχητικό τους αποτύπωμα. Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας δημιουργήθηκε το σύνολο δεδομένων UrANP, το οποίο αποτελείται από επιβεβαιωμένους περιβαλλοντικούς ήχους που περιλαμβάνονται στα κυριότερα -σύμφωνα με τη βιβλιογραφία- σύνολα περιβαλλοντικών ηχητικών αποσπασμάτων ESC50, UrbanSound8k και TUT. Στη συνέχεια, εκπαιδεύτηκε ένα μοντέλο συνελκτικού νευρωνικού δικτύου ώστε να είναι σε θέση να διαχωρίζει γνωστούς περιβαλλοντικούς ήχους σε σχετιζόμενους με πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μη. Η πειραματική διαδικασία έδειξε ότι η προτεινόμενη τοπολογία με τη χρήση του UrANP δίνει αποτελέσματα τα οποία είναι συγκρινόμενα με αυτά της βιβλιογραφίας. Παράλληλα, για τη συλλογή περισσότερων ηχητικών δειγμάτων σε πραγματικές συνθήκες, προτείνεται μια φορητή εφαρμογή, η οποία θα δώσει στους πολίτες τη δυνατότητα να συνεισφέρουν με δικές τους -επισημειωμένες- ηχητικές καταγραφές. Η εφαρμογή αυτή θα επιτρέπει τη συμμετοχική διαδικασία παρακολούθησης, καταγραφής και ανάλυσης



περιβαλλοντικών δεδομένων που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση, στο ευρύτερο πλαίσιο της επιστήμης των πολιτών.

Σε μελλοντικό στάδιο πρόκειται να γίνει μια προσπάθεια συσχέτισης μεταξύ ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ηχορύπανσης. Η ανίχνευση μόνο μιας ρυπογόνου πηγής μέσω του ηχητικού της αποτυπώματος δεν θεωρείται ικανή συνθήκη για να εξάγει κανείς ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη γενικότερη ποιότητα αέρα και ήχου. Ζητήματα (και αντίστοιχα δεδομένα) που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη έχουν να κάνουν με το επίπεδο και τη διάρκεια των καταγραφόμενων ήχων αλλά και με τα επιμέρους τοπικά, χρονικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά (π.χ. υψόμετρο, καιρικές συνθήκες, στιγμή της ημέρας, κ.ά.). Επομένως, στο στάδιο αυτό θα ολοκληρωθεί η δημιουργία του κατάλληλου σετ δεδομένων που θα περιλαμβάνει τόσο τα ίδια τα δεδομένα, όσο και μετα-δεδομένα και σημασιολογική πληροφορία.

Η εργασία αποτελεί μέρος του έργου SOCIO-BEE (H2020 GA: 101037648) που έχει ως στόχο την ενεργοποίηση των πολιτών προκειμένου να έχουν προληπτική ενεργό περιβαλλοντική στάση και δράση. Βασίζεται σε μια προσέγγιση Επιστήμης των Πολιτών με την οποία οι πολίτες διαθέτουν εξειδικευμένες φορητές συσκευές (wearables) για τη συνεχή καταγραφή της ποιότητας του αέρα. Ταυτόχρονα, τους δίνεται πρόσβαση σε μια φορητή εφαρμογή μέσα από την οποία θα μπορούν να διαχειρίζονται τις μετρήσεις τους αλλά και να συνεισφέρουν επιπλέον ηχητικό περιεχόμενο. Αυτό θα επιτρέψει την ταυτόχρονη παρακολούθηση αέρα-περιβαλλοντικού ήχου, καθιστώντας το τρίτο στάδιο της παρούσας έρευνας υλοποιήσιμο και αξιόπιστο.



### Αναφορές

- [1] M.E. Stamatiadou, N. Vryzas, L. Vrysis, & C. Dimoulas «A citizen science approach to support joint air quality and noise monitoring in urban areas» in *Audio Engineering Society Convention 152*, Audio Engineering Society, (2022)
- [2] J. Khan, M. Ketzler, K. Kakosimos, M. Sørensen, & S. S. Jensen «Road traffic air and noise pollution exposure assessment—A review of tools and techniques» *Science of the total environment* **634**, pp 661-676 (2018)
- [3] B. Maity, Y. Polapragada, S. Bhattacharjee, & S. Nandi «CoAN: A system framework correlating the air and noise pollution sensor data» *Pervasive and Mobile Computing* **81** (2022)
- [4] M. S. Engel, B. Paas, C. Schneider, C. Pfaffenbach, & J. Fels «Perceptual studies on air quality and sound through urban walks» *Cities* **83**, pp 173-185 (2018)
- [5] B. Paas, J. Stienen, M. Vorländer, & C. Schneider «Modelling of urban near-road atmospheric pm concentrations using an artificial neural network approach with acoustic data input» *Environments* **4**(2), pp 26 (2017)
- [6] S. Weber «Spatio-temporal covariation of urban particle number concentration and ambient noise» *Atmospheric Environment*, **43**(34), pp 5518-5525 (2009).

- [7] P. Bartie, & S. Kingham «Media mapping: using georeferenced images and audio to provide supporting information for the analysis of environmental sensor datasets» *OSGeo Journal* **8**, pp 23-30 (2011)
- [8] M. E. Stamatiadou, I. Thoidis, N. Vryzas, L. Vrysis, & C Dimoulas. «Semantic Crowdsourcing of Soundscapes Heritage: A Mojo Model for Data-Driven Storytelling» *Sustainability* **13**(5), pp 2714 (2021)
- [9] V. Bountourakis, L. Vrysis, K. Konstantoudakis, & N Vryzas. «An enhanced temporal feature integration method for environmental sound recognition» In *Acoustics*, MDPI, pp. 410-422 (2019)
- [10] D. Varaden, E. Leidland, S. Lim, & B. Barratt «“I am an air quality scientist”– Using citizen science to characterise school children's exposure to air pollution» *Environmental Research* **201**, 111536 (2021)
- [11] H. Marquart, K. Stark, & J. Jarass «How are air pollution and noise perceived en route? Investigating cyclists' and pedestrians' personal exposure, wellbeing and practices during commute» *Journal of Transport & Health* **24**, (2022)
- [12] Bhargav, A. «Air Pollution-Sources and Classification» *Op Acc J Bio Sci & Res*, **1**(4) (2020)
- [13] J. Salamon, C. Jacoby, & J. P. Bello «A dataset and taxonomy for urban sound research» In *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia* pp 1041-1044 (2014)
- [14] Mesaros, A., Heittola, T., & Virtanen, T. «TUT database for acoustic scene classification and sound event detection» In *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, IEEE, pp 1128-1132 (2016)
- [15] L. Vrysis, N. Tsipas, I. Thoidis, & C. Dimoulas «1D/2D Deep CNNs vs. temporal feature integration for general audio classification» *Journal of the Audio Engineering Society*, **68**(1/2), pp 66-77 (2020)
- [16] L. Vrysis, Thoidis I., C. Dimoulas, & G. Papanikolaou «Experimenting with 1D CNN architectures for generic audio classification» In *Audio Engineering Society Convention 148*, Audio Engineering Society (2020)

**Ήχοι του Εικοσιένα.  
Καταγραφή χαρακτηριστικών ήχων της επανάστασης του  
1821 και ταξινόμηση ως προς το είδος και την απόσταση  
διάδοσής τους.**

Ηλίας Παπαγεωργίου  
Αρχιτέκτων / Κανάρη 8, Νέο Ψυχικό  
info@iliaspapageorgiou.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στη μελέτη καταγράφονται ήχοι που αναφέρονται σε απομνημονεύματα αγωνιστών και ιστορικές καταγραφές. Ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: 1. Ήχοι χαμηλής ηχητικής πίεσης, που διαδίδονται δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα μακριά. 2. Ήχοι μεσαίων αποστάσεων που η διάδοσή τους έφτανε μέχρι λίγα χιλιόμετρα. 3. Ήχοι μεγάλων αποστάσεων, που διαδίδονταν, σύμφωνα με τις ιστορικές πηγές, σε αποστάσεις δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Καθώς η διάδοση του ήχου σε πολλές περιπτώσεις μοιάζει υπερβολική για τα σημερινά δεδομένα, εξετάζεται αν οι ιστορικές πηγές αληθεύουν ή υπό ποιες προϋποθέσεις θα μπορούσαν να αληθεύουν. Πιθανή εξήγηση ίσως είναι ο χαμηλός περιβαλλοντικός θόρυβος. Γενικά μπορεί να υποστηριχθεί πως οι άνθρωποι της εποχής στηρίζονταν αρκετά στον ήχο για τη μεταξύ τους επικοινωνία ξεπερνώντας την απουσία μέσων τηλεπικοινωνίας που διαθέτουμε σήμερα.*

**Sounds of 1821.  
Recording of characteristic sounds of the Greek revolution  
and classification according to their type and propagation  
distance.**

**ABSTRACT**

*The study focuses on sounds that are recorded in memoirs of fighters and historical records. The sounds are classified in three categories: 1. Low SPL sources, that propagate tens or hundreds of meters away. 2. Medium-range sounds, that propagate over distances of a few kilometers. 3. Long distance sounds, that spread, according to the historic sources, over distances of tens or even hundreds of kilometers. Since the sound propagation in many cases seems, to us today, exaggerated, it is examined if the historic sources are true or, under which conditions they could be true. A possible explanation is the low environmental noise. In general, it can be argued that the people of that time relied quite a lot on sound to communicate with each other, overcoming the absence of telecommunication means that we have today.*

## Εισαγωγή

Αντικείμενο της μελέτης είναι η καταγραφή και ανάδειξη των ήχων που ακούγονταν κατά τη διάρκεια της επανάστασης του 1821. Αν και δεν υπάρχουν αναλυτικές περιγραφές – ούτε προφανώς καταγεγραμμένα ακουστικά τεκμήρια – μέσα από τις διηγήσεις των ιστορικών και των απομνημονευμάτων των αγωνιστών μπορούν να αντληθούν στοιχεία για τους ήχους που ακούγονταν στην καθημερινότητα των ανθρώπων αλλά και σε σημαντικά γεγονότα. Παρότι οι αφηγήσεις εστιάζουν στα γεγονότα καθεαυτά και την έκβασή τους, οι συγγραφείς δεν παραλείπουν να περιγράψουν τους ήχους που τα συνοδεύουν και συχνά τα χαρακτηρίζουν. Στο κείμενο σταχολογούνται ενδεικτικά κάποια από τα πολλά αποσπάσματα που απαντώνται στα πρωτότυπα κείμενα.

Οι ήχοι ταξινομούνται ανάλογα με το είδος, την ένταση και την απόσταση διάδοσής τους. Στην πρώτη κατηγορία ταξινομούνται ήχοι χαμηλής έντασης, με πιο χαρακτηριστικό την ανθρώπινη φωνή, που διαδίδονται σε μικρές αποστάσεις δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων. Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται ήχοι όπως όπλα και μουσικά όργανα που διαδίδονται σε αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων. Στην τρίτη κατηγορία ταξινομούνται ήχοι μεγάλης ηχητικής πίεσης, όπως κανονιές και εκρήξεις, που διαδίδονται –σύμφωνα με τις αφηγήσεις – σε αποστάσεις δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Ενώ οι ήχοι χαμηλής έντασης έχουν κυρίως πραγματολογικό ενδιαφέρον, οι ήχοι μεσαίων και μεγάλων αποστάσεων παρουσιάζουν επιπλέον ιδιαίτερο ακουστικό ενδιαφέρον. Εξετάζονται πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τους υπολογισμούς εξασθένησης της ηχητικής πίεσης που προβλέπονται στο ISO 9613-2, ως προς το αν αληθεύουν οι διηγήσεις ή υπό ποιες προϋποθέσεις θα μπορούσαν να ισχύουν όσα περιγράφονται.

### 1. Ήχοι μικρών αποστάσεων

Η καθημερινότητα των ανθρώπων του 1821 δεν χαρακτηριζόταν μόνο από τους ήχους των όπλων. Μπορεί το δημοτικό τραγούδι να λέει *«αχός βαρύς ακούγεται, πολλά ντουφέκια πέφτουν»*, ωστόσο οι ήχοι που ακούγονταν ήταν πολλών λογίων. Η έναρξη της επανάστασης στην Ύδρα αναγγέλθηκε και διαδόθηκε με τους ήχους των καμπανών και τις φωνές των τελάληδων [1].

Ο πιο χαρακτηριστικός ήχος του 1821 είναι τόσο αυτονόητος που συχνά δεν του δίνουμε σημασία: η ανθρώπινη φωνή. Οι αγωνιστές δεν πολεμούσαν μόνο με όπλα, αλλά, όπως οι Ομηρικοί ήρωες, στις μάχες αντάλασσαν μεταξύ τους απειλές, πειράγματα, ακόμα και βρισιές [2]. Οι αντιμαχόμενες πλευρές απείχαν μεταξύ τους *«όσον τε γέγωνε βοήσας»*, δηλαδή (όπως εύστοχα περιγράφεται στο Ομηρικό μοτίβο) *«ως εκεί που φτάνουν να είναι κατανοητά τα λόγια ανθρώπου που φωνάζει»* [3]. Οι αθυρόστομες στιχομυθίες του Καραϊσκάκη είναι οι πιο γνωστές [4].

Η ανθρώπινη φωνή δεν ακουγόταν μόνο στις μάχες. Φλογεροί λόγοι εκφωνήθηκαν συχνά με τον χαρακτηριστικό τρόπο του ανεβάσματος του ομιλητή σε ένα ύψωμα. Ο Κολοκοτρώνης στα Βέρβена κάλεσε τους στρατιώτες να τους μιλήσει: *«Τους ετράβηξα τίρο τουφέκι, εις μια βρύση όλους, και ανέβηκα πάνω εις μία πέτρα για να ακούν όλοι, και τους είπα: διατί θέλουμε τον χαυμό μας μοναχοί μας;»* [5]. Υπάρχουν διάφορες περιγραφές δημόσιων συναθροίσεων, όπως για παράδειγμα στην πλατεία του Ναυπλίου [6], που όντας περικλειστη πιθανόν να ήταν

κατάλληλη για τέτοιου είδους συγκεντρώσεις καθώς οι τοίχοι της συγκρατούσαν τον ήχο. Δεν συνέβαινε το ίδιο πάντα. Τα ακροατήρια συχνά ήταν μεγάλα (ο Τρικούπης περιγράφει λόγο του Κολοκοτρώνη σε 1300 Αρκάδιους) [7] και δεν γνωρίζουμε αν οι ακουστικές συνθήκες ήταν πάντοτε ιδανικές. Στη διήγησή του, ο Κολοκοτρώνης δεν παραλείπει να αναφέρει κάπου πως «είχε πιασθεί ο λαιμός μου από ταις φωναίς της ημέρας» [8].

Η ανθρώπινη φωνή ήταν κυρίαρχη και στις Εθνοσυνελεύσεις, στις οποίες συγκεντρώνονταν δεκάδες ή και εκατοντάδες πληρεξούσιοι (από 59 έως 236). Οι περισσότερες συνελεύσεις έγιναν σε υπαίθριους ή ημιυπαίθριους χώρους: σε περιβόλια, λεμονόκηπους, αρχαία θέατρα ή ξύλινα παραπήγματα. Μόνο μία έγινε σε κλειστό χώρο. Ακόμα κι όταν ήταν υπαίθριες, όμως, οι περισσότερες συνεδριάσεις έλαβαν χώρα σε περικλειστούς χώρους περιφραγμένους με μάντρες, κυρίως για λόγους μυστικότητας. Μπορούμε ωστόσο να εκτιμήσουμε πως οι ψηλοί τοίχοι, σε συνδυασμό με την σχετικά μικρή κλίμακα των χώρων, ενίσχυαν με ευεργετικές ανακλάσεις τις φωνές των πληρεξουσίων και τις προστάτευαν από εξωτερικούς θορύβους, στο μέτρο του δυνατού. Κάποιες φορές αυτό δεν ήταν εφικτό. Οι συνεδριάσεις στο Ναύπλιο, γίνονταν υπό τις φωνές Ρουμελιωτών στρατιωτών που διεκδικούσαν τους μισθούς τους [9].

Ήχοι διαφόρων ειδών λειτουργούσαν προτρεπτικά, ενθαρρυντικά αλλά και τρομάζοντας τους αντιμαχόμενους. Αλαλαγμοί ή ακόμα και ο ήχος της μουσικής μπορούσε να τονώσει ή να ρίξει το ηθικό μιας πλευράς. Μόνο ο θόρυβος των σαλπύγων του Ιμπραήμ, για παράδειγμα, ήταν ικανός να διαλύσει τους οχυρωμένους αγωνιστές στα Βέρβενα. Από την άλλη μεριά, παραπλανητικοί ήχοι μπορούσαν να αλλάξουν τη ροή των γεγονότων. Στη Μαύρη Αλυκή, οι Έλληνες πυροβολούσαν και τραγουδούσαν όλη νύχτα ενώ το πρωί ανάγκαζαν γουρούνια (ακάθαρτα ζώα για τους μουσουλμάνους) να γρυλίζουν πιάνοντάς τα από τον λαιμό. Οι ήχοι ξεγέλασαν αλλά και εξόργισαν τους εχθρούς, εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την απόβαση του στόλου τους [10].

Εξίσου βαρύνουσα σημασία αποκτούσε ενίοτε και η σιωπή: Κατά τη διάρκεια της Γ΄ Εθνοσυνέλευσης, ο Κολοκοτρώνης διηγείται: «*Μας ήλθε η είδησις ότι το Μισολόγγι εχάθη. Έτζι εβάλαμεν τα μαύρα όλοι. Μισή ώρα εστάθη σιωπή που δεν έκρινε κανένας, αλλ' εμέτραε καθένας με τον νουν του τον αφανισμόν μας*» [11]. Κατά τη διάρκεια της πολιορκίας του Μεσολογγίου, οι ένοπλες μάχες αντικαταστάθηκαν από έναν υπόγειο πόλεμο. Υπονομοποιοί και από τις δυο αντιμαχόμενες πλευρές, έσκαβαν «*υπόγειες στοές που κατευθύνονταν κάτω από τις εχθρικές οχυρώσεις [...] Η προερχόμενη από τα έγκατα της γης απειλή άλλαξε τις συνήθειες των πολεμιστών της πρώτης γραμμής. Οι συνομιλίες, οι βρισιές, οι απειλές, οι φοβέρες που ανταλλάσσονταν περιορίστηκαν στο ελάχιστο. Το ίδιο οι άσκοποι θόρυβοι και πυροβολισμοί. Η σιωπή έγινε όπλο. Η ακοή των ανθρώπων στράφηκε προς τα κάτω, προς το έδαφος, επιζητώντας να μαντέψει τα όσα συνέβαιναν κάτω από αυτό*» [12].

## 2. Ήχοι μεσαίων αποστάσεων

Οι άνθρωποι του Εικοσιένα χρησιμοποιούσαν συχνά ήχους που λειτουργούσαν ως σινιάλα ή σήματα. Η τρομπέτα, το τύμπανο αλλά και το τουφέκι και η καμπάνα έστελναν τις κατάλληλες πληροφορίες: «*Τον Βασίλην τον τουρμπετιέρη τον έστειλα*

να μας κάμη σημάδι, αν οι Τούρκοι είναι ολίγοι, να βαρέση την τρομπέτα, εάν όλο το στρατεύμα, να ρίξη ένα ντουφέκι» γράφει ο Κολοκοτρώνης [13].

Ο ήχος του τουφεκιού λειτουργούσε ποικιλοτρόπως. Κατά τη διάρκεια της Β' Εθνοσυνέλευσης, όταν οι Δημοκρατικοί πήραν είδηση το σχέδιο εκποίησης των εθνικών γαιών που επρόκειτο να ψηφιστεί, έγραψαν σε ένα μεγάλο πανί «γης εκποίησης» και άρχισαν να το πυροβολάνε. Οι πυροβολισμοί ακούστηκαν από τη φρουρά των ολιγαρχικών σε απόσταση περίπου 1000μ. Το αποτέλεσμα ήταν πως «οι στρατιώτες όλοι, και των δύο κομμάτων, ενώθηκαν, προκλήθηκε μεγάλη αναταραχή και η εκποίηση ματαιώθηκε» [14]. Το άκουσμα πυροβολισμών μάχης, έφερνε συχνά βοήθεια από διπλανά στρατόπεδα ή χωριά: «Στο στρατόπεδο των Βερβένων [...] ακούγοντας τη μάχη η οποία είχε αρχίσει στα Δολιανά [3 χιλιόμετρα μακριά] έτρεξαν σχεδόν όλοι για βοήθεια» [15] (βλ Πίν. 2.1.β). Άλλοτε η βοήθεια δεν ερχόταν. Σε μια μάχη στη Σιλήμνα, ο Κολοκοτρώνης παραπονιέται πως «τα στρατεύματα ήσαν εις τα Βέρβεννα [20 χιλιόμετρα μακριά] – άκουσαν τον πόλεμον και δεν ήλθαν εις βοήθειαν» [16] (βλ Πίν. 2.1.δ).

Η τρομπέτα έπαιζε εξίσου σημαντικό ρόλο. Ο Κολοκοτρώνης εμπύχωνε τους χωρικούς με αυτήν: «Και εις τον δρόμον που επάγαινα έβανα την τρομπέτα δια να με γνωρίση ο κόσμος και με εγνώρισαν και τους εμπύχωνα να πάνε πίσω στα σπίτια τους» [17]. Άλλοτε λειτουργούσε ως σινιάλο. Στο Δαδί (σημερινή Αμφίκλεια) «εμφανίστηκε ξαφνικά ο τουρκικός στρατός [...] και ο σαλπικτής του Ανδρούτσου ειδοποίησε τους Έλληνες με τη σάλπιγγά του» οι οποίοι βρίσκονταν στο Μοναστήρι της Παναγίας που απείχε 1200 μέτρα με έναν λόφο ανάμεσά τους [18] (βλ Πίν. 2.1.α). Το τύμπανο πληροφορούσε με όμοιο τρόπο. Η έναρξη της ημερήσιας συνεδρίασης των εθνοσυνελεύσεων οριζόταν από τον χτύπο του ταμπούρλου. Ο Κολοκοτρώνης αναφέρει πως σε επίσκεψή του στη φρεγάτα του Χάμιλτον, που ήταν αγκυροβολημένη στον Πόρο, σε απόσταση τουλάχιστον 4 χιλιομέτρων άκουσε το τύμπανο: «Έχασομέρησα πολύ εις την φρεγάδα, και το ταμπούρλο της Συνελεύσεως αρχίναε να κτυπά». [19] (βλ Πίν. 2.1.γ).

Ιδιαίτερο ακουστικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μακρινή διάδοση των ηχητικών πηγών, εξ ου και η καταγραφή της απόστασης στα προηγούμενα παραδείγματα. Σε πολλές περιπτώσεις η απόσταση μοιάζει υπερβολική, τουλάχιστον με σημερινά κριτήρια. Για τον έλεγχο της εγκυρότητας των διηγήσεων πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί σύμφωνα με το ISO 9613-2, ώστε να προσδιοριστεί η συνολική εξασθένιση του ήχου, έστω και ως τάξη μεγέθους. Επισημαίνεται πως τα στοιχεία συχνά είναι ελλιπή. Δεν γνωρίζουμε την ηχητική πίεση πολλών από τις ακουστικές πηγές, ούτε τον περιβαλλοντικό θόρυβο. Επίσης δεν είναι γνωστό το είδος του εδάφους ή άλλες παράμετροι και αναγκαστικά γίνονται κάποιες υποθέσεις και παραδοχές. Ο συντελεστής G για τον υπολογισμό της επίδρασης του εδάφους ( $A_{gr}$ ) θεωρείται πως είναι 1 εκτός από τις περιπτώσεις που το μέσο διάδοσης είναι υδάτινο και άρα  $G=0$ . Στις περιπτώσεις ύπαρξης εμποδίων, όπως λόφων ή βουνών, για τον υπολογισμό της περίθλασης η γεωμετρία απλοποιείται. Τέλος δεν συνυπολογίζεται η Κατευθυντικότητα ( $D_c$ ) και δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η ατμοσφαιρική διάθλαση του ήχου εξαιτίας της υγρασίας. Η αποστάσεις έχουν μετρηθεί σε ευθεία γραμμή από το Google Earth πάνω στο υπόβαθρο kmz των εκδόσεων Ανάβαση.

Από τους υπολογισμούς προκύπτει πως η εξασθένιση στις υψηλές συχνότητες είναι πολύ μεγάλη. Αντίθετα στις πολύ χαμηλές περιορίζεται σε τιμές που θα μπορούσαν να επιτρέπουν τη διάδοση κάποιων από τους ήχους. Επισημαίνεται πως

αρκετοί από τους ήχους, ιδιαίτερος εκείνοι που περιγράφονται στην επόμενη ενότητα, χαρακτηρίζονται από χαμηλές συχνότητες. Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι τιμές της συνολικής εξασθένισης A, που προκύπτει, σύμφωνα με το ISO 9613-2, από το άθροισμα της Γεωμετρικής Εξασθένισης ( $A_{div}$ ), της Ατμοσφαιρικής Εξασθένισης ( $A_{atm}$ ), της Επίδρασης του Εδάφους ( $A_{gr}$ ) και της Περιθλάσης σε Εμπόδιο ( $A_{bar}$ ).

Πίνακας 2.1 Συνολική εξασθένιση A, για συχνότητα 63Hz.

	Πηγή	Δέκτης	Αποστ.	$A_{div}$	$A_{atm}$	$A_{gr}$	$A_{bar}$	A
			m	dB	dB	dB	dB	dB
$\alpha$	Αμφίκλεια	Μονή	1200	72,9	0,1	-5,4	21,5	<b>89,2</b>
$\beta$	Βέρβενα	Δόλιανα	3000	80.5	0.3	-5.8	0	<b>75.1</b>
$\gamma$	Τροιζήνα	Πόρος	4000	83.0	0.4	-5.8	0	<b>77.6</b>
$\delta$	Σιλήμνα	Βέρβενα	20000	97.0	2.0	-6.0	11.5	<b>112,4</b>

Στην περίπτωση του τυμπάνου της Εθνοσυνέλευσης της Τροιζήνας (βλ. Πιν. 2.1.γ) η εξασθένιση είναι 78 dB. Αν υποθεθεί πως η ηχητική πίεση της πηγής ( $L_w$ ) είναι 110 dB, η ηχητική πίεση στον δέκτη είναι  $L=L_w-A = 110-78=32$  dB. Για να ακούγεται από τον Κολοκοτρώνη θα έπρεπε να υπερβαίνει τον περιβαλλοντικό θόρυβο, ο οποίος συνεπώς μάλλον κυμαινόταν σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, της τάξης των 30-35 dB. Η τιμή αυτή θα θεωρηθεί δεδομένη σε όλα τα επόμενα παραδείγματα. Στην περίπτωση του ήχου της Τρομπέτας στην Αμφίκλεια (με πιθανή ηχητική πίεση 115 dB) [20], παρότι η απόσταση ήταν μικρότερη, η εξασθένιση (συνυπολογίζοντας και την παρουσία του λόφου) είναι μεγάλη. Ο ήχος της τρομπέτας πέφτει στα 26 dB, τιμή οριακή για να είναι ακουστή και ίσως πρέπει να υποθεθεί πως ο σαλπικτής βρισκόταν σε μια ενδιάμεση απόσταση για να ακούγεται. Ο «πόλεμος», οι ντουφεκίες δηλαδή, από τη Σιλήμνα, δεν είναι πιθανόν να ακούστηκε στα Βέρβενα, εκτός αν υπερέβαινε τα 145-150 dB, και ίσως ο Κολοκοτρώνης να υπερβάλλει.

Ανεξάρτητα αν αληθεύουν όλες οι διηγήσεις, μπορεί να αντληθεί ως απόσταγμα πως το ηχητικό περιβάλλον της εποχής μάλλον ήταν πολύ πιο ήσυχο από το σημερινό, τόσο που να επιτρέπει τη διάδοση σε τόσο μακρινές αποστάσεις.

### 3. Ήχοι μεγάλων αποστάσεων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αναφορές σε ήχους που ακούγονταν σε αποστάσεις δεκάδων ή και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Ίσως η πιο γνωστή να είναι η αναφορά στον Σολωμό που άκουγε από τη Ζάκυνθο τα κανόνια του Μεσολογγίου, 81 χιλιόμετρα μακριά. Ο τόπος της Γ Εθνοσυνέλευσης, η Τροιζήνα, επιλέχθηκε σύμφωνα με τον Τρικούπη ώστε «ο πληρεξούσιος αν δεν έβλεπε τον καπνόν, να ήκουε καν τον κρότον των κατά της Ακροπόλεως κανονίων» (από τον Κιουταχί) [21], που απείχαν 62 χιλιόμετρα. Η διάδοση ακόμα πιο μακρινών ήχων μοιάζει σήμερα σχεδόν απίστευτη. Ο Κασομούλης αναφέρει πως άκουσε από την Κόρινθο τους κρότους της Ναυμαχίας του Ναβαρίνου, που απείχε 157 χιλιόμετρα και επιπλέον ο ήχος αναγκαστικά περιθλάτο πάνω από τα βουνά της Πελοποννήσου. Ο

θόρυβος της ναυμαχίας του Τσεσμέ, απέναντι από τη Χίο κατά τη διάρκεια των Ορλωφικών, λέγεται πως έφτασε μέχρι την Αθήνα, 220 χιλιόμετρα μακριά. Πραγματοποιώντας πάλι τους ίδιους υπολογισμούς προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για τη συνολική εξασθένιση:

Πίνακας 3.1 Συνολική εξασθένιση A, για συχνότητα 63Hz

	Πηγή	Δέκτης	Αποστ.	A <sub>div</sub>	A <sub>at</sub> m	A <sub>gr</sub>	A <sub>bar</sub>	A
			m	dB	dB	dB	dB	dB
α	Μεσολόγγι	Πεταλάς	29000	100,2	2,9	-6,0	0	<b>97,2</b>
β	Αθήνα	Τροιζήνα	62000	106,8	6,2	-6,0	0	<b>107,1</b>
γ	Μεσολόγγι	Ζάκυνθος	81000	109,2	8,1	-6,0	0	<b>111,3</b>
δ	Ναυαρίνο	Κόρινθος	157000	114,9	15,7	-6,0	24,7	<b>149,3</b>
ε	Τσεσμές	Αθήνα	220000	117,8	22,0	-6,0	23,1	<b>156,9</b>

Στον πίνακα φαίνονται μεγάλες τιμές εξασθένισης, ακόμα και στις χαμηλές συχνότητες. Κάνοντας πάλι την υπόθεση πως ο περιβαλλοντικός θόρυβος θα ήταν της τάξης των 30-35 dB, προκύπτει πως η ηχητική πίεση των ήχων του Μεσολογγίου και της Αθήνας θα ήταν της τάξης των 145-150 dB ((βλ. και Πιν. 3.1.α,β,γ), ενώ στις δύο Ναυμαχίες οι κρότοι θα έπρεπε να ξεπερνούν τα 185-190 dB, τιμή υπερβολικά υψηλή (βλ. και Πιν. 3.1.δ,ε).

Μια πιο προσεκτική ανάγνωση των ιστορικών πηγών μας δίνει ενδιαφέρουσες λεπτομέρειες. Ο Σπυρομήλιος που βρισκόταν στο νησί Πεταλάς, σε απόσταση 29 χιλιομέτρων, γράφει για τα γεγονότα της Εξόδου του Μεσολογγίου: «Πόλεμος συνεχής ηκούετο εις Μεσολόγγιον, κρότοι αδιάκοποι κανονίων και τουφεκίων. Κατά τα γλυκοχαράματα της δωδεκάτης Απριλίου εβγήκα εις Πεταλά, αλλ' ηκούσθη τότε κρότος μέγας εις Μεσολόγγιον, μας έσεισεν η γης [...] αλλ' ο συνεχής πόλεμος δι όλης της διάρκειάς της νυκτός εις το Μεσολόγγιον και ο μέγας κρότος, όπου ηκούσθη το πρωί μαζί με το σείσιμον της γής, μας έκαμεν να συλλάβωμεν θλιβεράς ιδέας περί του Μεσολογγίου» [22]. Η έξοδος του Μεσολογγίου πραγματοποιήθηκε στις 10 Απριλίου. Αυτό που άκουσε ο Σπυρομήλιος δύο μέρες μετά δεν ήταν απλώς κανονιές, αλλά τις απεγνωσμένες ανατινάξεις κτιρίων μέσα στα οποία βρίσκονταν όσοι είχαν απομείνει στην πόλη [23]. Ο Σολωμός στη *Γυναίκα της Ζάκυνθος* καταγράφει τον απόηχο των γεγονότων: «Και εσυνέβηκε αυτές τις ημέρες, όπου οι Τούρκοι επολιορκούσαν το Μισολόγγι, και συχνά έτρεμε η Ζάκυνθο από το κανόνισμα το πολύ [...] Και μια άλλη [γυναίκα] απλώνοντας το χέρι και ψηλαφίζοντας το γιαλό: 'Αδελφάδες', εφώναζε, 'ακούτε, αν ήρθε ποτέ από το Μισολόγγι τέτοιος σεισμός σαν και τώρα. Ίσως νικάει, ίσως πέφτει'.» [24] Από τις αναφορές συνειδητοποιούμε πως δεν επρόκειτο απλώς για αερόφερτο ήχο χαμηλών συχνοτήτων αλλά για σεισμικές δονήσεις και ωστικό κύμα εκρήξεων. Τέτοιες εκρήξεις δεν έγιναν μόνο κατά τη διάρκεια της Εξόδου, αλλά προκαλούνταν και από τον πόλεμο των λαγουμιών που ήδη αναφέρθηκε. Ο υπονομοποιός Κώστας Λαγουμτζής ανατίνασσε διαρκώς ένα τεράστιο ανάχωμα που είχε φτιάξει ο Κιουταχής πλησιάζοντάς το σιγά σιγά προς τα τείχη της πόλης. Παρόμοιος υπόγειος πόλεμος συνέβη και κατά τη διάρκεια της πολιορκίας της Αθήνας. Οι εκρήξεις αυτού του μεγέθους μάλλον έφταναν σε τιμές που επέτρεπαν τη διάδοση του ήχου στη Ζάκυνθο και στην Τροιζήνα.



Όμοιες πληροφορίες μας δίνει ο Κασομούλης για τη Ναυμαχία του Ναυαρίνου: «Ενώ εμελετούσα τούτα [...] κρότον βαθύν (κανονιοβολισμών) φέρει ο αέρας εις τας ακoάς μας, δυνατώτερον των (συνήθων χαιρετισμών δια) κανονίων, (κρότον) συνεχών» [25]. Ο Κούμας αντίστοιχα γράφει για τα πυρπολικά στη ναυμαχία του Τσεσμέ: «Όλα τα τουρκικά καράβια έγειναν άρπαγμα του πυρός, το οποίον εμαίνετο από την 1 ώρα εκ μεσονυκτίου έως την 6. Το θέαμα ήτο φοβερόν, ο κρότος ηκούσθη έως τας Αθήνας, εις την Σμύρνην [75 χιλιόμετρα μακριά] εσειέτο η γη, και τα Ρωσικά καράβια, τα οποία ολίγον τι μακράν ήσαν αυτόπται του τεραστίου, ωθούντο εδώ κ εκεί ως από σφοδρότατον κλύδωνα» [26]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιορισμένη σημασία που παίζουν ακόμα και ψηλά βουνά, ύψους 1600μ, στην εξασθένιση του ήχου σε τέτοιες μεγάλες αποστάσεις. Η διαφορά μήκους ανάμεσα στον απ' ευθείας και τον περιθλώμενο ήχο (το z στην εξίσωση της περίθλασης), είναι λίγες δεκάδες μέτρα. Ωστόσο, παρά την παραπάνω επισήμανση, η αερόφερτη διάδοση για την περίπτωση του Ναυαρίνου και του Τσεσμέ δύσκολα μπορεί να επιβεβαιωθεί.

#### 4. Επίλογος

Κλείνοντας αυτή την καταγραφή είναι σημαντικό να επισημανθεί η πεπερασμένη γνώση, σίγουρα του γράφοντος αλλά και γενικότερα, για τα ζητήματα που καταγράφησαν. Τονίζεται ξανά πως οι υπολογισμοί βασίζονται σε υποθέσεις και με κανέναν τρόπο δεν αποτελούν απόλυτο κριτήριο ελέγχου των ιστορικών πηγών. Ίσως να μην μπορούν να επιβεβαιωθούν όλες οι διηγήσεις. Πρόκειται, άλλωστε, για κείμενα που γράφτηκαν δεκαετίες μετά τα γεγονότα. Δεν γίνεται ωστόσο να μην επισημανθεί πως στις περισσότερες περιπτώσεις οι ήχοι περιγράφονται με εξαιρετική ακρίβεια και ζωντάνια και πως οι συγγραφείς δεν έχουν κάποιον προφανή λόγο να παραπλανήσουν ή να υπερβάλλουν. Για την κατανόηση όσων αναφέρθηκαν είναι σημαντικό να αναδειχτεί μια επιπλέον παράμετρος: η εξαιρετικά οξυμμένη αντίληψη που πιθανόν να είχαν οι άνθρωποι εκείνη την εποχή, εξαιτίας των συνθηκών. Μια περιγραφή για τους κλέφτες των μετεπαναστατικών χρόνων είναι διαφωτιστική: «Η ακοή τους είχε οξυνθεί κατά τρόπο εξωπραγματικό. Μπορούσαν να ακούσουν το τσάκισμα ενός κλαδιού ή τον θόρυβο από το πάτημα ενός ξερού φύλλου από πάρα πολύ μακρινή απόσταση. Όσο πιο ακονισμένες ήταν οι αισθήσεις τους τόσο πιο μακρινός ο κίνδυνος για τη ζωή τους» [27]. Η περιορισμένη παρουσία ανθρωπογενών θορύβων δημιουργούσε άλλωστε ένα ηχητικό τοπίο πολύ πιο «διάφανο» από την ηχητική «ομίχλη» στην οποία είμαστε συνηθισμένοι σήμερα. Ακόμα και σε καιρούς πολέμου ο Πρίμο Λέβι, το 1945, αναφέρει πως άκουγε από το Άουσβιτς την προέλαση των Ρωσικών στρατευμάτων που πλησίαζαν προς το στρατόπεδο εκατό χιλιόμετρα μακριά [28].

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, εν κατακλείδι μπορεί να υποστηριχθεί πως οι άνθρωποι της εποχής του 1821 στηρίζονταν πολύ στον ήχο για την μεταξύ τους επικοινωνία. Αν και δεν διέθεταν τα σημερινά μέσα τηλεπικοινωνίας, το ηχητικό τοπίο τους επέτρεπε να πληροφορούνται για συμβάντα πολύ μακρινά για τα δικά μας δεδομένα. Η διάδοση του ήχου έδινε ενότητα και συνοχή στον γεωγραφικό χώρο, αντισταθμίζοντας την τεχνολογική υστέρηση.

## Αναφορές

- [1] Τρικούπης, Σπυρίδων, *Ιστορία της Ελληνικής Επανάστασης*, Λιβάνης, Αθήνα (1993), Τόμος Α, σελ. 152
- [2] Dakin, Douglas, *Ο αγώνας των Ελλήνων για την ανεξαρτησία 1821-1833*, ΜΙΕΤ, Αθήνα (2010), σελ. 101. Τρικούπης, ο.π. Τόμος Α, σελ. 242.
- [3] Παπαγεωργίου, Ηλίας, Παπαγεωργίου Φώτης, «Ομηρικοί ήχοι, Καταγραφή, ταξινόμηση και σύγκριση των ηχητικών φαινομένων που περιγράφονται στην Ιλιάδα και την Οδύσεια», in *Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Συνεδρίου Ακουστικής*, Πάτρα (2018)
- [4] Φωτιάδης, Δημήτρης, *Καραϊσκάκης, Ζαχαρόπουλος*, Αθήνα (1995), σελ. 183.
- [5] Κολοκοτρώνης, Θεόδωρος, *Διήγησις συμβάντων της ελληνικής φυλής από το 1770 έως τα 1836*, Η Καθημερινή, Αθήνα (2020), σελ. 120
- [6] Finlay, George, *Ιστορία της Ελληνικής Επανάστασης [1861]*, Το Βήμα, Αθήνα (2021), Τόμος Γ, σελ. 72
- [7] Τρικούπης, ο.π. Τόμος Α, σελ. 509
- [8] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ. 106
- [9] Finlay, ο.π. Τόμος Γ, σελ. 279
- [10] Τρικούπης, ο.π. Τόμος Β. σελ. 199 και Τόμος Α, σελ. 526
- [11] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ. 200
- [12] Μαργαρίτης, Γιώργος, *Η υπεράσπιση της Ελεύθερης Ελλάδας 1828-1827*, Διόπτρα, Αθήνα (2021), σελ. 203
- [13] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ. 184
- [14] Λιερός, Γιώργος, Λυκουργιώτης, Σωτήρης, Λαπιέρης, Σωτήρης, *Η Επανάσταση του 1821. Κοινωνικές συγκρούσεις, πολιτικοί ανταγωνισμοί. Επίκαιρα συμπεράσματα*, Εντοπία, Αθήνα (2022), σελ. 51
- [15] Τρικούπης ο.π. Τόμος Α, σελ. 210
- [16] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ.186
- [17] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ.202
- [18] Τρικούπης ο.π. Τόμος Α, σελ. 557
- [19] Κολοκοτρώνης, ο.π. σελ.214
- [20] Τσινίκας, Νίκος, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη (2005), σελ. 112
- [21] Τρικούπης, ο.π. Τόμος 2, σελ. 413
- [22] Σπυρομήλιου, *Απομνημονεύματα της Δευτέρας Πολιορκίας του Μεσολλογίου, 1825-1826*, Έκδοσις υπό Ι. Βλαχογιάννη, Αθήναι (1925), σελ. 137. Βλ και: Μπουκάλας, Παντελής, «Το Μεσολόγγι και η αυτοθυσία σαν ‘πανήγυρις’», in *Η Καθημερινή, Τέχνες και Γράμματα*, 10 Απριλίου 2022, σελ. 6
- [23] Μαργαρίτης, ο.π. σελ. 257
- [24] Σολωμός, Διονύσιος, *Η γυναίκα της Ζάκυνθος*, ΜΙΕΤ, Αθήνα σελ. 65,77
- [25] Κασομούλη, Νικολάου, *Ενθυμήματα στρατιωτικά της επανάστασης των Ελλήνων 1821-1833*, Αθήνα (1941), Τόμος Β, σελ. 670.
- [26] Κούμα Κ, Μ, *Ιστορία των ανθρώπινων πράξεων από των αρχαιοτάτων χρόνων έως των ημερών μας*, Εκ της τυπογραφίας Αντωνίου Λυκούλου, Βιέννη (1831), Τόμος 10, σελ. 246
- [27] Τζανακάρης, Βασίλης, *Οι Λήσταρχοι*, Μεταίχμιο, Αθήνα (2014), σελ.82

[28] Λέβι, Πρίμο, *Εάν αυτό είναι ο άνθρωπος*, Άγρα, (2007), σελ. 170, 184

## **Ιδιάζουσες περιπτώσεις δυσκολίας των ελληνόφωνων κλασικών τραγουδιστών στη λυρική άρθρωση της γαλλικής γλώσσας: μια προκαταρκτική ακουστική και συγκριτική μελέτη.**

Γεώργιος Παπαδημητρίου  
Κλασικός τραγουδιστής - υποψήφιος διδάκτορας τμήματος μουσικών σπουδών ΕΚΠΑ,  
Μαραθωνοδρόμου 53, 15124, Μαρούσι, Αθήνα, geo2pap@yahoo.gr, 6978908611.  
Αναστασία Γεωργιάκη  
Καθηγήτρια τμήματος μουσικών σπουδών ΕΚΠΑ, Τήνου 86, 11362, Αθήνα, georgaki@music.uoa.gr,  
6972073014.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το τραγούδι σε μια ξένη γλώσσα μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική πρόκληση για έναν τραγουδιστή. Οι φωνηεντικοί ήχοι που δεν απαντώνται στην μητρική του γλώσσα είναι συνήθως η πιο συχνή «παγίδα» να ακουστεί κάποιος σαν ξένος, ενώ η εσφαλμένη παραγωγή τέτοιων φωνημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά ζητήματα καταληπτότητας. Στην παρούσα προκαταρκτική μελέτη εξετάζεται ο βαθμός κατά τον οποίο η ουσιαστική γνώση της ξένης γλώσσας βοηθά στην αυθεντικότερη αποτύπωση των ξενικών - προς την ελληνική γλώσσα - φωνηεντικών ήχων στο τραγούδι. Για το σκοπό αυτό, ελληνόφωνοι κλασικοί τραγουδιστές παρείχαν ηχητικά αποσπάσματα από το στάνταρ γαλλόφωνο ρεπερτόριο της φωνής τους. Η ανάλυση των *Formants* έδειξε σε ποιες ιδιάζουσες περιπτώσεις εντοπίζεται διαφορά. Όπως ήταν αναμενόμενο, το γενικό συμπέρασμα είναι πως η ουσιαστική γνώση της ξένης γλώσσας βοηθά στη σωστότερη εκφορά του ξενόγλωσσου τραγουδιστού κειμένου. Τα αποτελέσματα του πειράματος παρέχουν επιπρόσθετες πληροφορίες για την αναγκαιότητα της διδασκαλίας των ξένων γλωσσών στους λυρικούς τραγουδιστές, ενώ υποδεικνύουν την επιτακτικότητα της εισαγωγής του μαθήματος της «λυρικής άρθρωσης» στα ελληνικά ακαδημαϊκά ή ωδειακά προγράμματα σπουδών.

## ***Special cases of difficulty of greek-speaking classical singers on lyric diction of the French language: a preliminary acoustic and comparative study.***

### **ABSTRACT**

*Singing in a foreign language can pose an important challenge to a singer. Vowel sounds that do not exist in one's native tongue are usually the most frequent "trap" for somebody to sound foreign, while the erroneous production of such phonemes might lead to crucial intelligibility issues. In this preliminary study, it is examined to which degree the substantial knowledge of the foreign language assists with the more authentic depiction of the foreign - to the Greek language - vowel sounds in singing. To this end, native Greek-speaking classical singers provided audio excerpts from the standard French-language repertoire of their voice type. Formant analysis revealed in which special cases lie the differences. As expected, the general conclusion is that the substantial knowledge of a foreign language assists in better pronunciation delivery of the foreign-language sung text. The study results provide additional information in regards to the necessity for a classical singer to study foreign languages, while imply the imperativeness of introduction of "lyric diction" courses in the Greek university or conservatory programs of study.*

### **Εισαγωγή - State of the Art**

Οι τραγουδιστές της όπερας καλούνται συχνά να τραγουδήσουν σε μια ξένη γλώσσα που διαφέρει φωνολογικά από τη μητρική τους. Στο κλασικό τραγούδι απαιτείται επίσης μια συγκεκριμένη τοποθέτηση της φωνής (*singer's formant*) η οποία συχνά θέτει σε συμβιβασμό την ακριβή άρθρωση των τραγουδισμένων λέξεων [1], ζήτημα που οξύνεται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση που ο τραγουδιστής δεν κατέχει αρκετά καλά την ξένη γλώσσα φωνολογικά και σημασιολογικά. Ως επακόλουθο, παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις στον τρόπο εκφοράς των φωνηέντων μεταξύ

ομιλούσας και άδουσας φωνής, στη μητρική αλλά και στην ξένη γλώσσα, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ζητήματα καταληπτότητας του τραγουδιστού μουσικού κειμένου. Προχωρώντας την όλη αυτή «τραγουδιστική συνθήκη» ένα βήμα παρακάτω αναγνωρίζουμε πως το τραγούδι σε μια ξένη γλώσσα αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τον ερμηνευτή.

Η λυρική άρθρωση στην ξένη γλώσσα είναι ένας διεπιστημονικός κλάδος μελέτης. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνει τη μελέτη της προσωδίας, τη μουσική εκτέλεση, τη διδακτική του λυρικού τραγουδιού, και την εκμάθηση ξένων γλωσσών. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας του ζητήματος είναι λίγες οι σύγχρονες μελέτες που έχουν επισημάνει ουσιαστικά το πρόβλημα της αξιολόγησης της προφοράς στο τραγούδι. Στον ίδιο ερευνητικό άξονα διάφοροι ερευνητές έχουν προσπαθήσει να διαλευκάνουν το ζήτημα σε άλλες γλώσσες (π.χ. για τα Πορτογαλικά Βραζιλίας [2]), ρίχνοντας φως σε ζητήματα όπως: «Πόσο κατανοητή είναι η προφορά των αλλοδαπών τραγουδιστών», «ποια είναι τα βασικά προβλήματα προφοράς που επηρεάζουν την καταληπτότητα στο τραγούδι» και «ποια είναι η συμμετοχή και η εφαρμογή αυτών στην διδασκαλία της λυρικής άρθρωσης». Μια από τις πιο σημαντικές μελέτες είναι η μελέτη των Cornaz et al. (2010) για την ανάπτυξη μιας πρωτότυπης μεθόδου διδασκαλίας, εκμάθησης και αξιολόγησης με μαθήματα «διορθωτικής φωνολογίας» στην γαλλική γλώσσα υποστηριζόμενη από λογοθεραπευτές, φιλολόγους και τραγουδιστές [3].

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να ερευνηθεί κατά πόσο η ουσιαστική γνώση της ξένης γλώσσας — η οποία επιτυγχάνεται τόσο μέσω της εκπαίδευσης, της καθημερινής ζωής σε ξενόγλωσσο περιβάλλον, αλλά και της επαγγελματικής τριβής — βοηθά έναν ελληνόφωνο κλασικό τραγουδιστή να αντιμετωπίσει, στον βαθμό που του αναλογεί, ζητήματα σωστής εκφοράς του ξενόγλωσσου μουσικού κειμένου ώστε να καταφέρει να τραγουδήσει με πιο αυθεντικό τρόπο σε αυτήν σε διάφορα ρετζίστρα. Για τον σκοπό αυτό, επικεντρωθήκαμε σε τέσσερις περιπτώσεις φωνηεντικών ήχων που δυσκολεύουν ιδιαίτερα τους ελληνόφωνους τραγουδιστές: /ã/, /y/, /ə/, /e/ (σύμβολα με βάση το Διεθνές Φωνητικό Αλφάβητο, IPA), φωνημάτων δηλαδή που δεν υπάρχουν στην Ελληνική γλώσσα. Σημειωτέον, η γαλλική γλώσσα, που περιλαμβάνει συνολικά 16 φωνηεντικούς ήχους και επιπλέον 3 ημίφωνα [4] — σε αντίθεση με την ελληνική που περιλαμβάνει μόνο 5 καθαρούς φωνηεντικούς ήχους — περιέχει αμέτρητα παραδείγματα των προαναφερθέντων φωνημάτων, για αυτό και επελέγη σαν γλώσσα μελέτης.

## 1. Πειραματική Διαδικασία

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας 16 ελληνόφωνοι επαγγελματίες λυρικοί τραγουδιστές χωρίστηκαν σε δυο ομάδες με βάση τα στοιχεία που παρείχαν οι ίδιοι σχετικά με το επίπεδο γνώσης που είχαν στη γαλλική γλώσσα. Έτσι προέκυψαν 8 μη-φυσικοί ομιλητές και 8 μη-ομιλητές της ξένης γλώσσας. Η κατηγορία των φωνών τους (Fach) είναι αυτή της χαμηλής ανδρικής φωνής, δηλαδή μπάσοι, βαρύτονοι και μασοβαρύτονοι. Στην συγκεκριμένη έρευνα θεωρήθηκε πως η πιο κατάλληλη προσέγγιση ήταν να ζητήσουμε από τους συμμετέχοντες να τραγουδήσουν αποσπάσματα από το στάνταρ ρεπερτόριο της φωνής τους, από τα οποία οι ερευνητές στη συνέχεια θα απομόνωναν φωνήεντα σε ένα τυπικό / αναμενόμενο συλλαβικό συγκείμενο όπως αυτό απαντάται ακριβώς στην κλασική φωνητική μουσική ανθολογία. Η προσέγγιση αυτή θεωρήθηκε περισσότερο αντιπροσωπευτική της «πραγματικής επαγγελματικής ζωής» απ' ό,τι η καταγραφή και μελέτη φωνηέντων σε απομόνωση. Η έρευνα δεν αποτέλεσε μια εξέταση γλωσσομάθειας. Στους συμμετέχοντες ζητήθηκε να τραγουδήσουν αποσπάσματα που τους είχαν κοινοποιηθεί εκ των προτέρων (10-15 μέρες πριν), δίνοντάς τους εύλογο χρονικό διάστημα να προετοιμαστούν για την ηχογράφιση με τον τρόπο που οι ίδιοι θεώρησαν ότι είναι ο καλύτερος. Κανένας από τους συμμετέχοντες δεν έχει δηλώσει κάποια πάθηση στη φωνή ή στην ακοή του, ενώ οι ηλικίες τους κυμαίνονται από 26 έως 54. Όλοι οι συμμετέχοντες είχαν τουλάχιστον 2 χρόνια επαγγελματικής εμπειρίας ως κλασικοί τραγουδιστές και όλοι είχαν ένα παρόμοιο ελάχιστο εκπαιδευτικό υπόβαθρο (διπλωματούχοι κλασικού τραγουδιού από ελληνικό ωδείο). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι 10 από τους 16 συνολικά συμμετέχοντες δεν ήξεραν να διαβάζουν το ΔΦΑ (IPA).

Οι συμμετέχοντες ηχογράφησαν σε στούντιο την τραγουδιστή μελωδική γραμμή από αποσπάσματα κομματιών του στάνταρ ρεπερτορίου της φωνής τους (άριες και Lieder), χωρίς μουσική συνοδεία, χρησιμοποιώντας τον M1 μηχανισμό φώνησης. Τα αποσπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

1. La nuit sur le grand mystère, entr' ouvre ses écrins bleus – *Nocturne* (G. Fauré), μέτρα 1-5
2. On voit ses ombres dormantes, S'éclairer, à tous moments – *Nocturne* (G. Fauré), μέτρα 15-19
3. N'a pour charme et pour clarté, Qu'une fleur, et qu'une étoile – *Nocturne* (G. Fauré), μέτρα 34-37
4. Qu'un mot, peut rendre malheureux, hélas – Quand la flamme de l'amour [Ralph], *La jolie fille de Perth* (G. Bizet), μέτρα 29-30
5. Où brille l'ardent métal – Le veau d'or [Méphistophélès], *Faust* (Ch. Gounod), μέτρα 32-35

6. A l'amant qui vous implore, pourquoi refuser, un si doux baiser – Vous qui faites l'endormie [Méphistophélès], *Faust* (Ch. Gounod), μέτρα 33-36 (από την έναρξη της 1ης στροφής)

Η θεμελιώδης συχνότητα (F0) των συλλαβών που απομονώθηκαν για την μελέτη των φωνηεντικών ήχων σε συνδυασμό με το συμφωνικό περιβάλλον που προηγούταν αυτών κυμαίνονται στη μεσαία περιοχή της «χαμηλής ανδρικής φωνής» [5] και συγκεκριμένα από Mi b έως Σι της 3<sup>ης</sup> οκτάβας (155,56-246,94 Hz). Σκόπιμα επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθούν κομμάτια με ακραία συναισθηματική φόρτιση ή κομμάτια που περιλαμβάνουν νότες σε ακραίες περιοχές (πολύ χαμηλές ή πολύ ψηλές νότες), καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται ούτως ή άλλως, σε κάποιο βαθμό, αποδόμηση του φωνήεντος και απώλεια της καθαρότητάς του. [6]

Η διάρκεια της κάθε εξεταζόμενης συλλαβής ήταν από (τουλάχιστον) 0,8 έως 3 δευτερόλεπτα. Οι ηχογραφήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας ένα πυκνωτικό μικρόφωνο Neumann KM 184 κάνοντας χρήση ενός προενισχυτή 'HV-3 Millennia Media' και κονβέρτορα RME (μοντέλο: ADI-8DS). Το συγκεκριμένο μικρόφωνο προτιμήθηκε σε σχέση με τα υπόλοιπα (Neumann TLM 103 και RODE NT 1000) που ήταν διαθέσιμα στο στούντιο ηχογράφησης (Στούντιο LabMAT του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής και Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του ΕΚΠΑ), καθώς από προκαταρκτικές δοκιμές που διεξήχθησαν αυτό αποτύπωνε πιο ομαλά – με λιγότερες διακυμάνσεις – τα Formants της άδουσας φωνής. Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε απόσταση 50 εκατοστών και σε γωνία 20 μοιρών από τα χείλη του τραγουδιστή, ο οποίος παρέμενε όρθιος και όσο το δυνατόν ακίνητος κατά τη διάρκεια της ηχογράφησης. Η ηχογράφηση έλαβε χώρα σε ένα ακουστικά προσεγμένο κλειστό χώρο (acoustically treated room), και τα δείγματα ηχογραφήθηκαν ψηφιακά σε sampling rate 48 kHz και 24 bit κάνοντας χρήση του λογισμικού CUBASE. Τέλος, στην ηχογράφηση καταγράφηκε επίσης η εκφορά των εν λόγω αποσπασμάτων (ποιητικών κειμένων) και σε ομιλούσα φωνή, για μελλοντική συγκριτική ανάλυση.

## 2. Ανάλυση

Οι ηχογραφήσεις αναλύθηκαν με το λογισμικό Praat. Οι φωνηεντικοί ήχοι υπό μελέτη απομονώθηκαν σε κάθε περίπτωση όπου κάποιος διαφορετικός συμφωνικός ήχος προηγούταν (όπως αυτοί εντοπίστηκαν στα αποσπάσματα που επιλέχθηκαν για ηχογράφηση), τα φασματογραφήματα αυτών αποτυπώθηκαν και τα δυο πρώτα Formants του κάθε φωνηεντικού ήχου καταγράφηκαν, μαζί με την θεμελιώδη συχνότητα στην οποία αυτά παράχθηκαν.

Οι τιμές των Formants για τις τέσσερις ιδιάζουσες περιπτώσεις φωνηεντικών ήχων (/ā/, /y/, /ə/, /e/) αναλύθηκαν στο SPSS για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Στην κάθε περίπτωση, η μεταβλητή «Κατηγορία Ομιλητή» παίρνει δυο τιμές: “Μη-Φυσικός Ομιλητής” και “Μη-Ομιλητής” της γαλλικής (ξένης) γλώσσας. Τα «Συμφωνικά Περιβάλλοντα» που προηγούνται του κάθε φωνηεντικού ήχου υπό εξέταση διαφέρουν και περιγράφονται αναλυτικά στις αντίστοιχες παραγράφους που ακολουθούν.

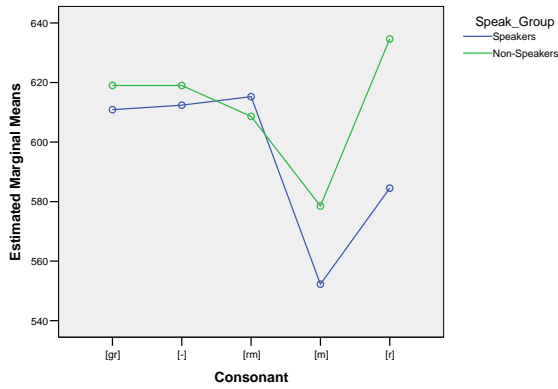
### 2.1. Φωνηεντικός ήχος /ā/

Για την ανάλυση της επίδρασης της Κατηγορίας Ομιλητή και του Συμφωνικού Περιβάλλοντος που προηγούταν του φωνήεντος /ā/ στις τιμές του F1, F2 αλλά και της διαφοράς F2-F1 διενεργήθηκε ξεχωριστά για κάθε Formant μια two-way ANOVA. Το Συμφωνικό Περιβάλλον για το φωνήεν /ā/ περιλαμβάνει τους παρακάτω συνδυασμούς: το συμφωνικό σύμπλεγμα /gr/, το «γυμνό» φωνήεν /-/, το σύμπλεγμα /tm/, το /m/, και το /t/, όπως αυτοί προέκυψαν από τα αποσπάσματα που ηχογραφήθηκαν.

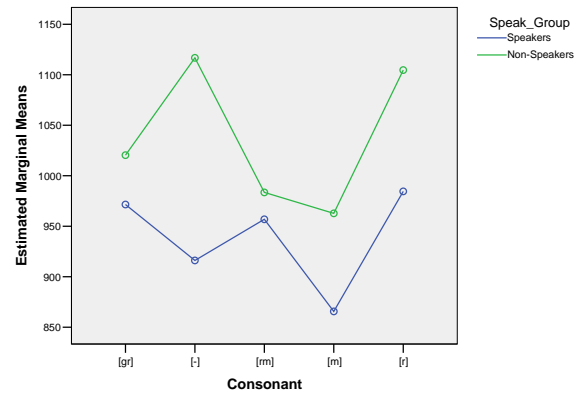
Από την ανάλυση διακύμανσης (Πίνακας 2.1) προέκυψε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p$ -value < .05) στις τιμές του F2 για τη βασική μεταβλητή «Κατηγορία Ομιλητή»,  $F(1, 70) = 9.354$ ,  $p = .003$ . Εξετάζοντας τις μέσες τιμές του F2 στις δύο Κατηγορίες Ομιλητή παρατηρείται ότι οι Μη-Φυσικοί Ομιλητές κατέγραψαν χαμηλότερη μέση τιμή ( $M = 939$ ,  $SD = 100$ ) σε σχέση με τους Μη-Ομιλητές ( $M = 1038$ ,  $SD = 182,5$ ). Ανάλογη και αναμενόμενη είναι και η περίπτωση της διαφοράς των τιμών F2-F1 για την «Κατηγορία Ομιλητή»,  $F(1, 70) = 6.776$ ,  $p = .011$ .

Πίνακας 2.1 Συνοπτικά αποτελέσματα two-way Anova στα Formants του /ā/

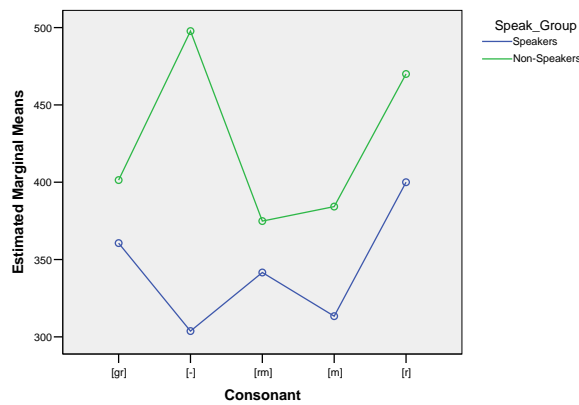
/ā/	F1		F2		F2-F1	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Κατηγορία Ομιλητή	1,047	0,303	9,354	0,003	6,776	0,011
Σύμφωνο	1,388	0,247	1,89	0,122	0,97	0,429
Αλληλεπίδραση Μεταβλητών	0,363	0,834	0,89	0,475	0,856	0,495



Σχήμα 2.1.1 Μέσες τιμές F1 για /ǣ/



Σχήμα 2.1.2 Μέσες τιμές F2 για /ǣ/



Σχήμα 2.1.3 Μέσες τιμές F2-F1 για /ǣ/

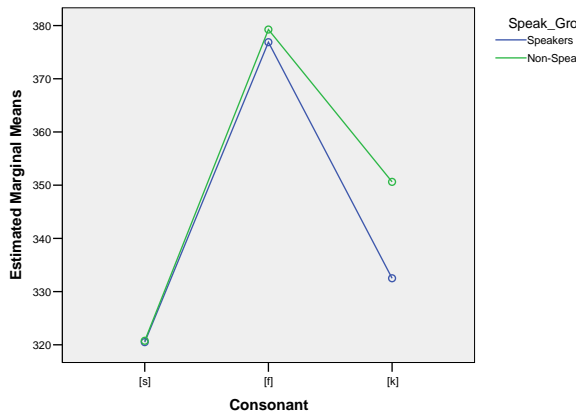
## 2.2. Φωνηεντικός ήχος /y/

Για την ανάλυση της επίδρασης της Κατηγορίας Ομιλητή και του Συμφωνικού Περιβάλλοντος που προηγούταν του φωνήεντος /y/ στις τιμές του F1, F2 αλλά και της διαφοράς F2-F1 διενεργήθηκε ξεχωριστά για κάθε Formant μια two-way ANOVA. Το Συμφωνικό Περιβάλλον για το φωνήεν /y/ περιλαμβάνει τους παρακάτω συνδυασμούς: /s/, /k/, /f/, όπως αυτοί προέκυψαν από τα αποσπάσματα που ηχογραφήθηκαν.

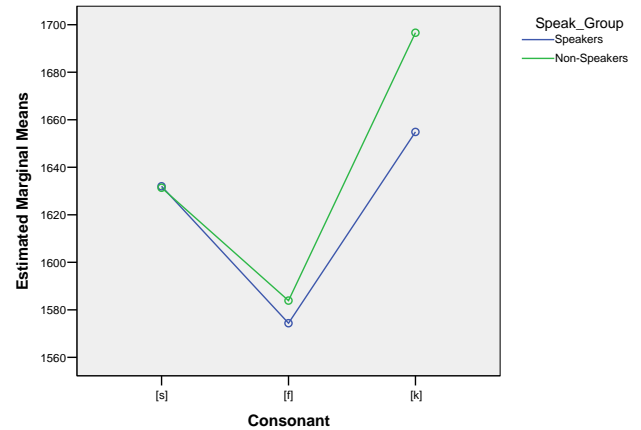
Από την ανάλυση διακύμανσης (Πίνακας 2.2) προέκυψε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p\text{-value} < .05$ ) στις τιμές του F1 για τη βασική μεταβλητή του Συμφωνικού Περιβάλλοντος,  $F(2, 42) = 4.929, p = .012$ . Η Post-Hoc ανάλυση (συγκρίσεις μέσω τιμών κατά ζεύγη) με το κριτήριο του Scheffe έδειξε πως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των F1 που προέκυψαν με το σύμφωνο /s/ και /f/ ( $p = .013$ ). Πιο αναλυτικά, το προπορευόμενο σύμφωνο /s/ οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές ( $M = 321, SD = 17,8$ ) απ' ό,τι το προπορευόμενο σύμφωνο /f/ ( $M = 377, SD = 48,5$ ).

Πίνακας 2.2 Συνοπτικά αποτελέσματα two-way Anova στα Formants του /y/

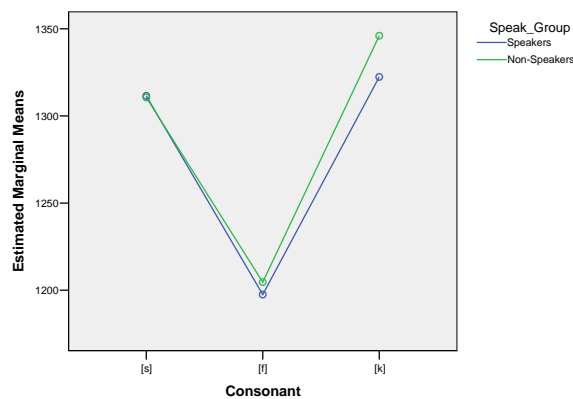
/y/	F1		F2		F2-F1	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Κατηγορία Ομιλητή	0,209	0,65	0,132	0,718	0,037	0,848
Σύμφωνο	4,929	0,012	1,45	0,246	2,533	0,092
Αλληλεπίδραση Μεταβλητών	0,137	0,871	0,076	0,927	0,02	0,981



Σχήμα 2.2.1 Μέσες τιμές F1 για /y/



Σχήμα 2.2.2 Μέσες τιμές F2 για /y/



Σχήμα 2.2.3 Μέσες τιμές F2-F1 για /y/

### 2.3. Φωνηεντικός ήχος /ə/

Για την ανάλυση της επίδρασης της Κατηγορίας Ομιλητή και του Συμφωνικού Περιβάλλοντος που προηγούταν του φωνήεντος /ə/ στις τιμές του F1, F2 αλλά και της διαφοράς F2-F1 διενεργήθηκε ξεχωριστά για κάθε Formant μια two-way ANOVA. Το Συμφωνικό Περιβάλλον για το φωνηεντικό ήχο /ə/ περιλαμβάνει τους παρακάτω συνδυασμούς: /r/, /n/, /l/, /t/, /j/, όπως αυτοί προέκυψαν από τα αποσπάσματα που ηχογραφήθηκαν.

Από την ανάλυση διακύμανσης (Πίνακας 2.3) προέκυψε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p$ -value < .05) στις τιμές του F1 για τη βασική μεταβλητή του Συμφωνικού Περιβάλλοντος,  $F(4, 70) = 18.339$ ,  $p = .000$ . Περαιτέρω συγκρίσεις των μέσων τιμών κατά ζεύγη (Post-Hoc) με το κριτήριο του Scheffe έδειξαν πως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των F1 σε έξι περιπτώσεις:

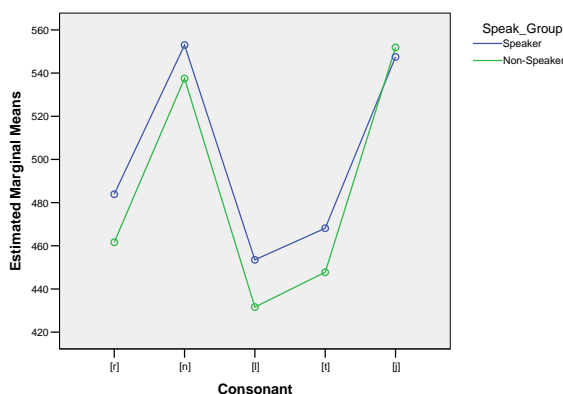
1. μεταξύ των συμφώνων /r/ και /n/ ( $p = .002$ ),
2. μεταξύ του συμφώνου /r/ και του ημιφώνου /j/ ( $p = .001$ ),
3. μεταξύ των συμφώνων /n/ και /l/ ( $p = .000$ ),
4. μεταξύ των συμφώνων /n/ και /t/ ( $p = .000$ ),
5. μεταξύ του συμφώνου /l/ και του ημιφώνου /j/ ( $p = .000$ ),
6. μεταξύ του ημιφώνου /j/ και του συμφώνου /t/ ( $p = .000$ ).

Για τις τιμές του F2 η two-way ANOVA έδειξε πως η βασική μεταβλητή της Κατηγορίας Ομιλητή οδήγησε σε στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές του F2,  $F(1, 70) = 10.628$ ,  $p = .002$ , κάτι που αναπόφευκτα οδήγησε σε στατιστικά σημαντική διαφορά και στις τιμές F2-F1,  $F(1, 70) = 12.958$ ,  $p = .001$ . Εξετάζοντας τις μέσες τιμές του F2 στις δύο Κατηγορίες Ομιλητή παρατηρούμε ότι οι Μη-Φυσικοί Ομιλητές κατέγραψαν μια χαμηλότερη μέση τιμή ( $M = 1241$ ,  $SD = 113,4$ ) σε σχέση με τους Μη-Ομιλητές ( $M = 1328$ ,  $SD = 126,8$ ).

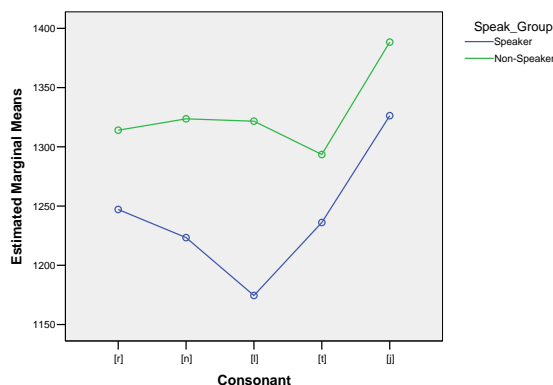


Πίνακας 2.3 Συνοπτικά αποτελέσματα two-way Άνονα στα Formants του /ə/

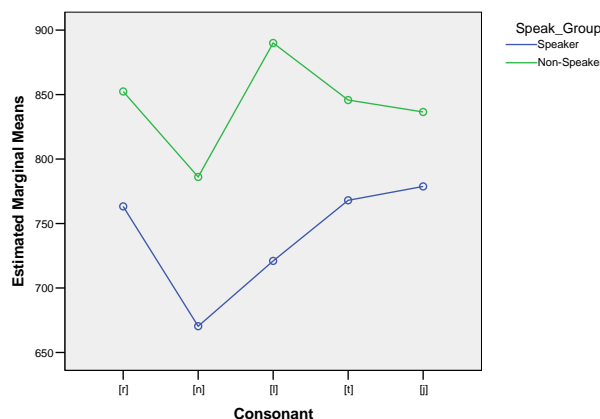
/ə/	F1		F2		F2-F1	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Κατηγορία Ομιλητή	2,072	0,155	10,628	0,002	12,958	0,001
Σύμφωνο	18,339	0,000	2,02	0,101	1,238	0,303
Αλληλεπίδραση Μεταβλητών	0,228	0,922	0,402	0,807	0,461	0,764



Σχήμα 2.3.1 Μέσες τιμές F1 για /ə/



Σχήμα 2.3.2 Μέσες τιμές F2 για /ə/



Σχήμα 2.3.3 Μέσες τιμές F2-F1 για /ə/

#### 2.4. Φωνηεντικός ήχος /e/

Για την ανάλυση της επίδρασης της Κατηγορίας Ομιλητή και του Συμφωνικού Περιβάλλοντος που προηγούταν του φωνήεντος /e/ στις τιμές του F1, F2 αλλά και της διαφοράς F2-F1 διενεργήθηκε ξεχωριστά για κάθε Formant μια two-way ANOVA. Το Συμφωνικό Περιβάλλον για το φωνήεν /e/ περιλαμβάνει τους παρακάτω συνδυασμούς: /rt/, /s/, /r/, /-/, /m/, /z/, όπως αυτοί προέκυψαν από τα αποσπάσματα που ηχογραφήθηκαν.

Από την ανάλυση διακύμανσης προέκυψε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ( $p$ -value < .05) στις τιμές του F1 για τη βασική μεταβλητή του Συμφωνικού Περιβάλλοντος,  $F(5, 84) = 11.285$ ,  $p = .000$ . Περαιτέρω συγκρίσεις των μέσων τιμών κατά ζεύγη (Post-Hoc) με το κριτήριο του Scheffe έδειξε πως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές των F1 σε πέντε περιπτώσεις:

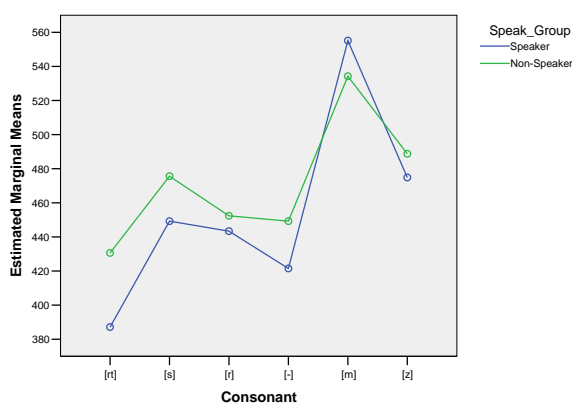
1. μεταξύ των συμφώνων /rt/ και /m/ ( $p = .000$ ),
2. μεταξύ των συμφώνων /rt/ και /z/ ( $p = .024$ ),
3. μεταξύ των συμφώνων /s/ και /m/ ( $p = .007$ ),
4. μεταξύ των συμφώνων /r/ και /m/ ( $p = .001$ ),
5. μεταξύ του «γυμνού» φωνήεντος /-/ και του συμφώνου /m/ ( $p = .000$ ).

Στη διαφορά των τιμών F2-F1 εντοπίστηκε στατιστικά σημαντική διαφορά για βασική μεταβλητή του Συμφωνικού Περιβάλλοντος,  $F(5, 84) = 2.853$ ,  $p = .020$ . Περαιτέρω συγκρίσεις των μέσων τιμών

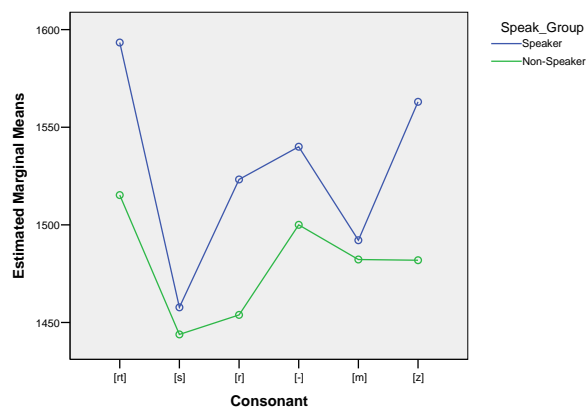
κατά ζεύγη (Post-Hoc) με το κριτήριο του Scheffe έδειξε πως υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές των F2-F1 που προέκυψαν μεταξύ των συμφωνικών συνδυασμών /rt/ και /m/ ( $p = .050$ ).

Πίνακας 2.4 Συνοπτικά αποτελέσματα two-way Anova στα Formants του /e/

/e/	F1		F2		F2-F1	
	F	p-value	F	p-value	F	p-value
Κατηγορία Ομιλητή	2,132	0,148	3,138	0,080	3,613	0,61
Σύμφωνο	11,285	0,000	1,141	0,345	2,853	0,020
Αλληλεπίδραση Μεταβλητών	0,622	0,683	0,226	0,95	0,301	0,911

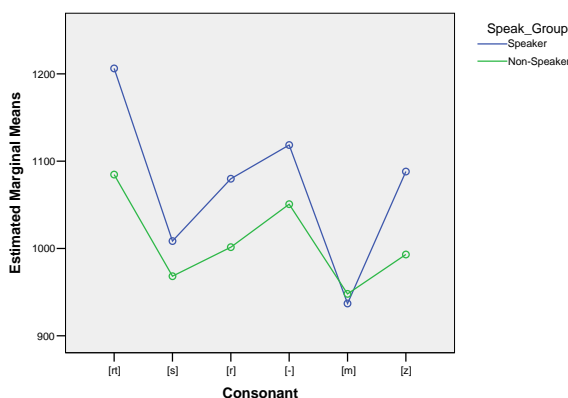


Σχήμα 2.4.1 Μέσες τιμές F1 για /e/



Σχήμα 2.4.2 Μέσες τιμές F2 για /e/

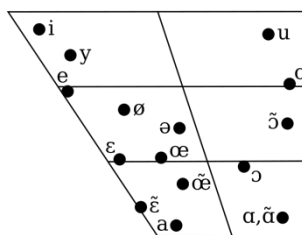
Estimated Marginal Means of F2\_F1



Σχήμα 2.4.3 Μέσες τιμές F2-F1 για /e/

### 3. Συμπεράσματα

Η στατιστική ανάλυση φανέρωσε πως η ουσιαστική γνώση της ξένης γλώσσας οδήγησε σε σημαντική διαφορά μόνο στις τιμές του F2 για τις δυο ομάδες ομιλητών στις περιπτώσεις του /ã/ και του /ə/. Αυτό αναπόφευκτα επέφερε και μια αισθητή διαφορά στις τιμές του F2-F1 για τις περιπτώσεις που αναφέραμε. Από τις δυο κατηγορίες ομιλητών, οι Μη-Ομιλητές κατέγραψαν υψηλότερη μέση τιμή F2 στο φωνήεν /ə/ και /ã/ από τους Μη-Φυσικούς Ομιλητές, με μια μέση διαφορά της τάξης των 87 και 99 Hz αντίστοιχα. Κρίνοντας από το φωνηεντικό διάγραμμα των Collins & Mees (Σχήμα 3.1) [7] παρατηρούμε πως οι αυξημένες αυτές τιμές του F2 συνάδουν περισσότερο με τις αναμενόμενες τιμές του F2 για το φωνήεν /ε/ και /a/ αντίστοιχα. Αυτό υποδηλώνει πως οι Μη-Ομιλητές δεν αντιλαμβάνονται πλήρως τη διαφορά μεταξύ /ε/ και /ə/ και τείνουν να τραγουδούν το /ə/ πιο «μπροστά» [8] σαν /ε/, δηλαδή σαν το φωνηεντικό ήχο που υπάρχει στη μητρική τους γλώσσα. Αντίστοιχα για την περίπτωση του /ã/, οι Μη-Ομιλητές φαίνεται να συγχέουν το /a/ και /ã/ και τείνουν να τραγουδούν το /ã/ πιο «μπροστά» [8] σαν το /a/ που υπάρχει στη μητρική τους γλώσσα.



Σχήμα 3.1 Γράφημα γαλλικών φωνηέντων (Collins & Mees) [7]

Για τις περιπτώσεις των /y/, /ə/, /e/ η στατιστική ανάλυση έδειξε οι ο προϋπάρχων συμφωνικός συνδυασμός επηρεάζει μόνο τις τιμές του F1. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του /y/ το προπορευόμενο /f/ οδήγησε σε υψηλότερες τιμές του F1 σε σχέση με το /s/. Στην περίπτωση του /ə/ το σύμφωνο /n/, αλλά και το ημίφωνο /j/ οδήγησαν σε υψηλότερες τιμές του F1 σε σχέση με το /r/, το /l/, και το /t/. Τέλος, στην περίπτωση του /e/ το προπορευόμενο /m/ εμφανίζεται να οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερες τιμές F1 σε σχέση με τους υπόλοιπους συμφωνικούς συνδυασμούς, δηλαδή το σύμπλεγμα /rt/, το /s/, το /r/, και την περίπτωση όπου δεν προηγείται σύμφωνο /-/. Εξαιρέση αποτελεί το /z/. Σε όλες τις περιπτώσεις υπό μελέτη, οι συγκεκριμένες αυξημένες τιμές του F1 μπορούν να δικαιολογηθούν από το γεγονός ότι οι εν λόγω συλλαβές, /fy-/, /nə-/, /jə -/, /me-/, παράχθηκαν σε τονικό ύψος 220 Hz (Λα 3), 233,09 Hz (Σι b 3), και 246,94 Hz (Σι 3) αντίστοιχα, δηλαδή στην περιοχή του «πρώτου περάσματος» (*primo passaggio*) της χαμηλής ανδρικής φωνής, περιοχή που ο τραγουδιστής ξενικά να ανοίγει περισσότερο την κάτω σιαγόνα και κατ' επέκταση να επιμηκύνει τη γεωμετρία της φωνητικής οδού. [8], [9]. Επομένως, εκτιμάται ότι δεν είναι το συμφωνικό περιβάλλον που έχει επηρεάσει τις αυξημένες τιμές των F1, αλλά το τονικό ύψος των συγκεκριμένων συλλαβών υπό μελέτη.

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με στοιχεία των συμμετεχόντων σχετικά με την ληφθείσα αλλά και την επιθυμητή εκπαίδευσή τους πάνω στη γαλλική γλώσσα. Συγκεκριμένα 1 στους 2 δήλωσε πως η γνώση της ξένης γλώσσας είναι απαραίτητη για την επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης της σωστής ξενόγλωσσας λυρικής άρθρωσης. Από τους γνώστες της γαλλικής γλώσσας 1 στους 2 επίσης θεώρησε πως για τη σωστή προφορά της ξένης γλώσσας δόθηκε λίγη έως καθόλου σημασία στην αίθουσα διδασκαλίας. Επιπλέον, από τα άτομα που δήλωσαν ότι έχουν κάνει μαθήματα γαλλικής λυρικής άρθρωσης μόνο το 12,6 % έκανε τα μαθήματα αυτά μέσα στο πρόγραμμα των μουσικών του σπουδών (πανεπιστήμιο ή ωδείο), ενώ το 85 % των συμμετεχόντων έκριναν απαραίτητη την υποχρεωτικότητα της εισαγωγής (ή της εφαρμογής) του μαθήματος της λυρικής άρθρωσης στα ωδειακά/πανεπιστημιακά προγράμματα σπουδών. Τέλος, όσον αφορά στον τρόπο διδασκαλίας, όλοι οι υπέρμαχοι της χρησιμότητας του μαθήματος της λυρικής άρθρωσης θώρησαν πως θα έπρεπε να εισαχθεί μια ολιστική προσέγγιση του ζητήματος όπου θα δίνεται έμφαση εν πρώτοις στην εκμάθηση γραμματικών κανόνων ανάγνωσης, έπειτα στην εφαρμογή της σωστής προφοράς στην ομιλία και τέλος στο τραγούδι.

#### 4. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό έργο υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «1η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: HFRI-FM17-3832).

#### 5. Αναφορές

- [1] Sundberg, J., Romedahl, C., “Text intelligibility and the singer's formant—a relationship?.” *Journal of Voice*, **23.5**, pp 539-545 (2009)
- [2] Parpinelli, D., Cardoso, W., “Singing in a Foreign Language: Can the Fat Lady Pronounce her Phonemes?”, *Proceedings of the International Symposium on the Acquisition of Second Language Speech* (2014)
- [3] Cornaz, S., Henrich, N., Vallée, N., «L'apport d'exercices en voix chantée pour la correction phonétique en langue étrangère : le cas du français langue étrangère appliqué à des apprenants italiens d'âge adulte», *Cahiers de l'APLIUT*, Vol. XXIX N° 2, pp. 103-119 (2010)
- [4] Adams, D., *A handbook of diction for singers: Italian, German, French*. Oxford University Press (2008)
- [5] Miller D., G., Schutte H., K.: “Toward a Definition of Male ‘Head’ Register, Passaggio, and ‘Cover’ in Western Operatic Singing”. *Folia Phoniatica Logopaedica*, **46**, pp 157-170 (1994)

- [6] Hollien H., Mendes-Schwartz A. P., Nielsen K., “Perceptual confusions of high-pitched sung vowels”, *Journal of Voice*, **Volume 14, Issue 2**, pp 287-298 (2000)
- [7] Collins, B., Mees, I., M. *Practical Phonetics and Phonology: A Resource Book for Students* (3rd ed.), Routledge, pp. 225–226 (2013)
- [8] Sundberg, J., “The acoustics of the singing voice.” *Scientific American* **236.3**, pp 82-91 (1977)
- [9] Miller, R., *Securing baritone, bass-baritone, and bass voices*. pp. 8-9, Oxford University Press (2008)

## **Αυτοματοποιημένη εξέταση ομιλητικής ακοομετρίας στην ελληνική γλώσσα με την χρήση έξυπνων συσκευών**

Νικόλαος  
Στιβακτάκης  
Προπτυχιακός  
φοιτητής  
nikostiv@ece.auth.gr

Ιορδάνης Θωίδης  
Υπ. Διδ. ΑΠΘ  
ithoidis@auth.gr

Γεώργιος  
Παπανικολάου  
Ομ. Καθ. ΑΠΘ  
pap@eng.auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρακάτω εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας εφαρμογής λογισμικού που σκοπό έχει την αυτοματοποιημένη διεξαγωγή δοκιμασιών ομιλητικής ακοομετρίας στην ελληνική γλώσσα. Η διαδικασία της εξέτασης περιλαμβάνει τη χρήση ακατάληπτων μονοσύλλαβων ομιλητικών διεγέρσεων που παράγονται συνθετικά και παρουσιάζονται μέσω τυπικών ακουστικών ή μέσω του ακουστικού βαρηκοΐας που χρησιμοποιεί ο εξεταζόμενος. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου, διεξήχθησαν επαναλαμβανόμενες δοκιμασίες αναγνώρισης ομιλίας σε 10 ακροατές σε καταστάσεις ησυχίας και θορύβου. Η ανάλυση της αξιοπιστίας εξέτασης-επανεξέτασης καθώς και η συγκεντρωτική ανάλυση διακριτικότητας των διεγέρσεων επισημαίνει τους περιορισμούς αλλά και τις πιθανές προεκτάσεις της αυτοματοποιημένης εξέτασης της ομιλητικής ακοομετρίας με έξυπνες συσκευές στην ελληνική γλώσσα.

### ***Automated test of speech audiometry in Greek language with the use of smart devices***

#### **ABSTRACT**

*This study presents the design and development of an automated speech audiometry application in the Greek language. The testing procedure employs algorithmically synthesized nonsense monosyllabic speech stimuli that are presented via commercial earphones or hearing aids. Ten participants repeatedly conducted speech recognition tests in quiet and in noise using the proposed application. Test-retest reliability results and stimulus discernibility analysis indicate the limitations and potential extensions of employing synthetic speech stimuli and mobile devices for conducting automated speech audiometry tests in Greek.*

## Εισαγωγή

Η βαρηκοΐα αποτελεί μια από τις πιο συχνές παθήσεις σε ενήλικες και παιδιά, ακολουθώντας αυξητική τάση, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας [1]. Στην Ελλάδα, η καθιερωμένη διάγνωση των απωλειών ακοής γίνεται με τη χρήση τονικής ακοομετρίας σε συνδυασμό με αντικειμενικές μετρήσεις, όπως η τυμπανομετρία. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι, αν και απαραίτητες στην κλινική διαδικασία, καλύπτουν μόνο ένα μικρό μέρος της ακουστικής αντιληπτικής ικανότητας ενός ακροατή [2].

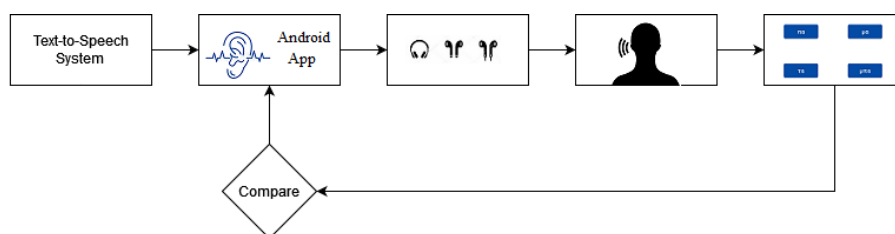
Ένα σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο στην ακοομετρία, είναι η εξέταση της ομιλητικής ακοομετρίας, η οποία προσδιορίζει την ικανότητα ενός ατόμου να αναγνωρίζει σήματα ομιλίας. Η εξέταση βασίζεται στην σύγκριση των ερεθισμάτων του εξεταστού, με τις υποκειμενικές αποκρίσεις του εξεταζόμενου. Η χρήση σημάτων ομιλίας ως ερεθίσματα, μπορεί να αναδείξει την επίτευξη επιτυχούς επικοινωνίας και το προβληματικό πλαίσιο στο οποίο περατώνεται η καθημερινή επικοινωνία των εξεταζόμενων [3].

Ένας συνδυασμός της τονικής ακοομετρίας με την εξέταση της ομιλητικής ακοομετρίας, θα προσέφερε πληροφορίες υψηλής διαγνωστικής αξίας όπως η ανάδειξη ύπαρξης γνωσιακής πάθησης στο κεντρικό ακουστικό σύστημα, και η εκτίμηση της ανάγκης για χορήγηση ακουστικού βαρηκοΐας.

Στην Ελλάδα, η χρήση της ομιλητικής ακοομετρίας δεν είναι διαδεδομένη σε κλινικό επίπεδο, κυρίως λόγω έλλειψης εξειδικευμένου εξοπλισμού και σχετικής τυποποίησης. Οι Τρίμης και συν. (2006) [4] έχουν διεξάγει πληθώρα ερευνών σχετικά με την κατασκευή έγκυρων λιστών λέξεων στην ελληνική γλώσσα, υλοποιώντας λίστες ποικίλων χαρακτηριστικών (Τρίμης και συν., 2012; 2013)[5][6].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη εφαρμογής λογισμικού για φορητές συσκευές, όπου θα πραγματοποιείται αυτοματοποιημένη εξέταση ομιλητικής ακοομετρίας με τη χρήση τυπικών ακουστικών ή μέσω του ακουστικού βαρηκοΐας που χρησιμοποιεί ο εξεταζόμενος. Μέσα από την εξέταση αυτή, δύναται να προσεγγίσουμε το επίπεδο δυσκολίας αναγνώρισης ομιλίας, να ανιχνεύσουμε τυχόν μοτίβα σφαλμάτων, ή και να περατωθεί περιοδική αξιολόγηση της μεθόδου προσαρμογής (fitting) των συσκευών ανίχνευσης.

### 1. Μεθοδολογία και Εφαρμογή



Σχήμα 1. Επισκόπηση υλοποίησης.

### 1.1 Γενικό πλαίσιο

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται εξέταση καταληπτότητας ομιλίας (WRS) σε μη κλινικό περιβάλλον ώστε να αποτελέσει προθάλαμο για την κλινική αξιολόγηση υπερουδικών παθολογιών της ακοής. Για να πετύχουμε έναν έγκυρο προκαταρκτικό έλεγχο, η εξόρυξη πληθώρα δεδομένων για την αξιολόγηση της εγκυρότητας είναι αναγκαία, καθιστώντας την χρήση συνθετικών ομιλητικών διεγέρσεων μια ευέλικτη δίοδο. Επίσης, με την εξέταση απαλλαγμένη από τα αυστηρά όρια των κλινικών περιορισμών, επιλέχθηκαν δοκιμασίες που επηρεάζονται σε μικρό βαθμό από τον παράγοντα της βαθμονόμησης.

Η υλοποίηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε για φορητές συσκευές με λογισμικό Android, ώστε να είναι προσβάσιμη σε ένα αρκετά ευρύ κοινό, με τις διεπαφές της εφαρμογής να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εμπειρία χρήσης να είναι απλή και λιτή. Με το πέρας της εξέτασης, παρέχεται η δυνατότητα να αναλυτικής παρουσίασης των δεδομένων, και ο απευθείας διαμοιρασμός των αποτελεσμάτων με τον ακοολόγο ή τον ακοοπροθετιστή.

### 1.2 Διεγέρσεις

Για την κατασκευή των σύνθετων ηχητικών ερεθισμάτων, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Text-to-Speech<sup>1</sup> (TTS) της Google LLC, και στην συνέχεια έγινε κανονικοποίηση ακουστότητας των λεξιδίων στα -23 Loudness Unit Full Scale (LUFS) μέσω του λογισμικού Audacity.

Τα ηχητικά ερεθίσματα που επιλέχθηκαν, είναι ακατάληπτες μονοσύλλαβες λέξεις, σε μια δοκιμασία κλειστού τύπου, για την βαθμολόγηση φωνημάτων και λέξεων. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση ψευδολέξεων, προσφέρει ανεξαρτησία από το λεξιλόγιο των ακροατών, και συνεπώς δεν περιορίζει το εύρος των εξεταζόμενων. Επίσης, οι ψευδολέξεις τείνουν να κάνουν την εξέταση λιγότερο επιρρεπής σε μεροληψίες σε σύγκριση με τις λέξεις και τις προτάσεις, λόγω των σημαντικά μειωμένων λεξιλογικών και γνωστικών επιδράσεων. Προσφέρεται επίσης τη δυνατότητα για περαιτέρω ανάλυση, όπως η κατηγοριοποίηση των αποκρίσεων του χρήστη ανά φώνημα και ανά συλλαβή.

Οι λίστες που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή, κατασκευάστηκαν από τον Τρίμμη και συν. (2012), και είναι της μορφής (Σύμφωνο-Φωνήεν), ΦΣ και ΣΦΣ. Επίσης πληρούνται τα κριτήρια της φωνημικής ισορροπίας, όπου η συχνότητα εμφάνισης των φωνημάτων σε κάθε λίστα είναι αντιπροσωπευτική της συχνότητας εμφάνισης στην Ελληνική γλώσσα. Ακόμη, για τις δύο λίστες, η κάθε συλλαβή δεν συγχέεται εύκολα με άλλες στην ίδια λίστα, πληρώντας έτσι το κριτήριο της φωνημικής διακριτότητας και της ίσης μέσης δυσκολίας μεταξύ των λιστών.

Οι παραπάνω παράμετροι είναι σημαντικοί για την δοκιμασία διάκρισης της ομιλίας και μπορούν να εφαρμοστούν σε δοκιμασία κλειστού τύπου. Η δυσκολία που προσδίδεται με την χρήση λέξεων που δεν είναι συνυφασμένες με την καθημερινότητα εξομαλύνεται με την επιλογή από ένα πλήθος σωστών αποκρίσεων. Τέλος, η κλειστού τύπου διαδικασία, στην οποία ο χρήστης καλείται να επιλέξει

<sup>1</sup><https://cloud.google.com/text-to-speech>

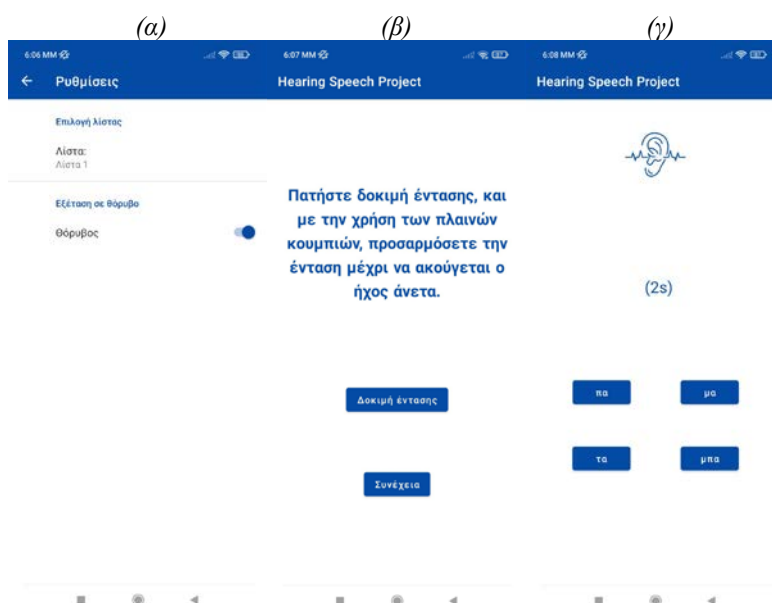
ανάμεσα σε 4 ή 6 πιθανές απαντήσεις κάνει την αυτοματοποιημένη εξέταση λιγότερο χρονοβόρα και πιο εύκολη στους υπολογισμούς και στην εύρεση μοτίβων σφαλμάτων.

### 1.3 Διαδικασία Εξέτασης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται διάφορα στιγμιότυπα της εφαρμογής. Στο Σχήμα 2.α, φαίνεται η διεπαφή των ρυθμίσεων, όπου επιλέγεται η λίστα που θέλουμε να παρουσιαστεί, με ή χωρίς θόρυβο. Ο θόρυβος που παρουσιάζεται είναι ένα τυποποιημένο σήμα στάσιμου θορύβου με σταθμισμένο συχνοτικό φάσμα όμοιο με αυτό της ομιλίας σε λόγο σήματος-προς-θόρυβο 10 dB.

Στο Σχήμα 2.β εμφανίζεται η διεπαφή όπου ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει την ένταση ώστε να πετύχει τη περισσότερο άνετη στάθμη (Most Comfortable Level, MCL), δηλαδή το επίπεδο στο οποίο ο ήχος που ακούγεται κρίνεται από τον ακροατή ως επαρκούς ακουστότητας χωρίς να δημιουργεί αίσθημα δυσφορίας.

Η διεπαφή όπου πραγματοποιείται η αυτοματοποιημένη εξέταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.γ, όπου το κάθε ηχητικό ερέθισμα αναπαράγεται κάθε 5 δευτερόλεπτα, σε τυχαία σειρά σε κάθε εξέταση, ελαττώνοντας έτσι φαινόμενα εκμάθησης. Επίσης, για κάθε αναπαραγωγή ηχητικών ερεθισμάτων, γίνεται τυχαία η θέση της σωστής εκάστοτε απόκρισης, σε ένα από τα 4 φύλλα επιλογής.



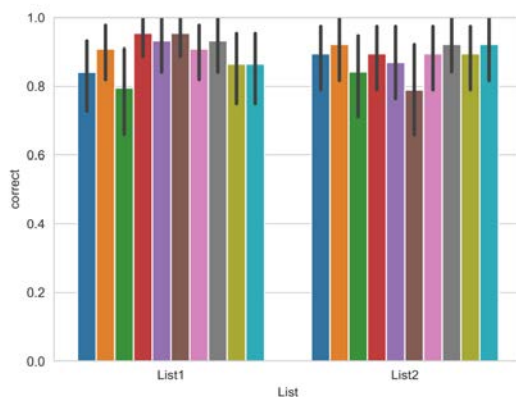
Σχήμα 2. Στιγμιότυπα (α) Διεπαφή ρυθμίσεων, (β) διεπαφή εύρεσης MCL, (γ) διεπαφή αυτοματοποιημένης εξέτασης



#### 1.4 Συμμετέχοντες

Για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων συμμετείχαν 10 άτομα (7 άνδρες, 3 γυναίκες), με τα 9 άτομα να είναι κατά μέσο όρο 27 ετών, και το δέκατο ηλικίας 56 ετών. Τα άτομα που επιλέχθηκαν δεν έχουν ιστορικό απώλειας ακοής και έγιναν 2 μετρήσεις σε διάστημα 3 ημερών με διαφορετική λίστα κάθε φορά. Οι μετρήσεις έγιναν από την ίδια συσκευή (Xiaomi POCO X3 Pro), με τα ίδια ακουστικά για κάθε άτομο, με 4 άτομα να έχουν ακουστικά με ασύρματη σύνδεση, και τα υπόλοιπα 6 άτομα ακουστικά με ενσύρματη σύνδεση.

Οι μετρήσεις έγιναν χωρίς να έχει προηγηθεί κάποιου είδους εκμάθησης στους ακροατές, εκτός από τις σαφείς προφορικές οδηγίες που δόθηκαν λίγο πριν την περάτωση τους. Οι οδηγίες κατεύθυναν τους ακροατές για την εύρεση του πιο αντιπροσωπευτικού Most Comfortable Level, και ήταν ξεκάθαρες ως προς την ανάγκη για επίσηση της προσοχής προς την διαδικασία της εξέτασης.



Σχήμα 3. Επίδοση δοκιμασίας ανά ακροατή για κάθε λίστα.

## 2. Αποτελέσματα

Για να ανιχνεύσουμε τον βαθμό στον οποίο η εφαρμογή είναι ικανή να διεξάγει έγκυρο προκαταρκτικό έλεγχο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της εξέτασης - επανεξέτασης. Στο Σχήμα 3 εμφανίζονται οι μέσες επιδόσεις για κάθε λίστα, με την πρώτη λίστα (44 στοιχεία) να φαίνεται αποδίδει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την δεύτερη λίστα (38 στοιχεία).

Επίσης παρουσιάστηκαν σε 4 ακροατές, ηχητικά ερεθίσματα σε περιβάλλον θορύβου. Η μικρή διαφορά που προκύπτει, έγκειται στο γεγονός ότι ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο (SNR) 10 dB, προσομοιάζει συνθήκες χαμηλού θορύβου, και συνεπώς εμφανίζει αρκετά μικρό βαθμό δυσκολίας.

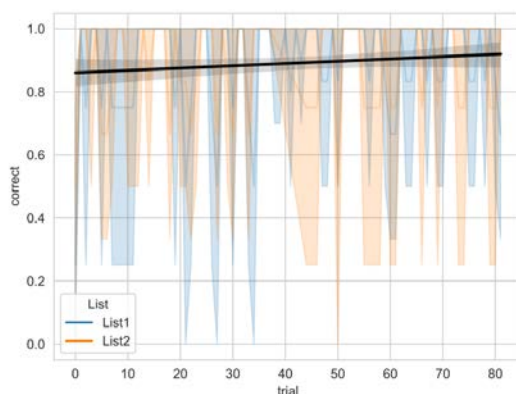
Στον πίνακα 1.1 εμφανίζονται αναλυτικά τα ποσοστά επιτυχίας (%) για τον κάθε ακροατή, όπου στην δεύτερη σειρά να αναπαράγονται τα στοιχεία της 1<sup>ης</sup> λίστας, και στην τρίτη σειρά τα στοιχεία της 2<sup>ης</sup> λίστας. Ως επί το πλείστον, οι επιδόσεις είναι

αρκετά κοντά μεταξύ τους παρουσιάζοντας συνέπεια στα αποτελέσματα της εφαρμογής.

*Πίνακας 1.1 Πίνακας επιδόσεων σε ποσοστό επιτυχίας(%) για κάθε άτομο σε δύο διαδοχικές μετρήσεις με την 1η και 2η λίστα αντίστοιχα.*

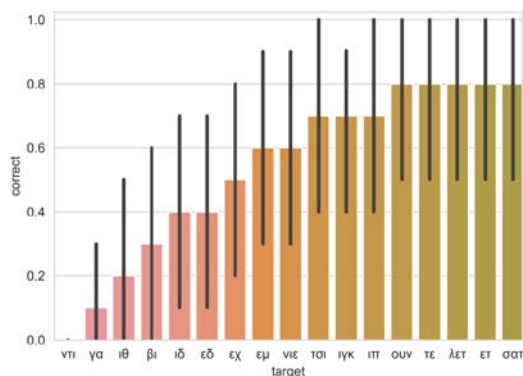
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
90	93	81	95	93	90	93	86	86	95
89	92	84	89	86	89	92	89	92	78

Σύμφωνα με το Σχήμα 4, φαίνεται μια μικρή αύξηση στις σωστές αποκρίσεις των εξεταζόμενων, η οποία συμβαδίζει με την αύξηση των προσπαθειών, υποδεικνύοντας την ύπαρξη φαινομένων εκπαίδευσης.



*Σχήμα 4. Μέση επίδοση ανά προσπάθεια.*

Η παρουσίαση των σύνθετων ηχητικών ερεθισμάτων σε 10 διαφορετικούς ακροατές μπορεί να αναδείξει τα στοιχεία με την λιγότερη ικανοποιητική καταληπτότητα, ή και τα πλέον ακατάλληλα για χρήση, αφού υπάρχουν στοιχεία που δεν αναγνωρίστηκαν σωστά από όλους τους ακροατές (Σχήμα 5). Τα περισσότερα ομιλητικά ερεθίσματα που αναγνωρίστηκαν με δυσκολία περιέχουν σύμφωνα που ανήκουν στο σύνολο των τριβόμενων σύμφωνων, ενώ τα αντίστοιχα φωνήεντα εμπεριέχονται στο σύνολο των κλειστών και πρόσθιων φωνηέντων.



Σχήμα 5. Μέσες τιμές των λανθασμένων αποκρίσεων για το εκάστοτε ηχητικό ερέθισμα.

### 3. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Από την εξαγωγή των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι επιδόσεις δεν είναι σε απόλυτο βαθμό έγκυρες, ενώ φαίνεται να υπάρχει συνέπεια των αποτελεσμάτων της εφαρμογής.

Ο βαθμός δυσκολίας που εισάγεται με 10 dB SNR είναι αρκετά μικρός, καθιστώντας αναγκαία την δυνατότητα στο μέλλον για παρουσίαση του θορύβου με κανονικοποίηση ακουστότητας στα -28 και -23 LUFS. Έτσι, η αναπαραγωγή ηχητικών διεγέρσεων με παρουσία θορύβου στα 10 dB, 5 dB και 0 dB SNR, θα μπορεί να αναδείξει εποπτικά την επικείμενη μείωση της διάκρισης των φωνημάτων και λέξεων.

Επίσης δύναται η ένταξη διεγέρσεων με αυτοματοποιημένο τρόπο μέσα από αλγοριθμική σύνθεση και παραγωγή των ομιλητικών ερεθισμάτων με σκοπό την προσαύξηση των δεδομένων με τη χρήση πληθοπορισμού σε φυσιολογικούς ακροατές.

### 4. Αναφορές

- [1] “Deafness and Hearing Loss.” World Health Organization, World Health Organization, 1 Apr. 2021, <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
- [2] Lawson, G.D. and Peterson, M.E., 2011. Speech audiometry. Plural Publishing.
- [3] Carhart, R., 1951. Basic principles of speech audiometry. *Acta oto-laryngologica*, 40(1-2), pp.62-71.
- [4] Trimmis, N., Papadeas, E., Papadas, T., Naxakis, S., Papathanasopoulos, P. and Goumas, P., 2006. Speech audiometry: The development of modern Greek word lists for suprathreshold word recognition testing. *Mediterr J Otol*, 3, pp.117-126.

- [5] Trimmis, N.S., Vrettakos, G., Gouma, P. and Papadas, T., 2012. Speech audiometry: nonsense monosyllabic lists in modern greek. *Medical Science Monitor*, 2(3), pp.OA41-OA49.
- [6] Trimmis, N., Mourtzouchos, K., Naxakis, S., Papadas, T., & Goumas, P., 2013. Speech Audiometry: Dissyllabic pseudowords test. *Otorhinolaryngologia - Head and Neck Surgery Issue*. Vol.52. pp. 16-21

## ***Ανίχνευση Μηχανικής Φθοράς Τσιμούχας Βιομηχανικού Εμβόλου Διέλασης μέσω Ακουστικής Εκπομπής και Μηχανικής Μάθησης.***

Τσένης Θεοχάρης,  
Research fellow, EKETA/IMET,  
6ο χλμ. Χαριλάου- Θέρμης,  
[tsenis@certh.gr](mailto:tsenis@certh.gr)

Μαρία Κιλικίδου ,  
Junior researcher, EKETA/IMET,  
6ο χλμ. Χαριλάου- Θέρμης,  
[mkilikidou@certh.gr](mailto:mkilikidou@certh.gr)

Δρ. Βασίλειος Καππάτος,  
Ερευνητής Β', EKETA/IMET,  
6ο χλμ. Χαριλάου- Θέρμης,  
[vkappatos@certh.gr](mailto:vkappatos@certh.gr)

Κυρούδης Ζήσης,  
R&D Engineer, ATLANTIS Engineering,  
12ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Μουδανιών,  
[kyroudiss@abe.gr](mailto:kyroudiss@abe.gr)

Χατζηχριστοδούλου Ζωή,  
Software Engineer, ATLANTIS  
Engineering,  
12ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Μουδανιών,  
[zoichatzi@abe.gr](mailto:zoichatzi@abe.gr)

Αθανάσιος Νάσκος,  
CIO, ATLANTIS Engineering,  
12ο χλμ. Θεσσαλονίκης-Μουδανιών,  
Postdoc, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πληροφορικής,  
[anaskos@csd.auth.gr](mailto:anaskos@csd.auth.gr)

Γεωργία Κούγκα,  
Postdoc, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πληροφορικής,  
[georkoug@csd.auth.gr](mailto:georkoug@csd.auth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η διέλαση ελασμάτων αποτελεί μια αξιόπιστη βιομηχανική διεργασία κατασκευής ελασμάτων οποιασδήποτε εγκάρσιας μορφής και με πρακτικό μήκος πολλών δεκάδων μέτρων. Ελάσματα μπορούν πλέον να κατασκευαστούν από οποιοδήποτε ελάσιμο μέταλλο μεταξύ των οποίων και το αλουμίνιο. Είναι μια απλή, εξαιρετικά αξιόπιστη βιομηχανική τεχνική βασισμένη στην διέλαση μέσω εμβόλων. Μια επιτυχημένη βιομηχανική πρακτική βασίζεται και στο μηδενισμό της οποίας απρογραμματίστης συντήρησης και γρήγορης επισκευής βλαβών, οπότε η ανίχνευση τους αποτελεί έργο μέγιστης σημασίας. Η Αχίλλειος Πτέρνα των εμβόλων μπορεί να θεωρηθεί η μηχανική γήρανση της τσιμούχας του. Η έγκαιρη ανίχνευση επικείμενης ολικής βλάβης της τσιμούχας είναι κρίσιμη για την αποδοτικότητα της βιομηχανικής διέλασης. Μια από τις πλέον διαδεδομένες και επιβεβαιωμένες στη πράξη τεχνικές ανίχνευσης και εντοπισμού βλαβών είναι η Ακουστική Εκπομπή, με εκατοντάδες πεδία εφαρμογής μεταξύ των οποίων και ανίχνευση βλαβών σε κατασκευές. Το παρόν έργο έχει ως σκοπό τη χρήση των Ακουστικών Εκπομπών ενός εμβόλου διέλασης όπως αυτές προκύπτουν και καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας τυπικής διέλασης, με σκοπό την ανίχνευση της μηχανικής φθοράς της τσιμούχας του εμβόλου, ως μέτρο έγκαιρης και έγκυρης πρόβλεψης βλάβης.*

## ***Mechanical Wear Detection of Industrial Extrusion Hydraulic Ram Gasket by Acoustic Emission and Machine Learning.***

### **ABSTRACT**

*Extrusion is a reliable industrial process for the manufacture of laminates of any cross-sectional shape and with a practical length of several tens of metres. Laminates can now be made from any malleable metal, including aluminium. It is a simple, highly reliable industrial technique based on hydraulic ram extrusion. A successful industrial practice is also based on the elimination of any unplanned maintenance and rapid repair of faults, so their detection is a task of the utmost importance. The Achilles heel of hydraulic rams can be considered the mechanical aging of its seal. Early detection of impending total gasket failure is critical to the efficiency of industrial extrusion. One of the most widespread and proven in practice techniques for damage detection and localization is Acoustic Emission, with hundreds of applications including damage detection in structures. This project aims to use the Acoustic Emissions on a piston extrusion as generated and recorded during a typical extrusion, for the purpose of detecting mechanical wear of the piston seal, as a measure of early and accurate damage prediction.*

### **Εισαγωγή**

Ο στόχος του έργου είναι ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η αξιολόγηση ενός πρωτοποριακού ολοκληρωμένου συστήματος ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων κατάστασης παραγωγικού εξοπλισμού. Το ευφυές σύστημα που αναπτύσσεται θα περιέχει τεχνολογίες αιχμής όπως η μηχανική μάθηση, ιδιαίτερα η μη επιβλεπόμενη, και μοντέλα πρόβλεψης που θα οδηγήσουν στη μείωση του χρόνου παύσης του εξοπλισμού λόγω βλάβης, στην αύξηση της διάρκειας ζωής του παραγωγικού εξοπλισμού, στη μείωση του συνολικού κόστους συντήρησης και κατ' επέκταση του κόστους παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα το εργοστάσιο της Alumil στη ΒΙΠΕ Κιλκίς έχοντας μια κάθετη παραγωγή προφίλ/ελασμάτων αλουμινίου, συμμετέχει στη παρούσα έρευνα (PRECOgnition) με στόχευση την επίλυση πραγματικού βιομηχανικού προβλήματος, δηλαδή την έγκαιρη πρόγνωση βλάβης των εμβόλων διέλασης μέσω χρήσης διαφόρων αισθητήρων και τεχνικών, μια εξ' αυτών την Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ).

Κατά τη διάρκεια των επισκέψεων στην ALUMIL, για τη λήψη των ΑΕ από τα έμβολα του συστήματος πρέσας κατασκευής ελασμάτων αλουμινίου μέσω διέλασης μπιγιέτας αλουμινίου, ένα φορητό σύστημα καταγραφής λήψεων ΑΕ χρησιμοποιήθηκε, μαζί με τέσσερις πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Σε κάθε μηνιαία επίσκεψη μετρήσεις λαμβάνονταν και καταγράφονταν από όλα τα εμπλεκόμενα έμβολα της πρέσας, σκοπεύοντας με τη πάροδο του χρόνου και τη αναμενόμενη γήρανση της τσιμούχας λόγω καταπόνησης από τη συνεχή διέλαση, να ανιχνευθούν αντίστοιχα μοτίβα στις ακουστικές λήψεις, και επομένως να κατηγοριοποιηθεί προς αντικατάσταση ή όχι οι τσιμούχες των εμβόλων της πρέσας υπό διερεύνηση.

Το αντικείμενο χρήσης ΑΕ για ανεύρεση βλαβών σε κυλίνδρους συμπίεσης λαδιού είναι σχετικά καινούργιο. Σε πρόσφατη μελέτη ο P. Mazal et al.[1] απέδειξε σημαντική ευαισθησία της ΑΕ στην ανεύρεση διαφόρων βλαβών σε κυλίνδρους συμπίεσης λαδιού. Ο V. V. Shanbhag et al.[2] στη δική του έρευνα προσδιόρισε περιοχές συχνοτήτων που παρουσιάζονται έντονα σε περίπτωση βλάβης τσιμούχας και προσδιόρισε ότι τα features AE-RMS, AE-peak, AE median frequency που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαρκώς από μοντέλα ML. Επίσης ο H. Mahmoud et al.[3] έφτασε σε παρόμοια αποτελέσματα σχετικά με τη χρήση ΑΕ σε ανίχνευση βλάβης τσιμούχας.

Τα δεδομένα από τη χρήση των αισθητήρων ΑΕ και άλλων πηγών συλλέγονται και αποθηκεύονται από ένα υποσύστημα του PRECOgnition που αφορά την ανάλυση ενδεχομένως μεγάλου όγκου δεδομένων. Τα δεδομένα, όπως προαναφέρθηκε, συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο και αναλύονται με σκοπό τον εντοπισμό και τη πρόβλεψη των βλαβών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, εφαρμόζονται μοντέλα μηχανικής μάθησης (machine learning ML). Ενώ μπορούν θεωρητικά να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν μοντέλα αναγνώρισης μη ομαλών καταστάσεων (Anomaly Detection) βασισμένα και σε Deep Neural Network (DNN) λύσεις, τέτοιες λύσεις στην πράξη δεν είναι λειτουργικές λόγω της μη ύπαρξης δεδομένων εκπαίδευσης. Οι κυρίαρχες μεθοδολογίες για την ανάλυση σημάτων ΑΕ μεμονωμένα, όπως παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία, είναι δύο και εφαρμόζονται συνδυαστικά: α) εντοπισμός εξωκείμενων σημείων σε ροές δεδομένων χωρίς την ανάγκη δημιουργίας μοντέλου κατά την εκτέλεση και β) η χρήση δειγμάτων αναφοράς για τα οποία υπάρχει βεβαιότητα ότι δεν υπάρχει βλάβη/φθορά.

Αναφορικά με τον ευρύτερο χώρο της προληπτικής συντήρησης, η ταξινόμηση προγνωστικών τεχνικών, τάσεων, κατευθύνσεων που βασίζονται σε δεδομένα και μια συγκριτική επισκόπηση σε σχέση με τις βιομηχανικές ρυθμίσεις παρουσιάζονται στην εργασία [4]. Επιπλέον, υπάρχουν ανοιχτές τεχνικές προκλήσεις σχετικά με τις συνέπειες κάθε εφαρμογής σε μια βιομηχανική εγκατάσταση. Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι κάθε εφαρμογή έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά [5], όπου θα πρέπει να συλλέγονται δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά τεχνικών καταφλίωσης. Το ευρύτερο σκεπτικό της παρούσης τεχνικής έχει εφαρμοστεί στην εργασία [6] κι εδώ θα δείξουμε την εφαρμογή της σε μετρήσεις ΑΕ.

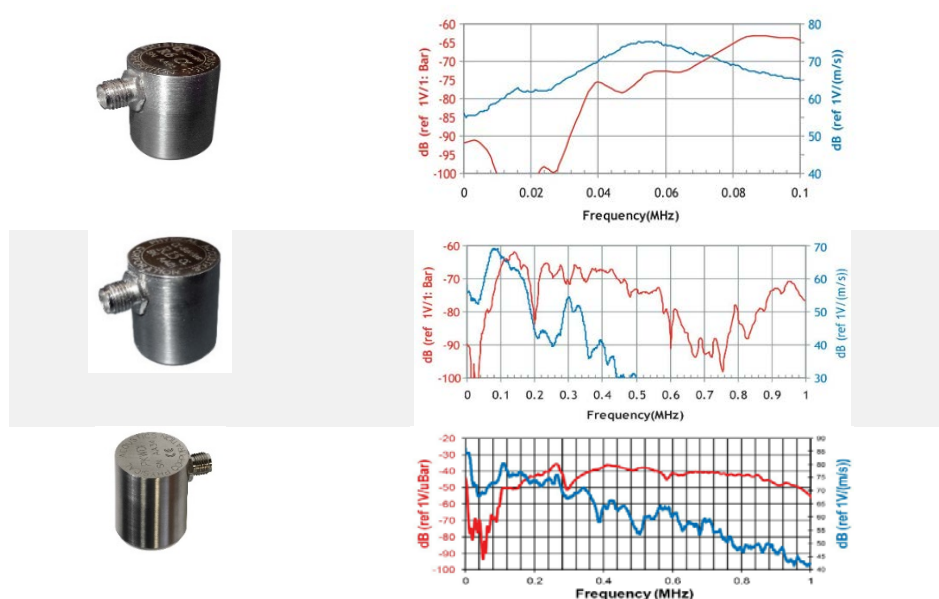
Το υπόλοιπο της παρούσης έρευνας αποτελείται από το τμήμα (1) περιγραφής λήψης των μετρήσεων ΑΕ. Το δεύτερο τμήμα (2) παρουσιάζει τη λογική και τη τεχνική μη επιβλεπόμενης μάθησης που χρησιμοποιήθηκε. Στο τέλος της παρούσης παρουσιάζονται συμπεράσματα και οι προβολές αυτής της έρευνας.

## **1. Μετρήσεις Ακουστικών Εκπομπών**

Όλες οι ΑΕ μετρήσεις έγιναν σε πραγματικό χρόνο, κάτω από πραγματικές αντίξοες εργασιασιακές συνθήκες. Η παραγωγή δεν μπορούσε με κανένα τρόπο να σταματήσει, οπότε πολλές διεξοδικές συνομιλίες διεξήχθησαν για το πώς θα γίνουν οι σχετικές μετρήσεις ώστε να μην επηρεαστεί η παραγωγή.

### 1.1 Αισθητήρια και Καταγραφικό

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των ΑΕ είναι το micro-SHM, από την Mistras. Πρόκειται για καταγραφικό εργοστασιακής αντοχής, με αστάλινο εξωτερικό περίβλημα, και συνδεσιμότητα Wi-Fi. Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί με μπαταρίες μέχρι 3.5 ώρες και διαθέτει 4 κανάλια πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Το αντίστοιχο λογισμικό λήψης των καταγραφών ήταν εγκατεστημένο σε φορητό Υ/Η (laptop), το οποίο και λόγω της ασύρματης συνδεσιμότητας του τοποθετήθηκε στη κεντρική καμπίνα ελέγχου της πρέσας. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Τα τρία είδη πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, μαζί με τις αποκρίσεις στο φάσμα

Για τη συχνотική απόκριση (σχήμα 1.2), το αισθητήριο R6a για τις χαμηλές συχνότητες 10kHz-80kHz, το αισθητήριο R15a για τις μεσαίες συχνότητες 90kHz-170kHz, ενώ τα υπόλοιπα δύο αισθητήρια είναι ευρέος φάσματος, 100kHz-800kHz. Το micro-SHM διαθέτει και εσωτερικά ζωνοδιαβατά λογισμικά φίλτρα. Σχετικά με την αρίθμηση των καναλιών, το κανάλι 1 φέρει τον αισθητήρα R15a, το 2 τον R6a και τα κανάλια 3,4 τον PKWDI. Σε έκαστη μέτρηση ανά έμβολο δύο ρυθμίσεις ως προς το όριο κατωφλίσωσης έναρξης καταγραφής ακολουθηθήκε (Πίνακας 1.2), ενώ και στις δύο περιπτώσεις τα ζωνοδιαβατά φίλτρα ανά κανάλι φαίνονται στο Πίνακα 1.1. Η πρώτη κατωφλίωση των αισθητήρων φαίνεται στον Πίνακα 1.2.α και είναι μέτρια μεταξύ 30-40 dB. Η δεύτερη κατωφλίωση φαίνεται στον Πίνακα 1.2.β και είναι αρκετά μικρότερη της τάξης των 5 dB. Με αυτό το τρόπο έχουμε μια σειρά εγγραφών με κύρια γεγονότα και μια σειρά με σχεδόν συνεχή εγγραφή ΑΕ.



Πίνακας 1.1 Ζωνοδιαβατά φίλτρα ανά αισθητήριο και κανάλι

AE Channel	Sensor	Analog Filter		Digital Filter		Waveform Setup		
		Lower	Upper	Lower	Upper	Sample Rate	Pre-Trigger	Length
<input checked="" type="checkbox"/> 1	15	20kHz	1MHz	40kHz[B42]	200kHz[B42]	2MSPS	100.0000	2k
<input checked="" type="checkbox"/> 2	6	1kHz	100kHz	None	60kHz	2MSPS	200.0000	2k
<input checked="" type="checkbox"/> 3	15	20kHz	1MHz	40kHz[B42]	200kHz[B42]	2MSPS	200.0000	2k
<input checked="" type="checkbox"/> 4	15	20kHz	1MHz	None	160kHz	2MSPS	200.0000	2k

Πίνακας 1.2 Πρώτη (α) και δεύτερη (β) κατωφλίωση έναρξης εγγραφής

AE Channel	Threshold			AE Channel	Threshold		
	Type	dB	FTBnd		Type	dB	FTBnd
<input checked="" type="checkbox"/> 1	FIXED	30	6	<input checked="" type="checkbox"/> 1	FIXED	5	6
<input checked="" type="checkbox"/> 2	FIXED	40	6	<input checked="" type="checkbox"/> 2	FIXED	5	6
<input checked="" type="checkbox"/> 3	FIXED	30	7	<input checked="" type="checkbox"/> 3	FIXED	5	7
<input checked="" type="checkbox"/> 4	FIXED	40	6	<input checked="" type="checkbox"/> 4	FIXED	5	6

### 1.2 Περιγραφή Διεξαγωγής Μετρήσεων AE

Η πρώτη πρέσα σχήμα 1.2.α, στην οποία έγιναν σχεδόν όλες οι μετρήσεις, αποτελείται από δύο μεγάλα οπίσθια έμβολα σχήμα 1.2.β, τα οποία πρεσάρουν τη μπιγιέτα αλουμινίου, και άλλα τέσσερα μικρά μπροστινά έμβολα που συγκρατούν τη μήτρα διέλασης σχήμα 1.2.γ.



Σχήμα 1.2 Πρέσα μετρήσεων(α), οπίσθια(β) και μπροστινά έμβολα (γ)

Συνολικά έξι έμβολα υπάρχουν ανά πρέσα. Στα τέσσερα μπροστινά έμβολα τοποθετήθηκαν τα αισθητήρια όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.α, ενώ στα δύο οπίσθια έμβολα τα αισθητήρια τοποθετήθηκαν όπως στο σχήμα 1.3.β. Τα τελικά αποτελέσματα των εγγραφών / μετρήσεων με ειδικό πρόγραμμα μετατράπηκαν σε CSV μορφή που είναι πιο κατάλληλη μορφή για επεξεργασία για python, R και C++ μοντέλα. Τα αρχεία ανά ημέρα και ώρα φορτώνονταν σε online σημείο αποθήκευσης για περαιτέρω επεξεργασία.

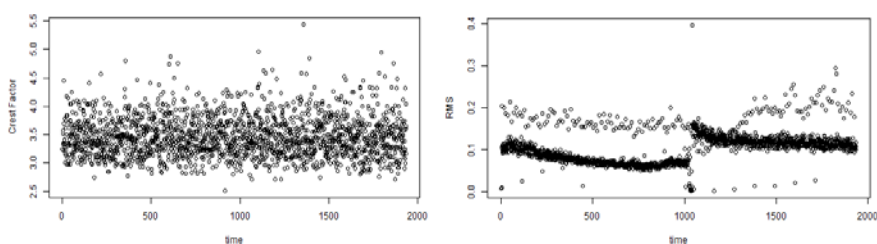


Σχήμα 1.3 Τυπική διάταξη αισθητήρων σε μπροστινό έμβολο (α) και οπίσθιο (β)

## 2. Τεχνική μη επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης

### 2.1 Μετασχηματισμός σήματος

Τα δεδομένα του ακουστικού σήματος είναι οι μετρήσεις του ήχου σε μονάδα μέτρησης Volt, όπου για κάθε χτύπημα του εμβόλου καταγράφονται 2048 σημεία ανά κυματομορφή. Η χρονική περίοδος ανάμεσα στις καταγραφές είναι ~0.09 δευτερόλεπτα. Καθώς οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά έμβολο για κάθε κανάλι με μπιγιέτα και χωρίς μπιγιέτα, δημιουργείται μία χρονοσειρά για κάθε ένα κανάλι σε κάθε έμβολο. Η παραγόμενη χρονοσειρά απεικονίζει την εξέλιξη του ακουστικού σήματος μέσα στο χρόνο. Τα συγκεκριμένα δεδομένα του ακουστικού σήματος μετατρέπονται σε μία άλλη μορφή χρονοσειράς, που περιέχει το RMS (Root-Mean-Square) και το Crest Factor από κάθε αρχική κυματομορφή χτυπήματος. Το μέγεθος της χρονοσειράς καθορίζεται από τον αριθμό των χτυπημάτων που καταγράφονται από τον αισθητήρα. Το Σχήμα 1.4 απεικονίζει ένα παράδειγμα.



Σχήμα 1.4 Ενδεικτικές χρονοσειρές Crest Factor (α) και RMS (β)

### 2.2 Τεχνικές βασισμένες στο προφίλ

Συνοπτικά, ελέγχουμε εάν ένα σήμα είναι κοντά σε ένα προφίλ ομαλής λειτουργίας, όπου η σύγκριση γίνεται ανάμεσα σε ένα σήμα και σε ένα σύνολο προφίλ ομαλής λειτουργίας. Η ομοιότητα ενός σήματος, δηλαδή το πόσο κοντά είναι στα προφίλ ομαλής λειτουργίας, ορίζεται από το κοντινότερο κομμάτι του προφίλ στο σήμα.

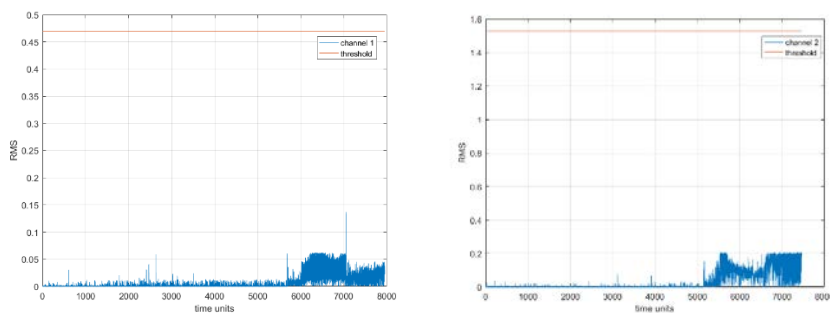
Ο πλήρης αλγόριθμος που εφαρμόζει την παραπάνω τεχνική ονομάζεται Profile-Based (PB) και αποτελείται από τρεις φάσεις: (1) την κατασκευή προφίλ, (2) τον έλεγχο ανωμαλιών στα νέα σημεία βάσει του προφίλ και (3) την ανατροφοδότηση από τα νέα σημεία για μία πιθανή ανακατασκευή του προφίλ. Εδώ θα επικεντρωθούμε στις πρώτες 2 φάσεις.

**ΦΑΣΗ 1:** Δημιουργούμε το προφίλ καλής λειτουργίας  $pf$  με δύο τρόπους, είτε επιλέγουμε  $n$  συνεχόμενα σημεία από παρελθοντικά δεδομένα που γνωρίζουμε ότι διαδικασία της διέλασης διεξήχθη ομαλά, είτε συλλέγουμε σημεία από την έναρξη της διαδικασίας διέλασης, όπου για να διατηρηθεί μία συνοχή στο προφίλ ορίζεται ένα όριο μέγιστης εσωτερικής απόστασης.

**ΦΑΣΗ 2:** Ελέγχουμε για ανωμαλίες στα νέα σημεία. Με βάση το προφίλ που δημιουργήθηκε για κάθε σημείο  $x_i$  που λαμβάνεται υπολογίζεται η απόσταση  $d_i$  του από το προφίλ  $pf$  και πιο συγκεκριμένα, η μικρότερη από τις αποστάσεις του σημείου με κάθε ένα σημείο του προφίλ  $d_i = \min (dist(x_i, x), \forall x \in pf)$ . Το νέο σημείο θεωρείται ανωμαλία, αν η απόσταση του  $d_i$  από το προφίλ είναι μεγαλύτερη από ένα όριο  $th$ , όπου το όριο αυτό μπορεί να είναι είτε ένας σταθερός αριθμός, είτε ένας συντελεστής που ορίζουμε βάσει της εσωτερικής συνοχής του προφίλ για να κάνουμε το όριο περισσότερο ή λιγότερο αυστηρό.

### 2.3 Ενδεικτικά Αποτελέσματα

Παρακάτω δείχνουμε ένα παράδειγμα όπου μελετάμε ένα έμβολο σε δύο συνεχόμενους μήνες. Από τη μέση περίπου και μετά στον οριζόντιο άξονα, οι μετρήσεις αναφέρονται σε διαφορετικό μήνα. Το προφίλ καλής λειτουργίας χτίστηκε με αρχικά δεδομένα του πρώτου μήνα, όπου υπήρχε εγγύηση από τους μηχανικούς ότι η λειτουργία ήταν ομαλή. Βλέπουμε ότι περνώντας ο χρόνος, οι αποστάσεις αυξάνονται, καθώς υπάρχει μικρή φθορά στην τσιμούχα, αλλά παραμένει πολύ κάτω από ενδεικτικό κατώφλι προβλήματος.



Σχήμα 1.5 Ενδεικτικές αποστάσεις από το προφίλ καλής λειτουργίας για δύο κανάλια

## 3. Συμπεράσματα και πιθανές προβολές της έρευνας

Στη συγκεκριμένη εργασία δείξαμε πως βάσει μετρήσεων ΑΕ, μετά από μία προεπεξεργασία, μπορούμε να εφαρμόσουμε τεχνικές μη επιβλεπόμενης μάθησης

βασιζόμενες στην ομοιότητα, όπου σημαντικές αποκλίσεις μετρήσεων από μετρήσεις σε ομαλή λειτουργία υποδηλώνουν προβληματικές καταστάσεις (φθορά).

Οι αρχικές ενδείξεις είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές ότι οι μετρήσεις ΑΕ μπορούν να επεξεργαστούν με τρόπο όπου να αναδεικνύεται η σταδιακή φθορά του εξοπλισμού. Στα πλαίσια του έργου σκοπεύουμε να επεκτείνουμε τις τεχνικές που χρησιμοποιούμε, ιδίως προς την κατεύθυνση προσαρμογής καταφλίων βάσει [6], ενσωμάτωσης τεχνικών βαθειάς μάθησης και προηγμένης μετα-επεξεργασίας με σκεπτικό συστημάτων λήψης αποφάσεων.

#### 4. Ευχαριστίες

Το αντικείμενο της παρούσης έρευνας αναπτύσσεται στα πλαίσια του έργου PRECOgnition, μέρος του επιχειρησιακού προγράμματος ‘Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας 2014-2022’ και της Δράσης ‘Ερευνητικά Σχέδια Καινοτομίας’ με κωδικό KMP6-0077768 που συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης). Οι συγγραφείς επιπλέον θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την εταιρία Alumil για τις εγκαταστάσεις που προσέφερε με σκοπό να πραγματοποιηθεί η παρούσα έρευνα.



ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
Ε.Π. Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

#### 5. Αναφορές

- [1] P. Mazal et al. «The use of Acoustic Emission method for diagnosis of damage of pneumatic cylinders» in *Proceedings of 19th World Conference on Non-Destructive Testing*, pp. 1-10 (2016, June).
- [2] V. V. Shanbhag et al. «Defining acoustic emission-based condition monitoring indicators for monitoring piston rod seal and bearing wear in hydraulic cylinders» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115.9, pp 2729-2746 (2021).
- [3] H. Mahmoud et al. «Leakage analysis of pneumatic cylinders using acoustic emission» *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 59.9, pp 500-505 (2017).
- [4] Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., Sierra, B.: Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards industry 4.0. *Information Fusion* 50, 92–111 (2019).
- [5] Korvesis, P., Besseau, S., Vazirgiannis, M.: Predictive maintenance in aviation: Failure prediction from post-flight reports. In: 2018 IEEE 34th International Conference on Data Engineering (ICDE). pp. 1414–1422. IEEE (2018).
- [6] Apostolos Giannoulidis, Nikodimos Nikolaidis, Athanasios Naskos, Anastasios Gounaris and Daniel Caljouw. Investigating thresholding techniques in a real predictive maintenance scenario. In: *AI in Manufacturing workshop, PKDD/ECML Workshops (2) 2022*.

## **Μεγάλης κλίμακας ανάλυση ακουστικών για σχεδίαση ψηφιακών φίλτρων**

Παναγιώτης Ζάχος  
Υποψήφιος Διδάκτορας  
p\_zachos@upnet.gr

Δημήτρης Μέρμηγκας  
Φοιτητής  
up1046874@upnet.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος  
Καθηγητής  
mourjop@upatras.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία εστιάζει σε μεγάλης κλίμακας ανάλυση και αξιολόγηση της απόκρισης ακουστικών. Για τις ανάγκες της εργασίας συλλέχθηκαν δεδομένα αποτελούμενα από αποκρίσεις μέτρου στο φάσμα της συχνότητας ακουστικών. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την εξαγωγή χαρακτηριστικών στατιστικών παραμέτρων με στόχο την καταγραφή των συστηματικών συμπεριφορών για όλους τους τύπους των ακουστικών. Επίσης, η εργασία επεκτείνεται στην αξιολόγηση των αποκρίσεων συγκριτικά με καμπύλες «στόχους», ερμηνεύοντας το σφάλμα που διαμορφώνεται μεταξύ τους. Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μαζική ανάλυση, αξιολόγηση και σύγκριση των ακουστικών, μελετώντας την συμπεριφορά τους στο φάσμα των ακουστών συχνοτήτων. Επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τις αποκρίσεις, υπολογίζοντας φασματικές παραμέτρους και συγκρίνοντας τις καμπύλες τους στο φάσμα συχνότητας, μέσω μιας εφαρμογής που υλοποιήθηκε για τον συγκεκριμένο σκοπό.*

## **Large scale headphone analysis for digital filter design**

### **ABSTRACT**

*This work focuses on the large-scale analysis and evaluation of headphone responses. For the purposes of this work, data was collected consisting of measured headphone frequency responses. This analysis involves extracting characteristic statistical parameters to record systematic behaviors for all types of headphones. The work also extends to the evaluation of responses with reference to "targets" curves, interpreting the error that is formed between them. The main purpose of this work is the mass analysis, evaluation, and comparison of headphones, studying their behavior in the spectrum of audio frequencies. This is achieved by comparing the responses via the calculation of spectral parameters and comparing their curves in the frequency spectrum, through an application developed for this purpose.*

## Εισαγωγή

Η χρήση ακουστικών ως καθημερινό μέσο αναπαραγωγής μουσικής, επικοινωνίας ή εργασίας, έχει δημιουργήσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια για την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς τους. Η μέτρηση της απόκρισης συχνότητας ενός ακουστικού αποτελεί έναν καλό και αξιόπιστο τρόπο μελέτης της απόδοσης του [1], καθώς φαίνεται καθαρά η ικανότητα αναπαραγωγής συχνοτήτων σε όλο το διάστημα ενδιαφέροντος. Η μελέτη των αποκρίσεων των ακουστικών έχει μεγάλη σημασία σε πληθώρα εφαρμογών τηλεπικοινωνιών, μουσικής και επαυξημένης πραγματικότητας [2] [3], όμως δεν υπάρχει μια κοινή βάση δεδομένων όπου τα αντικειμενικά χαρακτηριστικά τους αναλύονται στατιστικά και εμφανίζονται με συγκριτικό τρόπο. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη μελέτη, επεξεργασία και σύγκριση πληθώρας ακουστικών, καταγράφοντας παράλληλα τις συστηματικές συμπεριφορές των διαφόρων τύπων ακουστικών (in-ear, over-ear, earbuds).

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου στόχου έγκειται στον υπολογισμό στατιστικών παραμέτρων στο πεδίο της συχνότητας όπου μελετάται η συμπεριφορά των αποκρίσεων συχνότητας των ακουστικών. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε μια εφαρμογή όπου εκτός από την ανάλυση και προβολή αποτελεσμάτων κάθε ακουστικού ξεχωριστά, παρουσιάζονται και συγκρίνονται μαζί τα αποτελέσματα των υπολογισμένων παραμέτρων όλων των ακουστικών ενώ παράλληλα αξιολογούνται οι αποκρίσεις τους με αναφορά σε καμπύλες «στόχους» ταξινομώντας τα με κριτήριο το σφάλμα τους σε σχέση με αυτές.

### 1. Υλοποίηση της εργασίας

Αρχικά συλλέχθηκε μεγάλος αριθμός μετρήσεων ακουστικών από πέντε γνωστές ιστοσελίδες που μελετούν και αναλύουν ηχητικές συσκευές [4] και αποθηκεύτηκαν μετρήσεις για τις τρεις μεγάλες κατηγορίες ακουστικών: On/Over ear, In ear και Earbud. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις αφορούν αποκλειστικά το μέτρο της απόκρισης συχνότητας όμως θεωρήθηκε αναγκαίο για την πληρότητα της βάσης των ακουστικών να εμπεριέχονται σε αυτή και οι κρουστικές αποκρίσεις τους.

#### 1.1 Υπολογισμός Κρουστικών Αποκρίσεων

Τα μέτρα των αποκρίσεων συχνότητας όπως συλλέχθηκαν από τη βάση, αποτελούνται από διανύσματα πλάτους, σε dB, και συχνότητας με εύρος από 20 έως 20.000 Hz. Τα διανύσματα μέτρου αποτελούνται από 695 σημεία σε λογαριθμική κλίμακα και μέσω αριθμητικής παρεμβολής προκύπτουν διανύσματα γραμμικής κλίμακας 4096 σημείων με εύρος τιμών [20, 20000] Hz.

Εφόσον στις αρχικές βάσεις δεδομένων δεν υπήρχαν δεδομένα για την απόκριση φάσης, κατασκευάστηκε ένα διάνυσμα γραμμικής φάσης από  $0^0$  μέχρι  $-180^0$ . Τέλος κατασκευάζεται το μιγαδικό διάνυσμα που αποτελεί τον μετασχηματισμό Fourier της κρουστικής του ακουστικού, με το μέτρο και τη φάση να έχουν άρτια και περιττή συμμετρία αντίστοιχα ως προς το  $F_s/2$ .

Τα δυο διανύσματα των 8192 σημείων συντελούν το μιγαδικό διάνυσμα  $H(\omega)$ :

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp^{-j\angle H(\omega)} \quad (1.1)$$

όπου  $|H(\omega)|$  το μέτρο και  $\angle H(\omega)$  η φάση του διανύσματος. Με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier υπολογίζεται τελικά η κρουστική απόκριση του ακουστικού.

### 1.2 Διαχωρισμός φάσματος σε περιοχές με τη χρήση φίλτρων

Για περαιτέρω μελέτη αλλά και σύγκριση των ακουστικών μεταξύ τους ανά περιοχές χωρίστηκε το ακουστικό φάσμα συχνοτήτων σε τέσσερις μεγάλες περιοχές όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.1. Κατασκευάστηκαν τέσσερα ζωνοπερατά φίλτρα, IIR Chebyshev Type II, όπου απέδιδαν τη μικρότερη δυνατή τάξη φίλτρου. Η τάξη των φίλτρων αποτέλεσε το κύριο κριτήριο επιλογής ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή μεγάλων καθυστερήσεων φάσης και άρα η εισαγωγή ακουστών παραμορφώσεων όταν η κρουστική χρησιμοποιείται για το φιλτράρισμα ενός άλλου σήματος.

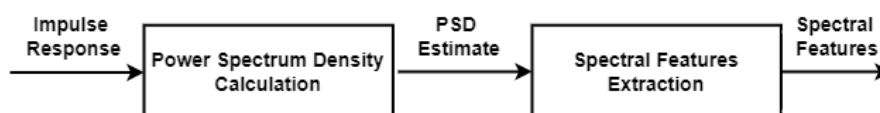
Εφαρμόζοντας τα φίλτρα στην κρουστική απόκριση των ακουστικών εξάγονται οι κρουστικές αποκρίσεις των επιλεγμένων περιοχών.

Πίνακας 1.1 Διαστήματα των τεσσάρων περιοχών του φάσματος

Περιοχές	Από (Hz)	Έως (Hz)
Bass	20	160
Midrange	160	1280
Treble	1280	10200
Top Octave	10200	20000

### 1.3 Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων και σύγκριση με καμπύλες στόχους

Οι παράμετροι αφορούν το φάσμα συχνότητας των ακουστικών και εξάγονται με τη βοήθεια συναρτήσεων στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB που δέχονται ως είσοδο την κρουστική απόκριση τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η παράμετρος spectral centroid δείχνει σε ποια συχνότητα βρίσκεται το κέντρο μάζας της απόκρισης συχνότητας [5] ενώ η spectral spread δείχνει τη μέση απόκλιση του φάσματος γύρω από το centroid. Η spectral flatness χαρακτηρίζει πόσο επίπεδο είναι το φάσμα και η συχνότητα roll-off καθορίζει τη συχνότητα κάτω από την οποία εμπεριέχεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του φάσματος, συνήθως 85% και συνήθως γράφεται ως  $F_{85\%}$  [6]. Τέλος η παράμετρος spectral kurtosis είναι μια ροπή που δείχνει το βαθμό στον οποίο το φάσμα έχει ακραίες τιμές, ενώ η spectral skewness μετρά την ασυμμετρία των δεδομένων γύρω από τη τιμή του centroid [4], [5].



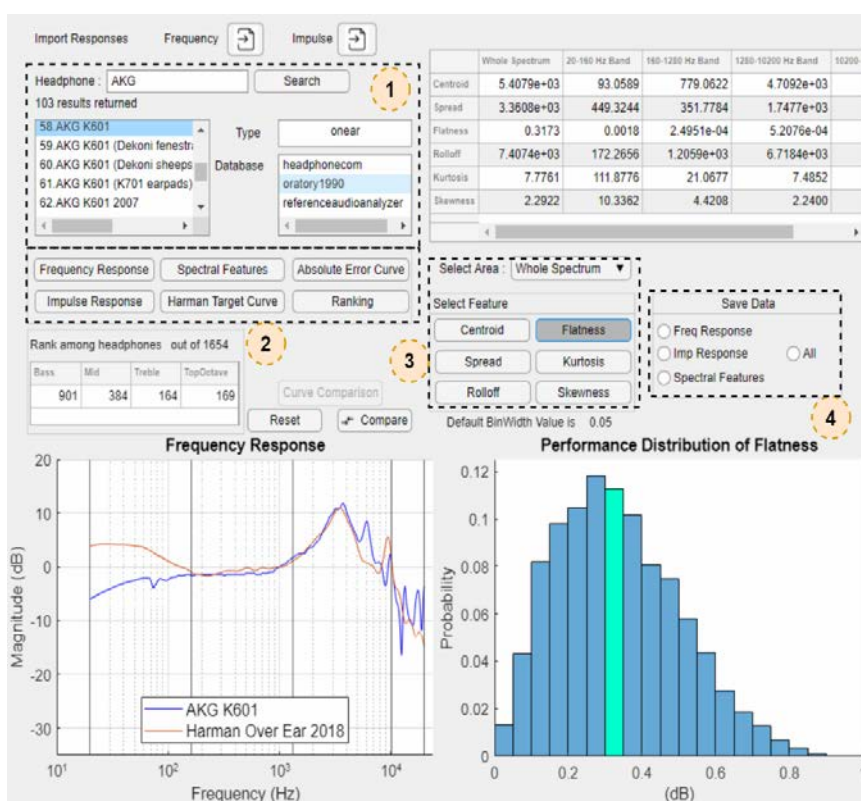
Σχήμα 1.1 Block διάγραμμα υπολογισμού φασματικών παραμέτρων.

Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ της απόκρισης συχνότητας κάθε ακουστικού και της καμπύλης Harman [9] και προκύπτει ένας πίνακας με το σφάλμα των ακουστικών στις τέσσερις περιοχές, ένα

είδος βαθμολόγησης για όλη τη βάση δεδομένων. Όσο μικρότερο είναι το σφάλμα σε μία περιοχή τόσο υψηλότερη θέση στη κατάταξη εμφανίζει το ακουστικό.

#### 1.4 Επισκόπηση Εφαρμογής

Η εφαρμογή υλοποιήθηκε στο περιβάλλον της MATLAB και χωρίζεται σε τέσσερα κύρια τμήματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Γενική εικόνα της εφαρμογής

Το πρώτο τμήμα αφορά την εισαγωγή του ακουστικού στην εφαρμογή με τη μορφή απόκρισης συχνότητας ή κρουστικής απόκρισης. Διαφορετικά επιλέγεται το επιθυμητό ακουστικό από τη βάση δεδομένων μέσω της μπάρας αναζήτησης. Με την επιλογή του ακουστικού εμφανίζεται η ιστοσελίδα από την οποία συλλέχθηκε καθώς και ο τύπος του.

Το δεύτερο τμήμα της εφαρμογής αποτελεί το μενού επιλογών για το συγκεκριμένο ακουστικό. Παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης των αποκρίσεων τόσο στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της συχνότητας. Με κατάλληλη επιλογή εμφανίζονται οι καμπύλες Harman και του απόλυτου σφάλματος μεταξύ της απόκρισης του ακουστικού και αυτής. Στην ενότητα 1.3 υπολογίστηκαν ορισμένες χαρακτηριστικές παράμετροι και συγκρίθηκαν οι αποκρίσεις συχνότητας των ακουστικών με την καμπύλη στόχο σε όλο το φάσμα και ανά περιοχές. Τα



αποθηκευμένα δεδομένα παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα για όλες τις περιοχές του φάσματος όπως υποδεικνύει η Εξίσωση (1.2) αλλά και για την βαθμολογία του εκάστοτε ακουστικού συγκριτικά με τον τύπο του.

Εκτός από τη μεμονωμένη ανάλυση και εμφάνιση του επιλεγμένου ακουστικού, η εφαρμογή καθιστά εφικτή τη σύγκριση των υπολογισμένων δεδομένων με τη συνολική εικόνα της βάσης. Το ιστόγραμμα του σχήματος 1.2 αποδίδει τη κατανομή των τιμών όλων των ακουστικών. Η χρήση φίλτρων επιτρέπει την εμφάνιση παραμέτρων σε συγκεκριμένες περιοχές. Με εντονότερο χρώμα παρατηρείται ξεκάθαρα η τιμή του ακουστικού για την επιλεγμένη παράμετρο σε σχέση με τα υπόλοιπα ακουστικά. Κατανοούνται, με αυτό τον τρόπο, καλύτερα τα αποτελέσματα των μετρήσεων του κάθε ακουστικού σε σχέση με το σύνολο.

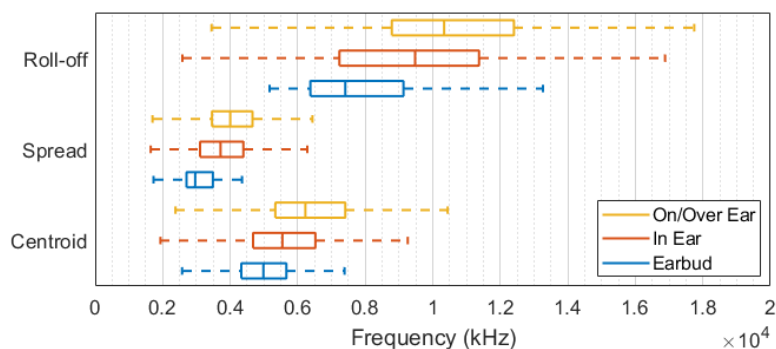
Τέλος η εφαρμογή παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να αποθηκεύσει οποιαδήποτε πληροφορία, γράφημα και απόκριση επιθυμεί, επιτρέποντας τη περαιτέρω μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων σε μεταγενέστερο χρόνο ή σε διαφορετικό υπολογιστικό περιβάλλον.

## 2. Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα της συνολικής βάσης των ακουστικών για τις φασματικές παραμέτρους για τις τρεις κατηγορίες και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

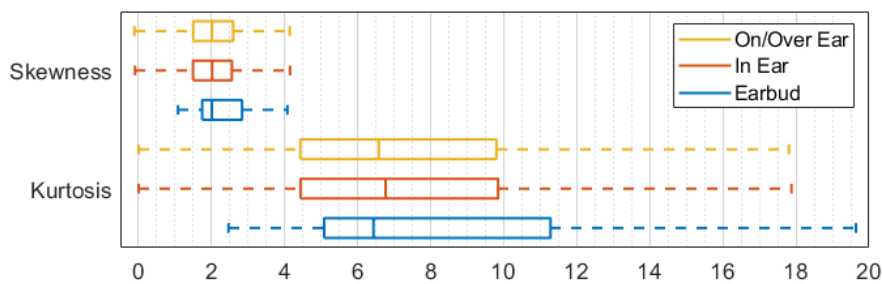
Σύμφωνα με το σχήμα 2.1 τα earbud ακουστικά παρουσιάζουν τη χαμηλότερη μέση τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες σε όλες τις παραμέτρους (centroid, spread, flatness, roll-off, kurtosis, skewness) και έχουν το μικρότερο εύρος τιμών λόγω του μικρού αριθμού ακουστικών. Το χαμηλό εύρος της παραμέτρου spread υποδεικνύει πως οι περισσότεροι ευαίσθητες συχνότητες βρίσκονται γύρω από τη μέση τιμή. Στις συχνότητες εκτός του συγκεκριμένου εύρους και μέσης τιμής υπάρχει αισθητή μείωση του πλάτους της απόκρισης συχνότητας του ακουστικού.

Συνηθέστερες τιμές της συχνότητας roll-off  $F_{85\%}$  είναι από 7 έως 12 kHz για τη συνολική εικόνα των ακουστικών. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του ακουστικού στο φάσμα της συχνότητας περιλαμβάνει τις χαμηλές, μεσαίες και ένα μέρος από τις υψηλές περιοχές συχνότητας. Η ενέργεια των earbud ακουστικών περιορίζεται σε ακόμα χαμηλότερες συχνότητες.



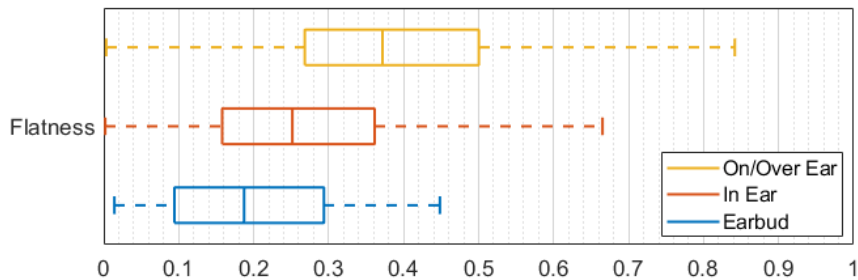
Σχήμα 2.1 Αποτελέσματα ακουστικών για τις παραμέτρους spectral Centroid, Spread και Roll-off.

Το πεδίο τιμών για τις παραμέτρους skewness και kurtosis αποτυπώνεται με πολλές ομοιότητες στο σχήμα 2.2. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ακουστικών λαμβάνει τιμές περίπου από 1 έως 3 και 4 έως 14 για τη φασματική skewness και kurtosis αντίστοιχα. Και οι δύο αυτές παράμετροι συνδέονται άμεσα με τη παράμετρο spread και centroid του ακουστικού. Υψηλές τιμές kurtosis δείχνουν την ευαισθησία του ακουστικού στις συχνότητες γύρω από το κέντρο βάρους του, ενώ οι τιμές της απόκρισης συχνότητας των ακουστικών είναι περισσότερο συγκεντρωμένες κάτω από τη μέση τιμή λόγω θετικής τιμής skewness. Το μέτρο της απόκρισης έχει μεγαλύτερες τιμές στις συχνότητες κάτω από τη μέση τιμή συγκριτικά με τις πολύ υψηλές συχνότητες.



Σχήμα 2.2 Αποτελέσματα των ακουστικών για τις παραμέτρους spectral Skewness και Kurtosis.

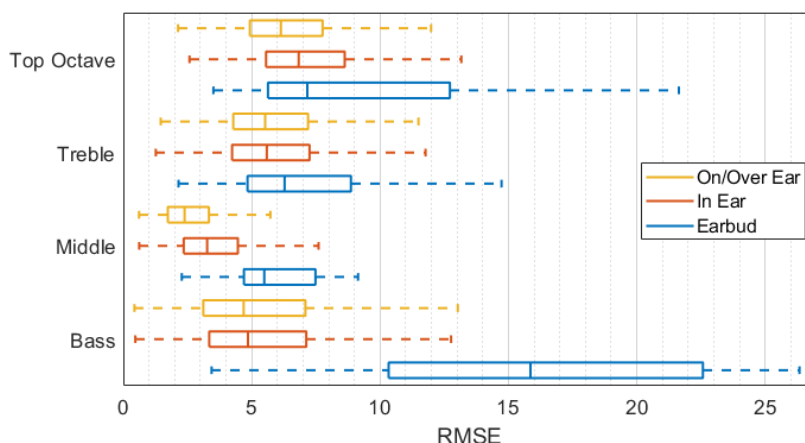
Τέλος, παρατηρείται πως το πεδίο τιμών spectral flatness διαφοροποιείται ανά κατηγορία. Καμία κατηγορία δεν εμφανίζει επίπεδη απόκριση συχνότητας καθώς η καμπύλη Harman που αποτελεί καμπύλη αναφοράς για όλα τα ακουστικά δεν είναι επίπεδη. Η κατηγορία earbud ακουστικών έχει τις μικρότερες τιμές, γεγονός που εξηγείται καθώς εμφανίζει αδυναμία αναπαραγωγής συχνοτήτων στα όρια του ακουστού φάσματος.



Σχήμα 2.3 Αποτελέσματα των ακουστικών για την παράμετρο spectral flatness.

Μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από το σχήμα 2.4 σε ποια κατηγορία και σε ποια περιοχή εμφανίζεται μεγαλύτερο το σφάλμα των αποκρίσεων με την Harman. Υπολογίζεται για το σύνολο των earbud ακουστικών πολύ μεγάλο σφάλμα ιδίως στην περιοχή των μπάσων συχνοτήτων και στην top octave περιοχή, όπου η ένταση και ευαισθησία των ακουστικών σε εκείνες τις συχνότητες είναι ανεπαρκής. Εμφανίζουν

μια μεμονωμένη κορυφή σύμφωνα με την ιδανική καμπύλη στη περιοχή Treble όπου το πεδίο τιμών του σφάλματος έχει μικρές τιμές. Οι υπόλοιπες κατηγορίες ακουστικών κυμαίνονται σε χαμηλές τιμές σφάλματος σε όλο το ακουστικό φάσμα.



Σχήμα 2.4 Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) μεταξύ Harman και αποκρίσεων συχνότητας ακουστικών.

### 3. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη και επεξεργασία των αποκρίσεων συχνότητας μιας μεγάλης βάσης δεδομένων με αποκρίσεις περισσότερων από 2500 ακουστικών.

Τα earbud ακουστικά αποτελούν τη λιγότερο αποδοτική κατηγορία ακουστικών με αδυναμία αναπαραγωγής στις πολύ υψηλές συχνότητες αλλά και στις μπάσες τόσο λόγω κατασκευής αλλά και τοποθέτησης πάνω στο αυτί με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγάλο σφάλμα σε εκείνες τις περιοχές καθώς διαφέρουν αρκετά με την καμπύλη Harman. Οι αποκρίσεις αυτών των ακουστικών παρουσιάζουν μικρές τιμές spectral spread και flatness καθώς στο φάσμα εντοπίζονται μεμονωμένες κορυφές που τα ακουστικά μπορούν να αναπαράγουν ικανοποιητικά τον ήχο κάνοντας τον αναπαραγόμενο ήχο να ακούγεται οξύς, χωρίς βάθος.

Λόγω κατασκευής και τοποθέτησης στην είσοδο του ακουστικού πόρου, τα ακουστικά της κατηγορίας in ear λειτουργούν αποδοτικά για το μέγεθος τους. Έχοντας μεγαλύτερη τιμή spectral centroid σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία, η χροιά του ήχου που αναπαράγεται από τα ακουστικά έχει μεγαλύτερη ζωντάνια αφού το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του φάσματος εμπεριέχεται σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Ταυτόχρονα, υπάρχει βελτίωση της απόδοσης στις περισσότερες περιοχές και το σφάλμα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, στις πολύ υψηλές συχνότητες εμφανίζεται μια μικρή μεταβολή που ισοδυναμεί με την αδυναμία των ακουστικών να αναπαράγουν αυτές τις συχνότητες.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την κατηγορία On/Over ear ακουστικών, συμπεραίνεται πως αποτελούν την ιδανικότερη κατηγορία ακουστικών ως προς την αναπαραγωγή ήχου λόγω της στιβαρής κατασκευής τους που περικλείει

όλο το αυτί παρέχοντας επαρκή απομόνωση από το περιβάλλον χωρίς να υπάρχουν απώλειες (leakage). Η ενέργεια του φάσματος μοιράζεται στο μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων ακόμα και στις πολύ υψηλές συχνότητες, για αυτό το λόγο η παράμετρος spectral centroid έχει και μεγαλύτερη τιμή από τα άλλα δύο είδη ακουστικών. Η spread έχει αρκετά μεγαλύτερη τιμή και σε συνδυασμό με υψηλότερο εύρος τιμών spectral flatness, προκύπτει πως τα ακουστικά έχουν μια πιο ήπια κατανομή χωρίς μεγάλες μεμονωμένες κορυφές στην απόκριση συχνότητας. Εντοπίζοντας το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του φάσματος μέχρι τις πολύ υψηλές συχνότητες, μπορεί να θεωρηθεί πως τα ακουστικά μπορούν να παρουσιάσουν αρκετά ζωντανό και πλούσιο ήχο σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες.

#### 4. Αναφορές

- [1] U. Horbach, “Characterizing the Frequency Response of Headphones—A New Paradigm,” May 2015. Accessed: Aug. 02, 2022. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=17698>
- [2] I. Engel, D. L. Alon, K. Scheumann, J. Crukley, and R. Mehra, “On the Differences in Preferred Headphone Response for Spatial and Stereo Content,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 70, no. 4, pp. 271–283, Apr. 2022.
- [3] B. Masiero and J. Fels, *Perceptually Robust Headphone Equalization for Binaural Reproduction*, vol. 2. 2012.
- [4] J. Pasanen, “AutoEQ.” Jul. 12, 2022. Accessed: Jul. 12, 2022. [Online]. Available: <https://github.com/jaakkopasanen/AutoEq>
- [5] “Audio Data Analysis Using Deep Learning with Python (Part 1),” *KDnuggets*. <https://www.kdnuggets.com/audio-data-analysis-using-deep-learning-with-python-part-1.html/> (accessed Jul. 14, 2022).
- [6] G. Peeters, “A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project,” Jan. 2004.
- [7] “NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods.” <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm> (accessed Jul. 14, 2022).
- [8] E. Georganti, T. May, S. Par, A. Härmä, and J. Mourjopoulos, *Single channel sound source distance estimation based on statistical and source specific features*, vol. 1. 2009.
- [9] S. Olive and T. Welti, “The Relationship between Perception and Measurement of Headphone Sound Quality,” Oct. 2012. Accessed: Jul. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16486>

## ***Αξιολόγηση πολυκαναλικής αναπαραγωγής τριδιάστατου ήχου σε περιβάλλον CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)***

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης<sup>1</sup>  
Μέλος ΕΔΙΠ  
[phatziantoniou@upatras.gr](mailto:phatziantoniou@upatras.gr)

Καμάρης Γαβριήλ<sup>1</sup>  
Ερευνητής  
[gpkamaris@upatras.gr](mailto:gpkamaris@upatras.gr)

Καλέρης Κωνσταντίνος<sup>1</sup>  
Μεταδιδακτορικός  
Ερευνητής

Μοιράγιας Γεώργιος<sup>1</sup>,  
Ερευνητής  
[yorgos.moiragias@gmail.com](mailto:yorgos.moiragias@gmail.com)

Ζάχος Παναγιώτης<sup>1</sup>  
Ερευνητής  
[panzaxos@gmail.com](mailto:panzaxos@gmail.com)

Αγοργιανίτης Σπυρίδων  
CEO/Realiscape  
[agorian@realiscape.ch](mailto:agorian@realiscape.ch)

Μουρτζόπουλος Ιωάννης<sup>1</sup>  
Καθηγητής  
[mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr)

<sup>1</sup>Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Εργ. Ενσύρματης Επικοινωνίας, Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης πλατφόρμας εκπαίδευσης στην κατάσβεση πυρκαγιών σε εικονικό περιβάλλον CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) [1][2], προσαρμόστηκαν εξειδικευμένες τεχνικές αναπαραγωγής πολυκαναλικού ήχου για την δημιουργία τριδιάστατου ηχητικού πεδίου σε συνθήκες φωτιάς. Οι εικονικές πηγές ήχου εξελίσσονται με δυναμικό τρόπο στο ηχοτοπίο που αναπαράγεται από την διάταξη ηχείων του συστήματος CAVE. Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας αναπαραγωγής του ηχοτοπίου, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες επεξεργασίας και απόδοσης των ηχητικών σημάτων με υλοποίηση βασισμένη σε τεχνικές VBAP [3] και Higher Order Ambisonics [4]. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διάταξη των ηχείων στο σύστημα CAVE και τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των εναλλακτικών μεθόδων, χωρικής αναπαραγωγής.

### ***Evaluation of 3D sound rendering in a Cave Automatic Virtual Environment (CAVE)***

#### **ABSTRACT**

During the development of an educational platform on fire fighting in a CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) [1][2], special multichannel audio reproduction techniques were used. The virtual sound sources are dynamic in time, and they create the soundscape that is reproduced by the sound system implemented in the CAVE. At the current study it is described the sound system, the techniques used for creation of the soundscape (VBAP and HOA) [3],[4] and finally the results of the perceptual quality tests of the sound system reproduction accuracy are presented.

## Εισαγωγή

Οι εφαρμογές εμπύθισης σε εικονική πραγματικότητα περιλαμβάνουν κυρίως συστήματα που βασίζονται είτε σε, προσαρμοσμένες στο ανθρώπινο κεφάλι, συσκευές προβολής (head-mounted displays) ή σε συστήματα πολλαπλών οθονών προβολής αυτόματου εικονικού περιβάλλοντος (Cave Automatic Virtual Environment, CAVE) [1].

Παρόλο που τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας βασίζονται κυρίως στην αναπαραγωγή και διαμόρφωση συνθετικής οπτικής πληροφορίας, είναι προφανές ότι ο βαθμός εμπύθισης και η πειστικότητα ενός τέτοιου συστήματος ενισχύεται σημαντικά με τη προσθήκη ηχητικής πληροφορίας. Υλοποιήσεις για συστήματα όπως το CAVE αφορούν αναπαραγωγή ήχου σε πραγματικούς χώρους (room-related) όπου για την ρεαλιστική εικονική απεικόνιση θέσης ακουστικών πηγών, ηχητικού υποβάθρου και σύνθεσης οπτικοακουστικών σεναρίων, απαιτείται χρήση πολυκαναλικών συστημάτων και πολλαπλών ηχείων [2].

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης πλατφόρμας εκπαίδευσης στην κατάσβεση πυρκαγιών σε εικονικό περιβάλλον CAVE (με την ονομασία Virtual reality Simulator for Training Against Fires, VSTAF), προσαρμόστηκαν εξειδικευμένες τεχνικές αναπαραγωγής πολυκαναλικού ήχου για την δημιουργία τρισδιάστατου ηχητικού πεδίου σε συνθήκες φωτιάς (καύση διαφόρων υλικών, εξάπλωση πυρκαγιάς, εκρήξεις εύφλεκτων υλικών κ.α.). Η υλοποίηση βασίστηκε σε λογισμικό επεξεργασίας και αναπαραγωγής τρισδιάστατου ήχου, θέτοντας τις εικονικές πηγές ήχου, που εξελίσσονται με δυναμικό τρόπο στο ηχοτοπίο το οποίο αναπαράγεται από την διάταξη ηχείων του συστήματος CAVE. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκαν οι δυνατότητες επεξεργασίας και απόδοσης των ηχητικών σημάτων με υλοποίηση βασισμένη σε τεχνικές Vector-Based Amplitude Panning (VBAP) [3] και Higher Order Ambisonics (HOA) [4].

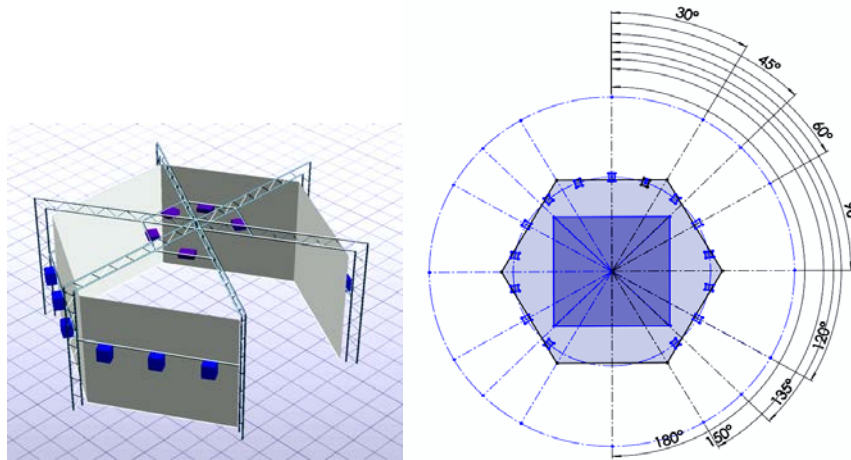
Συνοπτικά οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση α) της υλοποιημένης πολυκαναλικής διάταξης ηχητικής αναπαραγωγής β) των αποτελεσμάτων συγκριτικής αξιολόγησης του υλοποιημένου ηχητικού πεδίου, (μέσω των μεθόδων χωρικής αναπαραγωγής VBAP και Ambisonics 3ης και 5ης τάξης), ως προς την αξιοπιστία αναπαραγωγής του ηχοτοπίου και τη σταθερότητα των ηχητικών ειδώλων.

### 1. Περιγραφή υλοποιημένου συστήματος πολυκαναλικής διάταξης ηχείων σε περιβάλλον CAVE

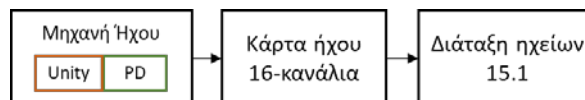
Προκειμένου να επιτευχθεί στο εικονικό περιβάλλον CAVE το απαιτούμενο επίπεδο ακουστικού ρεαλισμού, η ανακατασκευή του τρισδιάστατου ηχοτοπίου βασίστηκε στην εγκατάσταση μίας διάταξης 15 ενεργών ηχείων μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων (επιλέχθηκαν τα KRK RokIt RP5 G4) και δύο ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer - KRK 10S2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Ο αριθμός των ηχείων και η διάταξη τους αντιστοιχεί σε τεχνολογία Ambisonics 7ης τάξης ( $2*N+1$  ηχητικές πηγές τοποθετημένες μόνο στο οριζόντιο επίπεδο, όπου N η τάξη των Ambisonics). Συγκεκριμένα, τα ηχεία μεσαίων-υψηλών συχνοτήτων είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα κύκλο περιμετρικά της διάταξης CAVE και ορίζουν ένα οριζόντιο επίπεδο σε ύψος 1.70 μ από το δάπεδο (μέσο ύψος του κεφαλιού του

χρήστη). Το κεντρικό ηχείο βρίσκεται στο κέντρο της μεσαίας (κεντρικής) οθόνης και τα υπόλοιπα διατάσσονται ανά 20 μοίρες εκατέρωθεν του κεντρικού ηχείου καλύπτοντας τις πλευρές όπου υπάρχουν οθόνες προβολής. Κατά αυτό τον τρόπο, η ακουστική διάταξη περιλαμβάνει ηχητικές πηγές στις περιοχές από όπου ο χρήστης δέχεται οπτικά - άρα και ακουστικά ερεθίσματα - ενώ δεν περιλαμβάνει ηχητικές πηγές στην περιοχή όπου αυτά απουσιάζουν.

Η βασική δομή του συστήματος ήχου της πλατφόρμας VSTAF φαίνεται στο Σχήμα 1.2 και αποτελείται από ένα ειδικά ανεπτυγμένο λογισμικό διαχείρισης και αναπαραγωγής ηχητικών σημάτων (μηχανή ήχου - audio engine), την κάρτα ήχου και την διάταξη των ηχείων στο χώρο. Η μηχανή ήχου του συστήματος, που βασίζεται σε λογισμικό Unity [5] και Pure Data [6], μετατρέπει μονοφωνικά αρχεία τύπου .wav και δημιουργεί στην έξοδο σήματα 16 καναλιών για αναπαραγωγή σε πραγματικό χρόνο. Τα ηχητικά δείγματα πυρκαγιάς και πυρόσβεσης προκύπτουν από αρχεία που περιλαμβάνονται σε βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου, τα οποία ενσωματώνονται στην εφαρμογή VR Unity, και ενεργοποιούνται σύμφωνα με τα σενάρια της αλληλεπίδρασης του χρήστη με το περιβάλλον εκπαίδευσης. Η επιλογή των κατάλληλων δειγμάτων ήχου προέκυψαν από δυο κριτήρια: 1) τη φάση εξέλιξης της πυρκαγιάς και 2) την κατηγοριοποίηση των ειδών πυρκαγιάς σύμφωνα με το εθνικό (NHS 10/1971) αλλά και διεθνή πρότυπα.



Σχήμα 1.1 (α) Διάταξη ηχείων ανά γωνία 20° μοιρών περιμετρικά του συστήματος CAVE. (β) Κάτοψη διάταξης όπου φαίνονται οι γωνίες του ηχητικού ειδώλου και η περιοχή πιθανών θέσεων ακρόασης (σκιασμένο τετράγωνο)

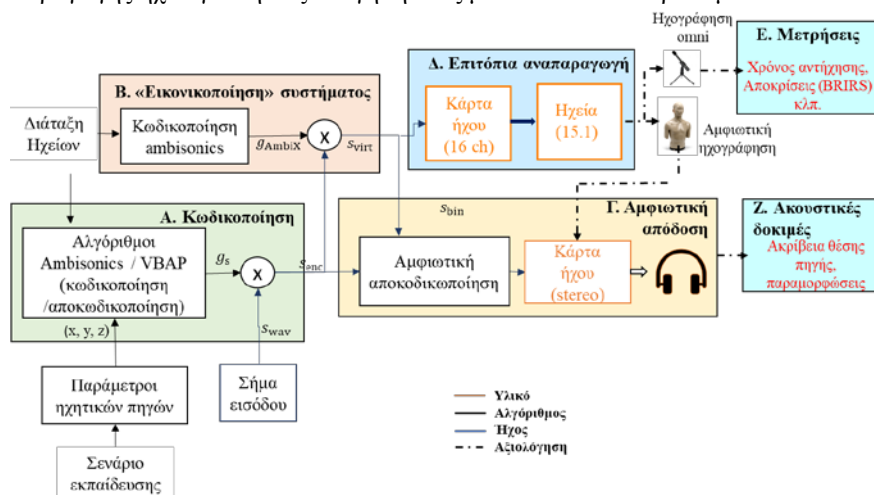


Σχήμα 1.2 Βασική δομή συστήματος ήχου της πλατφόρμας V-STAF

## 2. Λογισμικό αναπαραγωγής και αξιολόγησης αλγορίθμων χωρικής αναπαραγωγής ήχου

Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου χωρικής αναπαραγωγής ήχου για την ανάπτυξη της μηχανής ήχου του VSTAF βασίστηκε στην θεωρητική ανάλυση και υλοποίηση, σε λογισμικό, των αλγορίθμων VBAP και Ambisonics 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> τάξης. Θεωρήθηκε δε, αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδου ελεγχόμενης αξιολόγησης των αλγορίθμων σε ιδανικές, αντίστοιχες διατάξεις αναπαραγωγής, μέσω εικονικών δοκιμών αμφιωτικής (binaural) ακρόασης με ακουστικά.

Το λογισμικό αξιολόγησης λειτουργεί σε μη πραγματικό χρόνο και υποστηρίζει ηχητική αναπαραγωγή σε προκαθορισμένα σενάρια. Τα σενάρια αυτά σχεδιάστηκαν ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για τα δυναμικά σενάρια εκπαίδευσης στην πυρόσβεση που είναι και η κύρια χρήση της πλατφόρμας VSTAF, εξασφαλίζοντας την αντικειμενικότητα των πειραματικών αξιολογήσεων. Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα «εικονικοποίησης» (virtualization) πραγματικών συστημάτων χωρικής αναπαραγωγής ήχου για την αξιολόγησή τους μέσω εικονικών προσομοιώσεων.



Σχήμα 2.1 Γενική δομή μεθοδολογίας ηχητικής αναπαραγωγής, αξιολόγησης και «εικονικοποίησης» τρισδιάστατου (χωρικού) ήχου

Η μεθοδολογία για την αναπαραγωγή και αξιολόγηση τρισδιάστατου ήχου βασίζεται στη δομή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Το λογισμικό προετοιμασίας των ηχητικών σημάτων και αξιολόγησης των διαφορετικών τεχνικών τρισδιάστατης απόδοσης αποτελείται από 3 στάδια (σημειώνονται στο Σχήμα 2.1 ως Α, Β, Γ):

Στο Στάδιο Α (κωδικοποίηση), οι υπό εξέταση αλγόριθμοι (VBAP, ambisonics 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> τάξης) δέχονται ως εισόδους τις συντεταγμένες των εικονικών πηγών ήχου μέσα στο εικονικό περιβάλλον που έχει καθοριστεί από το οπτικό σενάριο Εικονικής Πραγματικότητας (VR), καθώς και το αζιμούθιο των ηχείων στην πραγματική εγκατάσταση. Από κάθε τεχνική προκύπτει για κάθε ηχητική πηγή ένα διάλυμα 16 συντελεστών κέρδους  $g_s$ , που αντιστοιχούν στα κέρδη των ηχείων του πραγματικού συστήματος. Το διάλυμα κέρδους πολλαπλασιάζεται με τα μονοφωνικά ηχητικά δεδομένα  $s_{wav}$  της εικονικής πηγής.



Το Στάδιο Β της «εικονικοποίησης» του συστήματος, επιτρέπει την «εικονική» αξιολόγηση της απόδοσης τρισδιάστατου ήχου στο πραγματικό σύστημα CAVE, μέσω αμφιωτικής ακρόασης. Για την «εικονικοποίηση» του συστήματος και την εικονική αξιολόγησή του, τα ηχεία του πραγματικού συστήματος αντιμετωπίζονται ως δευτερογενείς εικονικές ηχητικές πηγές, κωδικοποιημένες με τον αλγόριθμο Ambisonics 3<sup>ης</sup> ή 5<sup>ης</sup> τάξης με βάση τις συντεταγμένες και το αζιμούθιο τους στην πραγματική εγκατάσταση. Το παραγόμενο διάνυσμα  $g_{AmbiX}$  πολλαπλασιάζεται με κάθε ένα από τα 16 κανάλια  $s_{wav,i}$  των κωδικοποιημένων σημάτων που προκύπτουν από το στάδιο Α και παράγονται τα σήματα  $s_{virt,i}$  για κάθε ηχείο  $i$  (1 έως 15). Στη συνέχεια, τα σήματα εισάγονται στο στάδιο της αμφιωτικής απόδοσης του Σταδίου Γ.

Η ροή επεξεργασίας ΑΓ αποτελεί το λογισμικό αξιολόγησης κωδικοποιήσεων τρισδιάστατου ήχου, ενώ με την προσθήκη της διαδικασίας Β, η ροή ΑΒΓ αποτελεί το λογισμικό εικονικής αξιολόγησης της διάταξης ηχητικής αναπαραγωγής στο σύστημα CAVE. Στο Στάδιο Γ (binaural rendering) γίνεται η συνέλιξη του κάθε καναλιού με τις αντίστοιχες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις (HRIR) και τα σήματα ομαδοποιούνται ώστε να αποδίδονται σε Αριστερό και Δεξί κανάλι

### 3. Ακουστικές μετρήσεις και ηχογραφήσεις

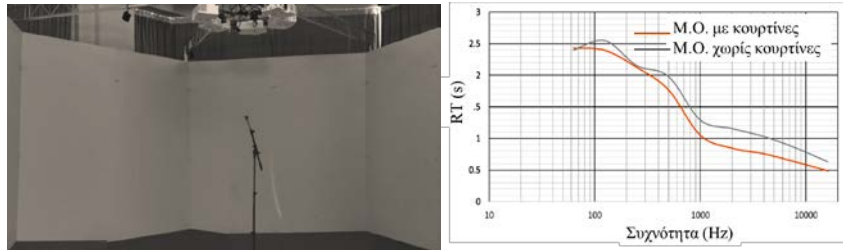
Στο πλαίσιο του ελέγχου και της αξιολόγησης της ηχητικής εγκατάστασης και των αλγορίθμων επεξεργασίας ήχου μετρήθηκαν οι κρουστικές αποκρίσεις των ηχείων τοποθετημένα στις προβλεπόμενες θέσεις πάνω στο σύστημα CAVE (Σχήμα 1.1), σε συνδυασμό με το χώρο εγκατάστασης του CAVE. Η διαδικασία αυτής της μέτρησης υποδηλώνεται στη γενική δομή μεθοδολογίας ηχητικής αναπαραγωγής, αξιολόγησης και «εικονικοποίησης» τρισδιάστατου (χωρικού) ήχου (Σχήμα 2.1) ως Στάδια Δ και Ε. Σκοπός των μετρήσεων κρουστικής απόκρισης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης του χώρου στην ποιότητα αναπαραγωγής της απαιτούμενης ηχητικής πληροφορίας μέσα στην εγκατάσταση.

Στη δομή του Σχήματος 2.1, επίσης, εμφανίζεται και το Στάδιο Ζ, όπου υποδηλώνεται ο έλεγχος της ακουστικής του αναπαραγόμενου ήχου στο χώρο εγκατάστασης μέσω αμφιωτικής ακρόασης. Για την επίτευξη αυτής της διαδικασίας, πραγματοποιήθηκαν ηχογραφήσεις αναπαραγωγής ριπών λευκού θορύβου με τη χρήση αμφιωτικής διάταξης μικροφώνων (GRAS KEMAR HATS system [7]) με το δέκτη να βρίσκεται σε διαφορετικές θέσεις καλύπτοντας ένα πλέγμα 15 πιθανών σημείων ακρόασης και με το ηχητικό είδωλο να κινείται περιμετρικά στο χώρο (σύνολο 16 θέσεις).

#### 3.1 Ακουστικές μετρήσεις στο χώρο εγκατάστασης του CAVE

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων κρουστικών αποκρίσεων ανά ηχείο, χρησιμοποιήθηκε παντοκατευθυντικό μικρόφωνο τοποθετημένο στο κέντρο της κατασκευής και σε ύψος 1,7m από το έδαφος (Σχήμα 3.1 (α)). Ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε σήμα λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου (logarithmic sine sweep) διάρκειας 10s και εύρους σάρωσης από 30Hz – 20kHz, σε συχνότητα δειγματοληψίας 44.100Hz. Η Στάθμη Ηχητικής Πίεσης της πηγής ορίστηκε

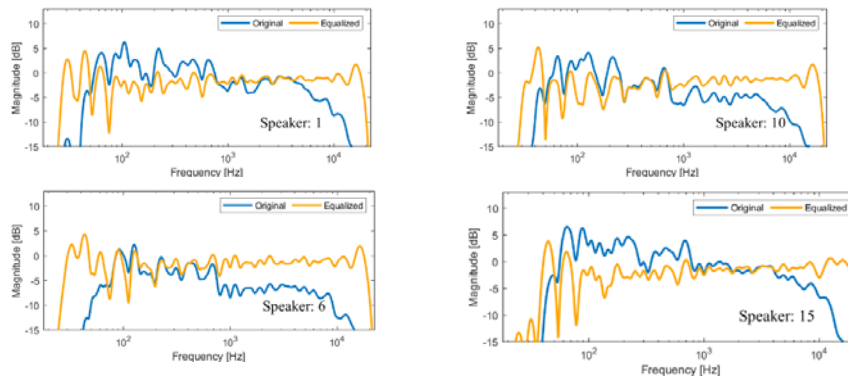
χρησιμοποιώντας σαν αναφορά το πρώτο ηχείο στα 85dB SPL στο ένα μέτρο με σήμα ροζ θορύβου.



Σχήμα 3.1 (α) Η διάταξη στο χώρο κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων.  
(β) Ο μέσος όρος του χρόνου αντήχησης στην ιδανική θέση ακρόασης μέσα στο CAVE

Ο χρόνος αντήχησης (ως μέσος όρος από όλες τις πηγές) στο χώρο (Σχήμα 3.1 (β)) για συχνότητες κάτω από 1kHz αυξάνεται αρκετά και παραμένει σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Ο χρόνος αντήχησης για τέτοιες εφαρμογές πρέπει να έχει τιμές στην περιοχή 0.5-1.2s σε όλο το φάσμα [8].

Οι κρουστικές αποκρίσεις, επίσης, χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό αντίστροφων φίλτρων για την ισοστάθμιση και διόρθωση της ακουστικής στο χώρο. Στο Σχήμα 3.2 εμφανίζονται ενδεικτικά οι κρουστικές αποκρίσεις και η διόρθωσή τους, για 4 ηχεία της διάταξης (1, 6, 10, 15). Τα ηχεία αριθμούνται, αριστερόστροφα, από κάτω δεξιά προς κάτω αριστερά (βλ. κάτοψη Σχήματος 1.1 (β)).



Σχήμα 3.2 Ενδεικτικές αποκρίσεις φασματικής απόκρισης 4 ηχείων/χώρου της διάταξης. Τα ηχεία αριθμούνται, αριστερόστροφα, από κάτω δεξιά προς κάτω αριστερά (βλ. κάτοψη Σχήματος 1.1 (β)).

### 3.2 Αμφιωτικές ηχογραφήσεις ριπών λευκού θορύβου

Για την αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας και τοποθέτησης του ηχητικού ειδώλου στο ηχητικό πεδίο, έγιναν ηχογραφήσεις ριπών λευκού θορύβου μέσα στο σύστημα CAVE. Το αρχικό δείγμα αποτελείται από ένα σήμα λευκού

θορύβου διάρκειας 5 δευτερολέπτων το οποίο περιέχει 5 επαναλήψεις από ριπές ενός δευτερολέπτου και με duty cycle 50%, δηλαδή ένα σύνολο 5 ριπών. Το αρχικό αυτό σήμα επεξεργάζεται από τους 3 αλγόριθμους και τοποθετείται, ως εικονικό ηχητικό είδωλο, σε 16 γωνίες περιμετρικά (όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.1(β)). Επίσης τα σύνολο των σημάτων αυτών ηχογραφήθηκε με και χωρίς ισοστάθμιση των ηχείων, σε ένα σύνολο 13 θέσεων, στην θέση ιδανικής ακρόασης (βλ. κέντρο του CAVE στο Σχήμα 1.1(β)) και γύρω από αυτή. Η ηχογράφηση έγινε με την αμφιωτική διάταξη μικροφώνων [7] και στην ιδανική θέση ακρόασης έγιναν συμπληρωματικές μετρήσεις με ανοιχτές και κλειστές κουρτίνες.



Σχήμα 3.3: Η αμφιωτική διάταξη [7] που χρησιμοποιήθηκε για τις ηχογραφήσεις

Η ηχογράφηση έγινε με αυτόματο τρόπο για κάθε πιθανή θέση ακρόασης, για αυτό το λόγο τα δείγματα που ηχογραφήθηκαν χρειάστηκε να επεξεργαστούν και να τεμαχιστούν για να διαχωριστούν μεταξύ τους οι θέσεις του ηχητικού ειδώλου (16) οι αλγόριθμοι (3) και η περίπτωση της ισοστάθμισης των ηχείων και μη (2). Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν συνολικά 1248 ηχητικά δείγματα προς επεξεργασία. Τα δείγματα που ηχογραφήθηκαν στην ιδανική θέση ακρόασης (σύνολο 96) είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν έπειτα για την διεξαγωγή του υποκειμενικού τεστ ακρόασης. Τα υπόλοιπα σήματα εισάγονται σε αλγόριθμο υπολογισμού της απόκλισης του ηχητικού ειδώλου από την θεωρητική θέση στο ακουστικό πεδίο [9] και με αυτό τον τρόπο αναλύονται με αυτόματο τρόπο.

#### **4. Αποτελέσματα υποκειμενικής δοκιμής (test) ακρόασης και συμπεράσματα**

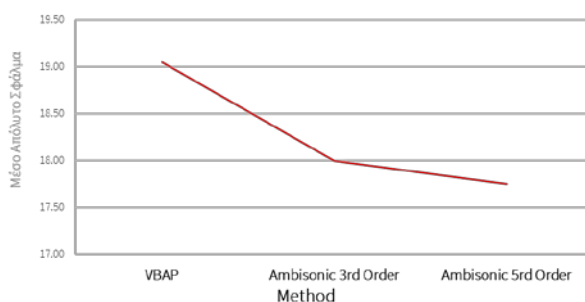
Για την αξιολόγηση των μεθόδων πραγματοποιήθηκε μία υποκειμενική δοκιμή (test) ακρόασης [10] υλοποιημένη στην πλατφόρμα webMUSHRA [11], με 2 σενάρια ελέγχου. Ο σκοπός της αξιολόγησης ήταν η διερεύνηση της ακρίβειας της τοποθέτησης του ηχητικού ειδώλου στην εγκατάσταση του CAVE, σε συνάρτηση με τον εφαρμοζόμενο αλγόριθμο τρισδιάστατης ηχητικής αναπαραγωγής (VBAP, Ambisonics 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> τάξης) και τη συνεισφορά ή μη της ισοστάθμισης των ηχείων. Ο χρήστης σε κάθε σελίδα της δοκιμής ακούει δείγματα ήχου για διαφορετικές γωνίες του ηχητικού ειδώλου που εμφανίζονται με τυχαίο τρόπο κάθε φορά και σηματοδεύει πάνω σε ένα κλίμακα την κατεύθυνση στην οποία εντοπίζει το ηχητικό είδωλο. Στη συνέχεια, η εναλλαγή των ηχητικών δειγμάτων σχετίζεται με την χρήση ισοστάθμισης ηχείων και μη.

Ο χρήστης στις 2 πρώτες σελίδες είχε σήματα αναφοράς ώστε να δημιουργηθεί η αντίληψη του χώρου. Τα διαθέσιμα δείγματα ορίζουν το ακουστικό κέντρο (0

μοίρες) και τις γωνίες 90 μοίρες αριστερά και δεξιά του χρήστη. Αυτά τα δείγματα ήταν άμεσα προσβάσιμα από τον χρήστη ανά πάσα στιγμή ως σήματα αναφοράς για να μπορέσει ο χρήστης αν χρειαστεί να συγκρίνει αυτό που ακούει με σταθερές αναφορές.

Στο τεστ έλαβαν μέρος 11 έμπειροι ακροατές, εκ των οποίων οι 9 ήταν άνδρες και οι 2 γυναίκες. Για την αμφιωτική αναπαραγωγή των ηχητικών δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ακουστικά ήμι-ανοιχτού τύπου που καλύπτουν ολόκληρο το αυτί (circum aural semi-closed headphones) συνδεδεμένα σε κάρτα ήχου στον Η/Υ (βλ. Σταδια Γ,Ζ στο σχήμα 2). Η ένταση έχει μια αρχική ρύθμιση αλλά ο κάθε ακροατής έχει την δυνατότητα να την προσαρμόσει στις ανάγκες του.

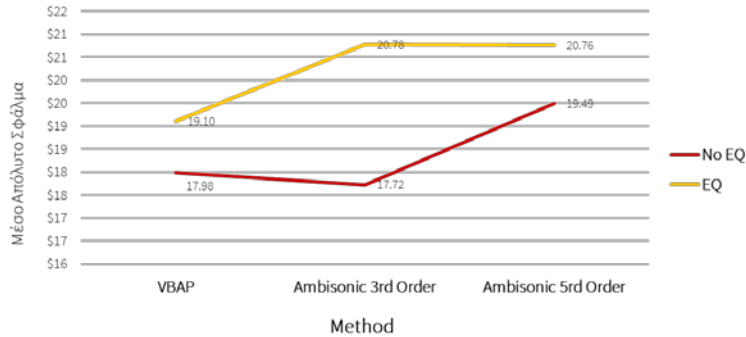
Τα αποτελέσματα του τεστ αναλύθηκαν με την μέθοδο ANOVA για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Ως εξαρτημένη μεταβλητή θεωρήθηκε το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error) εκτίμησης της γωνίας του ηχητικού ειδώλου σε μοίρες και ως εξαρτημένες μεταβλητές εξετάστηκαν α. οι 3 διαφορετικές μέθοδοι, β. η χρήση ισοστάθμισης ή όχι, γ. η σύγκυση εμπρόσθιου με οπίσθιο εντοπισμό του ηχητικού ειδώλου και δ. η πραγματική γωνία του ειδώλου.



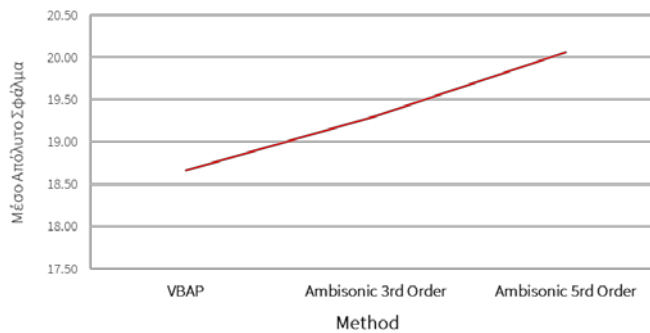
Σχήμα 3.4: Το μέσο απόλυτο σφάλμα εκτίμησης της γωνίας του ειδώλου σε σχέση με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε

Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται το μέσο απόλυτο σφάλμα ανάμεσα στις τρεις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι πολύ μικρές, της τάξης των 2 μοιρών αλλά παρά όλα αυτά φαίνεται να επιβεβαιώνεται ότι οι μέθοδοι ambisonics έχουν καλύτερη ακρίβεια και επίσης όσο ανεβαίνει η τάξη τόσο αυξάνεται η ακρίβεια εντοπισμού. Πρέπει να διευκρινιστεί επίσης ότι το σύστημα χρησιμοποιεί μια διάταξη ηχείων η οποία δεν είναι συμμετρική και βρίσκεται μόνο στο οριζόντιο επίπεδο. Η μικρή σημασία των διαφορών μεταξύ των μεθόδων επιβεβαιώνεται και από τις παραμέτρους της στατιστικής ανάλυσης όπως είναι ο δείκτης significance που λαμβάνει τιμές 0.585 τιμή η οποία είναι αρκετά μεγάλη.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται το μέσο απόλυτο σφάλμα για ισοσταθμισμένα ηχεία και μη ισοσταθμισμένα στοιχεία. Η απόκλιση είναι 1-3 μοίρες και βλέπουμε μια σταθερή τάση μικρότερου σφάλματος στα μη ισοσταθμισμένα ηχεία. Εδώ μπορούμε να υποθέσουμε ότι η διαδικασία της ισοστάθμισης εκτός από το πλάτος έχει επιφέρει αλλαγές και στη φάση του σήματος οπότε και η θέση του ηχητικού ειδώλου έχει επηρεαστεί κατά το ελάχιστο. Ωστόσο κι εδώ φαίνεται ότι οι διαφορές δεν κρίνεται ότι είναι στατιστικά σημαντικές.



Σχήμα 3.5: Το μέσο απόλυτο σφάλμα εκτίμησης της γωνίας του ειδώλου σε σχέση με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε και την χρήση ή όχι ισοστάθμισης στα ηχεία

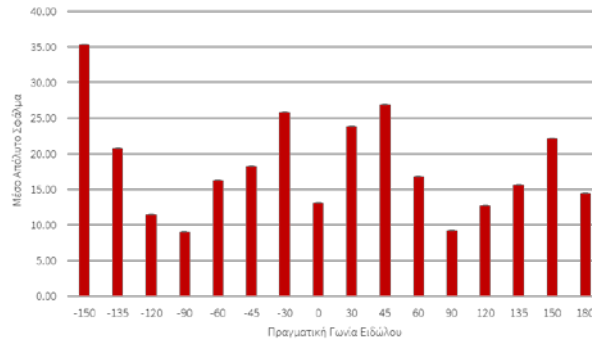


Σχήμα 3.6: Το μέσο απόλυτο σφάλμα εκτίμησης της γωνίας του ειδώλου σε σχέση με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε και την σύγκριση εμπρόσθιου με οπίσθιο εντοπισμό του ηχητικού ειδώλου.

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται το μέσο απόλυτο σφάλμα ανάμεσα στις μεθόδους για την σύγκριση εμπρόσθιας με οπίσθια θέση ηχητικού ειδώλου. Εδώ φαίνεται ότι η μέθοδος VBAP έχει το μικρότερο ποσοστό σύγχυσης ενώ οι μέθοδοι ambisonics παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές. Αυτό δικαιολογείται και θεωρητικά μιας και η μέθοδος VBAP αναπαράγει σήμα μόνο στις ηχητικές πηγές όπου παρουσιάζεται το είδωλο ενώ οι μέθοδοι ambisonics παράγουν ένα συνολικό ηχητικό πεδίο στο οποίο αναπόφευκτα θα υπάρχει ηχητικό σήμα σε όλες τις ηχητικές πηγές, το γεγονός αυτό επηρεάζει την ακρίβεια εντοπισμού του ειδώλου όσον αφορά την εμπρόσθια και οπίσθια παρουσία του. Ο δείκτης significance της στατιστικής ανάλυσης εδώ παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή (0.352) και δείχνει ότι είναι η πιο σημαντική παράμετρος αξιολόγησης των μεθόδων.

Τέλος στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το μέσο απόλυτο σφάλμα για τις διάφορες γωνίες. Όπως φαίνεται το μικρότερο σφάλμα παρουσιάζεται για ηχητικό είδωλό που βρίσκεται κεντρικά ή σε 90 μοίρες. Οι ενδιάμεσες γωνίες παρουσιάζουν σχετικά αυξημένες τιμές σφάλματος. Εδώ οι διαφορές είναι μεγάλες και από την στατιστική ανάλυση ο δείκτης significance παίρνει τιμή μικρότερη από 0.001 και μας δείχνει ότι οι διαφορές αυτές είναι στατιστικά σημαντικές. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με την γωνία του ηχητικού ειδώλου μπορεί να παράγεται σφάλμα ως και

25 μοίρες μεγαλύτερο από το ελάχιστο μέσο σφάλμα (π.χ. -90 μοίρες μια -150 μοίρες) και ότι η διαφορά αυτή έχει 99.9% πιθανότητα να εμφανιστεί (1.000-0.001).



Σχήμα 3.7: Το μέσο απόλυτο σφάλμα εκτίμησης της γωνίας του ειδώλου σε σχέση με την πραγματική γωνία του ειδώλου.

## 5. Αναφορές

[1] Nasyrov, R.R.; Excell, P.S. Creation of Interactive Virtual Reality Scenarios as a Training and Education Tool. In *Technology, Design and the Arts-Opportunities and Challenges*; Earnshaw, R., Liggett, S., Excell, P., Thalmann, D., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020; pp. 353–369. ISBN 978-3-030-42097-0

[2] Gardner, William G. "3D audio and acoustic environment modeling." *Wave Arts, Inc* 99 (1999).

[3] Pulkki, Ville. "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning." *Journal of the audio engineering society* 45.6 (1997): 456-466.

[4] Zotter, Franz, and Matthias Frank. "All-round ambisonic panning and decoding." *Journal of the audio engineering society* 60.10 (2012): 807-820.

[2] Zotter, Franz, and Matthias Frank. *Ambisonics: A practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, and virtual reality*. Springer Nature, 2019.

[5] Haas, J. K. (2014). *A history of the unity game engine*

[6] Pure Data. (2020). version 0.51-1. Institute of Electronic Music and Acoustics Inffeldgasse, A-8010 Graz, Austria.

[7] GRAS KEMAR - <https://www.grasacoustics.com/products/head-torso-simulators-kemar>

[8] F. Alton Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, TAB books, McGraw-Hill, 1994.

[9] Kamaris, Gavriil, and John Mourjopoulos. "Stereo image localization maps for loudspeaker reproduction in rooms." *Audio Engineering Society Convention* 144. Audio Engineering Society, 2018.

[10] Bech, Søren, and Nick Zacharov. *Perceptual audio evaluation: theory, method and application*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

[11] Schoeffler, Michael, et al. "webMUSHRA—A comprehensive framework for web-based listening tests." *Journal of Open Research Software* 6.1 (2018).

## ***Αναπαραγωγή ήχου μέσω οπτοακουστικής μετατροπής πλάσματος λέιζερ***

Καλέρης Κωνσταντίνος<sup>1,2,\*</sup>, Παπαδογιάννης Νεκτάριος<sup>1,2</sup>, Τρίμις Δημοσθένης<sup>3</sup>,  
Μουρτζόπουλος Ιωάννης<sup>4</sup>

[\\*kkaleris@hmu.gr](mailto:*kkaleris@hmu.gr)

- <sup>1</sup> Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100 Τρία Μοναστήρια, Ρέθυμνο
- <sup>2</sup> Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμ Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133 Περιβόλια, Ρέθυμνο
- <sup>3</sup> Engler-Bunte-Institute, Karlsruhe Institute of Technology, 76131 Καρλσρούη
- <sup>4</sup> Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου & Ακουστικής, Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Ρίο, Πάτρα

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία αποτελεί επισκόπηση του πεδίου της αναπαραγωγής σύνθετων συνεχών ακουστικών σημάτων μέσω οπτοακουστικής μετατροπής λέιζερ, η οποία επιτυγχάνεται με δημιουργία πλάσματος στον ατμοσφαιρικό αέρα και στερεούς στόχους από ισχυρούς βραχείς ή υπερβραχείς οπτικούς παλμούς. Παρουσιάζεται πρότυπο σύστημα αναπαραγωγής σύνθετων συνεχών ηχητικών σημάτων από παλμοσειρές λέιζερ καθώς και υπολογιστικά εργαλεία περιγραφής της ακουστικής απόκρισης των συστημάτων, τα οποία αναπτύχθηκαν από το Πανεπιστημίου Πατρών (ΠΠ) σε συνεργασία με το Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Καρλσρούης (KIT). Παρουσιάζονται επίσης πειραματικά αποτελέσματα μαζί με δύο φαινομενολογικά μοντέλα περιγραφής της ακουστικής εκπομπής των πηγών πλάσματος λέιζερ που αναπτύχθηκαν από συνεργασία του ΠΠ με το Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο (ΕΛΜΕΠΑ). Τέλος, γίνεται συζήτηση σχετικά με τις δυνατότητες της προτεινόμενης νέας τεχνολογίας και τα πιθανά επιστημονικά και τεχνολογικά πεδία εφαρμογής της.*

### ***Sound reproduction via laser-plasma optoacoustic transduction***

### **ABSTRACT**

This work constitutes a review of the field of the reproduction of complex continuous acoustic signals via laser optoacoustic transduction achieved by plasma generation in the atmospheric air or on solid targets by strong short or ultrashort optical pulses. A prototype system for reproducing complex continuous audio signals from laser pulse trains is presented as well as a computational tool for describing the acoustic response of the system, developed by the University of Patras (UP) in collaboration with the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Moreover, experimental results along with two phenomenological models are presented for the description of the acoustic emission of laser plasma sources. The models were developed by the collaboration of the UP with the Hellenic Mediterranean University

(HMU). Finally, discussion is carried out about the possibilities of the proposed new technology and its possible scientific and technological areas of application.

## Εισαγωγή

Οι ιδανικές ακουστικές πηγές ήχου, όπως παραδείγματος χάριν οι άυλες σημειακές ή γραμμικές πηγές και οι πηγές με ελεγχόμενα χωρικά και φασματικά χαρακτηριστικά εκπομπής, παρότι έχουν μελετηθεί διεξοδικά στο παρελθόν, αποτελούσαν μέχρι πρόσφατα θεωρητικές κατασκευές χωρίς πραγματικό τεχνολογικό αποτύπωμα. Αυτό συνέβαινε, διότι η επικρατούσα ηλεκτρομηχανική τεχνολογία οδηγεί σε ογκώδη και μη-αποδοτικά συστήματα αναπαραγωγής ήχου με χαρακτηριστικά που απέχουν κατά πολύ από αυτά των ιδανικών ακουστικών πηγών. Ο φυσικός μηχανισμός πίσω από την ηλεκτρομηχανική μετατροπή δεν αφήνει σημαντικά περιθώρια για βελτιώσεις της τεχνολογίας, η οποία έχει εμφανίσει πρόοδο μόνο μέσω σχεδιαστικών βελτιστοποιήσεων και χάρη στη χρήση μοντέρνων υλικών. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η ενεργειακή τους απόδοσή που δεν μπορεί να ξεπεράσει το 5% [1], καθώς και η χρήση κινούμενων επιφανειών, η οποία αφενός επιφέρει ανεπιθύμητη μη-ελεγχόμενη εξάρτηση της κατευθυντικότητας της ακουστικής εκπομπής από την συχνότητα, αφετέρου εισάγει αρμονική παραμόρφωση σχετιζόμενη με μηχανικές παραμορφώσεις της επιφάνειας.

Πρόσφατα προτάθηκε από ομάδες στις οποίες συμμετέχουν οι συγγραφείς του παρόντος άρθρου μια νέα τεχνολογία αναπαραγωγής συνεχών και σύνθετων ακουστικών σημάτων με τη χρήση πηγών πλάσματος λέιζερ [2,3]. Οι πηγές ήχου πλάσματος λέιζερ είναι γνωστές από το 1964 [4], λίγα μόλις χρόνια μετά την ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων λέιζερ, και προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό τις θεωρητικές ιδανικές πηγές ήχου καθώς είναι πρακτικά άυλες, ενώ η γεωμετρία τους, η οποία μπορεί να είναι σφαιρική ή κυλινδρική ανάλογα με τις συνθήκες εστίασης της οπτικής ακτινοβολίας, μπορεί να έχει ακτίνα της τάξης των λίγων χιλιοστών έως και μερικών εκατοντάδων μικρομέτρων [5]. Επιπλέον, οι πηγές αυτές μπορούν να έχουν εξαιρετικά βραχεία απόκριση στο πεδίο του χρόνου και εξαιρετικά ευρύ φάσμα στο πεδίο της συχνότητας, που εκτείνεται από τις πολύ χαμηλές συχνότητες έως και τους υπερήχους. Επίσης, εμφανίζουν καλή επαναληψιμότητα για ίδιες συνθήκες οπτικής διέγερσης. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους, οι ακουστικές πηγές πλάσματος λέιζερ παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν αποδοτικά σε επιστημονικές και τεχνολογικές εφαρμογές από τη μακροκλίμακα ως τη μικροκλίμακα και σε ένα μεγάλο εύρος ακουστικών συχνοτήτων. Ενδεικτικό είναι ότι η τεχνολογία ήδη υιοθετήθηκε για βιοϊατρική εφαρμογή [6].

Η εργασία αυτή παρουσιάζει ερευνητικά αποτελέσματα από την μελέτη των πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ και της αναπαραγωγής, μέσω αυτών, σύνθετων συνεχών ακουστικών σημάτων. Η έρευνα είναι προϊόν συνεργασίας της ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής (AudioGroup) του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών με την ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Laser (IPPL) και του Εργαστηρίου Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου καθώς και με την ομάδα του Ινστιτούτου Engler-Bunte (EBI) του Τεχνολογικού Ινστιτούτου της Καρλσρούης. Αφετηρία για την έρευνα



αποτελέσαν οι παρουσιάσεις των δύο ελληνικών ομάδων σε συνέδρια του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής.

Πέραν του φυσικού υποβάθρου που δίνεται στην ενότητα 1, παρουσιάζονται πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα από την ανάπτυξη και αξιολόγηση καινοτόμων πρότυπων συστημάτων αναπαραγωγής ήχου μέσω οπτοακουστικής μετατροπής λέιζερ (ενότητα 2) καθώς και θεωρητικά αποτελέσματα σχετικά με την περιγραφή της ακουστικής εκπομπής των πηγών πλάσματος laser (ενότητα 3). Τέλος, τα συμπεράσματα της έως τώρα έρευνας καθώς και τα ανοιχτά ερωτήματα και οι μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι παρουσιάζονται στην ενότητα 4.

## 1. Υπόβαθρο

Η οπτοακουστική μετατροπή πλάσματος λέιζερ λαμβάνει χώρα όταν βραχείς ( $ns$ ) ή υπερβραχείς ( $ps, fs$ ) παλμοί λέιζερ υψηλής έντασης εστιάζονται σε κάποιο αέριο, υγρό ή στερεό μέσο. Στην περίπτωση αέριων στόχων, όπως ο ατμοσφαιρικός αέρας, η μη-γραμμική αλληλεπίδραση του κατάλληλα ισχυρού οπτικού παλμού με το ουδέτερο αέριο [7] οδηγεί σε ιονισμό και παραγωγή ενός θερμού νέφους ελεύθερων ηλεκτρονίων, σε μια διαδικασία που αναφέρεται ως κατάρρευση προκαλούμενη από λέιζερ (laser-induced breakdown – LIB). Το αέριο ηλεκτρονίων αλληλεπιδρά με τα ψυχρότερα ιόντα του πλάσματος και μεταφέρει ενέργεια σε αυτά μέσω επανασυνδέσεων, προκαλώντας ραγδαία τοπική θέρμανση του αερίου. Ακολουθεί θερμική διαστολή και στη συνέχεια ελαστική επαναφορά του διεγερμένου όγκου του αερίου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός κρουστικού κύματος (shock wave) με τη χαρακτηριστική μορφή N-παλμού (N-pulse). Καθώς το κρουστικό κύμα διαδίδεται μακριά από την πηγή, μετατρέπεται σε γραμμικό ακουστικό κύμα [8].

Οι ηχητικοί παλμοί πλάσματος λέιζερ έχουν διάρκεια μερικών ως και μερικών δεκάδων μικροδευτερολέπτων ανάλογα με την διάρκεια του παλμού λέιζερ, την ποσότητα της εναποτιθέμενης οπτικής ενέργειας και την γεωμετρία του ιονισμένου όγκου. Το ακουστικό τους φάσμα ξεκινάει από τις πολύ χαμηλές συχνότητες (20 Hz) και έχει χαρακτηριστικά υπερηρατού φίλτρου πρώτης τάξης έως ένα φασματικό μέγιστο, από το οποίο και μετά γίνεται χαμηλοπερατό. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της οπτικής ακτινοβολίας, το φασματικό μέγιστο μπορεί να βρίσκεται στο άνω άκρο του ακουστού φάσματος, στους κοντινούς υπερήχους (20-100 kHz) ή ακόμη και σε συχνότητες της τάξης των μερικών MHz [5,9].

Στην περίπτωση των στερεών στόχων, το παραγόμενο κύμα έχει ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά, ωστόσο ο φυσικός μηχανισμός που οδηγεί στον σχηματισμό του διαφέρει. Η παραγωγή πλάσματος και η επακόλουθη ραγδαία θέρμανση του στερεού επιφέρουν εξάχνωση του υλικού κοντά στην επιφάνεια σε μια διαδικασία που ονομάζεται αφαίρεση υλικού με λέιζερ (laser ablation – LA). Τα σωματίδια που διαφεύγουν συγκρούονται με τα μόρια του περιβάλλοντος αέρα σπρώχνοντάς τα μακριά από την επιφάνεια του υλικού ενώ ταυτόχρονα τα θερμαίνουν. Η ταχεία απομάκρυνση και η επακόλουθη ελαστική επαναφορά των μορίων του αέρα οδηγεί στη δημιουργία πίεσης και στην εκπομπή κρουστικού κύματος με το χαρακτηριστικό σχήμα N-παλμού. Η αφαίρεση υλικού με λέιζερ μπορεί να επιτευχθεί με ροή οπτική ισχύος (fluence) της τάξης των  $10^8 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$ , σημαντικά χαμηλότερη από αυτή που απαιτείται για τη διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα ( $\sim 10^{11} - 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ).

## 2. Τεχνολογία αναπαραγωγής ήχου από λέιζερ

Η τεχνολογία ήχου λέιζερ (laser-sound) έγκειται στον σχεδιασμό συστημάτων οδηγούμενων από λέιζερ ικανών για ελεγχόμενη αναπαραγωγή συνεχών σημάτων ήχου οποιασδήποτε μορφής μέσα στο ακουστικό εύρος συχνοτήτων ή και στην περιοχή των υπερήχων. Η παλμική φύση των ηχητικών κυμάτων πλάσματος λέιζερ υπαγορεύει τη διαμόρφωση του προς αναπαραγωγή ηχητικού σήματος σε μορφή παλμοσειράς. Οι τεχνικές διαμόρφωσης αναλογικών και ψηφιακών σημάτων σε παλμοσειρές είναι ευρέως διαδεδομένες στην τεχνολογία ήχου και τις τηλεπικοινωνίες. Μεταξύ των πλέον σημαντικών διαμορφώσεων ήχου είναι η διαμόρφωση ΣΔ (Delta-Sigma Modulation) και η διαμόρφωση πλάτους παλμού (Pulse Amplitude Modulation), οι οποίες και αξιοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των πρότυπων συστημάτων ήχου λέιζερ. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων ήχου λέιζερ σε επίπεδο σήματος (2.1) και σε επίπεδο φυσικού συστήματος (2.2).

### 2.1 Μοντέλο περιγραφής της ακουστικής απόκρισης συστημάτων laser-sound

Το σύστημα αναπαραγωγής ήχου πλάσματος λέιζερ δέχεται ως είσοδο ένα αναλογικό ή ψηφιακό ηχητικό σήμα  $s_{in}$  και βγάζει ως έξοδο ένα ακουστικό σήμα  $s_{out}$  υπό μορφή παλμοσειράς. Το ηχητικό φάσμα της παλμοσειράς εξόδου στο συχνοτικό εύρος λειτουργίας του συστήματος (βλ. παρακάτω) είναι ίδιο με αυτό του σήματος εισόδου. Προκειμένου να επιτευχθεί ελεγχόμενη αναπαραγωγή συνεχούς ήχου από πηγές πλάσματος λέιζερ, το σήμα εισόδου κωδικοποιείται σε παλμοσειρές ΣΔ ή PAM, οι οποίες είναι πρακτικά σειρές μοναδιαίων κρουστικών (Kronecker Delta). Στην περίπτωση της ψηφιακής διαμόρφωσης ΣΔ, η πληροφορία του αρχικού ακουστικού σήματος κωδικοποιείται στις χρονικές αποστάσεις μεταξύ κρουστικών ίδιου πλάτους (1-bit ΣΔ) ή στο συνδυασμό διαφορετικών αποστάσεων και πλατών των κρουστικών (n-bit ΣΔ) [11]. Στην περίπτωση της ψηφιακής ή αναλογικής διαμόρφωσης PAM, η ακουστική πληροφορία κωδικοποιείται στα διαφορετικά πλάτη των ισαπεχουσών κρουστικών.

Στη συνέχεια, η διαμορφωμένη ακουστική παλμοσειρά  $s_{mod}$  μετατρέπεται σε οπτική παλμοσειρά μέσω κατάλληλης οδήγησης του συστήματος λέιζερ (βλ. ενότητα 3.2). Η οπτική παλμοσειρά εστιάζεται στον αέριο, υγρό ή στερεό στόχο και, μέσω της οπτοακουστικής μετατροπής, παράγει μια σειρά ακουστικών N-παλμών με χαρακτηριστικά αντίστοιχα με αυτά της αρχικής παλμικής κωδικοποίησης, δηλαδή με μεταβαλλόμενες αποστάσεις μεταξύ των παλμών και διαφορετικά πλάτη. Ως εκ τούτου, σε επίπεδο σήματος η μόνη διαφορά μεταξύ της παλμοσειράς  $s_{mod}$  και της αναπαραγόμενης παλμοσειράς  $s_{out}$  είναι η μορφή των παλμών: στην περίπτωση της  $s_{mod}$  είναι συναρτήσεις Δέλτα ενώ στην  $s_{out}$  είναι N-παλμοί. Φυσικά τα παραπάνω σήματα είναι εξιδανικευμένες θεωρητικές εκδοχές των πραγματικών σημάτων, καθώς και κατά την μετατροπή  $s_{in} \rightarrow s_{mod}$  αλλά και κατά την μετατροπή  $s_{mod} \rightarrow s_{out}$  υπεισέρχονται παραμορφώσεις, εκτενής ανάλυση των οποίων γίνεται στις δημοσιεύσεις [2,3,11]. Εάν αγνοήσουμε τις παραμορφώσεις, το σήμα  $s_{out}$  μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση του σήματος  $s_{mod}$  και ενός μεμονωμένου N-παλμού  $s_N$  ως:

$$s_{out}(t) = s_{mod}(t) * s_N(t) \quad (1)$$

όπου με " \* " συμβολίζεται η γραμμική συνέλιξη μεταξύ των δύο σημάτων. Η σχέση (1) στο πεδίο της συχνότητας γράφεται ως:

$$s_{out}(f) = s_{mod}(f) \cdot s_N(f) \quad (2)$$

από όπου προκύπτει ότι το φάσμα του σήματος εξόδου  $s_{out}(f)$  δίνεται από το γινόμενο του φάσματος του διαμορφωμένου σήματος και του ακουστικού N-παλμού.

Στην περίπτωση ιδανικών διαμόρφωση ΣΔ ή PAM, το φάσμα του σήματος  $s_{mod}$  μπορεί να διαχωριστεί σε δύο συχνοτικές ζώνες: την «εντός μπάντας» ζώνη (in-band), η οποία ξεκινάει από τις πολύ χαμηλές συχνότητες και εκτείνεται έως την υψηλότερη συχνότητα  $f_{max}$  του σήματος εισόδου  $s_{in}$ , και την «εκτός μπάντας» ζώνη, όπου  $f > f_{max}$ . Για ένα σύστημα αναπαραγωγής ήχου πλήρους εύρους, η  $f_{max}$  είναι η υψηλότερη ακουστή συχνότητα (~20 kHz) ενώ για συστήματα περιορισμένου εύρους, όπως είναι τα πρότυπα συστήματα που παρουσιάζονται παρακάτω λόγω περιορισμών στον διαθέσιμο εξοπλισμό, η  $f_{max} < 20$  kHz είναι η υψηλότερη οφέλιμη συχνότητα που μπορεί να αναπαράξει το σύστημα. Επιπλέον, για ιδανικές ΣΔ και PAM, το φάσμα του διαμορφωμένου σήματος στην εντός μπάντας ζώνη είναι ίδιο με το φάσμα του σήματος εισόδου. Ως εκ τούτου, το φάσμα του σήματος εξόδου στην εντός μπάντας ζώνη δίνεται από τη σχέση:

$$s_{out}(f) = s_{in}(f) \cdot s_N(f), f \leq f_{max} \quad (3)$$

και άρα η εντός μπάντας συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ήχου λέιζερ δίνεται από τη σχέση:

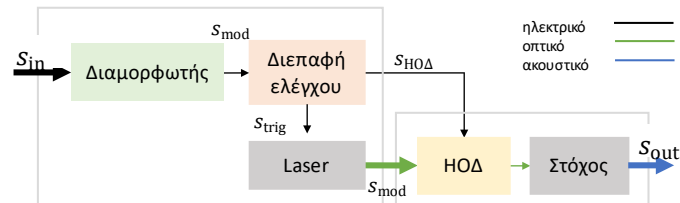
$$\frac{s_{out}(f)}{s_{in}(f)} = h(f) = s_N(f), f \leq f_{max} \quad (4)$$

Έτσι, δεδομένου ότι το φασματικό προφίλ του N-παλμού είναι υπερπερατό 1<sup>ης</sup> τάξης, το ιδανικό σύστημα ήχου λέιζερ λειτουργεί ως υπερπερατό φίλτρο πρώτης τάξης. Αυτό συνεπάγεται ότι μπορεί να γίνει ισοστάθμιση του συστήματος μέσω προεπεξεργασίας του σήματος εισόδου με το αντίστροφο φίλτρο, δηλαδή με χαμηλοπερατό φίλτρο 1<sup>ης</sup> τάξης. Λεπτομερής ανάλυση των σημάτων του συστήματος ήχου λέιζερ γίνεται στις δημοσιεύσεις [2,3].

## 2.2 Πρότυπο σύστημα αναπαραγωγής ήχου από laser

Το γενικό σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος ήχου λέιζερ φαίνεται στο Σχήμα. 2.1. Στην καρδιά του συστήματος βρίσκεται ένα παλμικό λέιζερ υψηλού ρυθμού επανάληψης που παράγει ισχυρούς βραχείς ή υπερβραχείς παλμούς ικανούς να δημιουργήσουν πλάσμα στον αέρα ή σε στερεούς στόχους. Η μονάδα λέιζερ ελέγχεται από ένα σύστημα διαμόρφωσης οπτικής ακτινοβολίας που επιτρέπει την μεταβολή της χρονικής απόστασης μεταξύ διαδοχικών παλμών καθώς και της ενέργειας ανά εκπεμπόμενο παλμό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται έλεγχος σε πραγματικό χρόνο των δύο απαραίτητων παραμέτρων για την υλοποίηση των παλμικών διαμορφώσεων ήχου ΣΔ ή PAM (βλ. ενότητα 2.1).

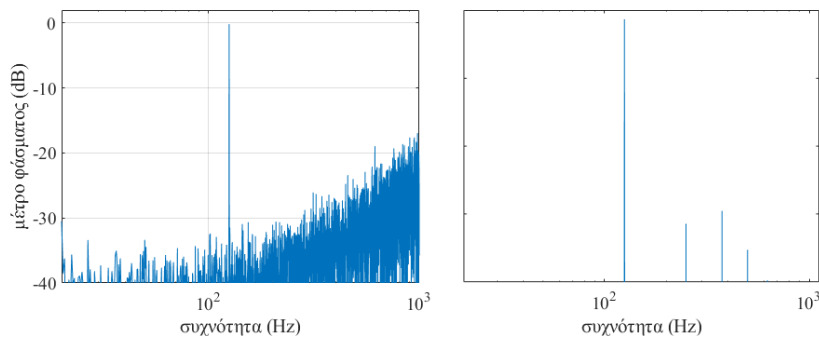
Το σύστημα διαμόρφωσης της οπτικής ακτινοβολίας αποτελείται από δύο τμήματα, το τμήμα ελέγχου του ρυθμού επανάληψης των οπτικών παλμών και το τμήμα διαμόρφωσης της ενέργειας των παλμών. Στο πρότυπο σύστημα, ο έλεγχος του ρυθμού επανάληψης παλμών πραγματοποιήθηκε μέσω ηλεκτρικού σήματος πυροδότησης  $s_{trig}$  (trigger), ενώ η διαμόρφωση της ενέργειας των παλμών έγινε με τη χρήση ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή (ΗΟΔ) βασισμένου σε Pockels cell, το οποίο



Σχήμα. 2.1 διάγραμμα ροής συστήματος αναπαραγωγής ήχου από πλάσμα λέιζερ

ελέγχεται από το ηλεκτρικό σήμα  $s_{HOΔ}$ . Και τα δύο σήματα ελέγχου παράγονται από το σήμα  $s_{mod}$  και παρέχονται στο σύστημα μέσω μια διεπαφής ήχου.

Τέλος, στο Σχ. 2.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα στο πεδίο της συχνότητας από την πειραματική αξιολόγηση του πρότυπου συστήματος ήχου λέιζερ στην αναπαραγωγή ημιτόνου 125 Hz (α) με διαμόρφωση ΣΔ 1 επιπέδου και (β) με αναλογική διαμόρφωση PAM. Το σύστημα βασίζεται σε Nd:YAG λέιζερ παλμών διάρκειας 10 ns, μήκους κύματος 532 nm και ενέργειας έως 10 mJ. Λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης οπτικής ισχύος, το εύρος ζώνης του συστήματος εκτείνεται από τα 20 Hz έως το 1 kHz, ενώ προκειμένου να μειωθούν οι απαιτήσεις σε οπτική ένταση για την παραγωγή πλάσματος, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικοί στόχοι. Από τα γραφήματα γίνεται εμφανής η δυνατότητα του συστήματος να αναπαράγει συνεχή σήματα με ακρίβεια. Σημειώνεται ότι ως προς τις δυνατότητες του συστήματος, τα ημίτονα δεν εμφανίζουν καμία ιδιαιτερότητα σε σύγκριση με άλλα συνεχή σήματα αλλά επιλέχθηκαν εδώ μόνο για λόγους παρουσίασης, καθώς το φάσμα τους είναι εύκολα αξιολογήσιμο. Περισσότερα πειραματικά αποτελέσματα και ακουστικό υλικό παρέχεται στο συμπληρωματικό υλικό της δημοσίευσης [2].



Σχήμα. 2.2 μέτρο φάσματος ακουστικού σήματος ημιτόνου 125Hz παραγόμενου από σύστημα ήχου πλάσματος λέιζερ με διαμόρφωση α) ΣΔ 1.5bit, β) PAM.

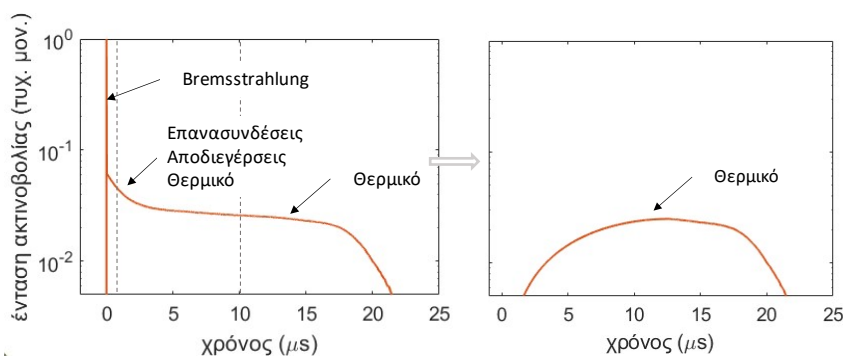
### 3. Φαινομενολογικά μοντέλα περιγραφής της ακουστικής εκπομπής πηγών πλάσματος laser

Παράλληλα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας αναπαραγωγής ήχου από λέιζερ, πραγματοποιήθηκαν θεωρητικές και πειραματικές μελέτες της ακουστικής εκπομπής των πηγών πλάσματος λέιζερ. Από τις μελέτες προέκυψαν φαινομενολογικά μοντέλα

για την περιγραφή α) της ακουστικής εκπομπής των πηγών μέσω της φωτεινής εκπομπής που ακολουθεί την κατάρρευση του μέσου και β) των νημάτων πλάσματος λέιζερ (plasma filaments) ως γραμμικών ακουστικών πηγών (acoustic line sources). Συνοπτική περιγραφή των μοντέλων γίνεται στις επόμενες υποενότητες.

### 3.1 Συσχετισμός του ήχου από το φως που εκπέμπεται κατά την οπτοακουστική μετατροπή πλάσματος laser

Η δημιουργία πλάσματος στον αέρα, πέρα από την εκπομπή του ακουστικού παλμού, οδηγεί και στην εκπομπή οπτικής ακτινοβολίας, σε αντιστοιχία με το γνωστό σε όλους φαινόμενο του κεραυνού. Η οπτική ακτινοβολία σχετίζεται κυρίως με τέσσερις φωτοεκπέμπουσες φυσικές διεργασίες: α) τις συγκρούσεις μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρονίων του πλάσματος (Bremsstrahlung), β) τις επανασυνδέσεις των ηλεκτρονίων με τα ιόντα (recombinations) γ) τις αποδιεγέρσεις των ατόμων από διεγερμένες σε λιγότερο διεγερμένες καταστάσεις (de-excitations) και δ) την θερμική ακτινοβολία λόγω τοπικής αύξησης της θερμοκρασίας (thermalization). Αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.1α, το οποίο δείχνει τη χρονική εξέλιξη του φωτεινού σήματος, όπως καταγράφηκε από φωτοδίοδο ευρέως οπτικού φάσματος και εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης. Με κατάλληλη επεξεργασία σήματος που βασίζεται στην φυσική των συνιστωσών διεργασιών μπορεί να απομονωθεί το θερμικό σήμα από το συνολικό σήμα φωτεινής εκπομπής (Σχήμα 3.1β).



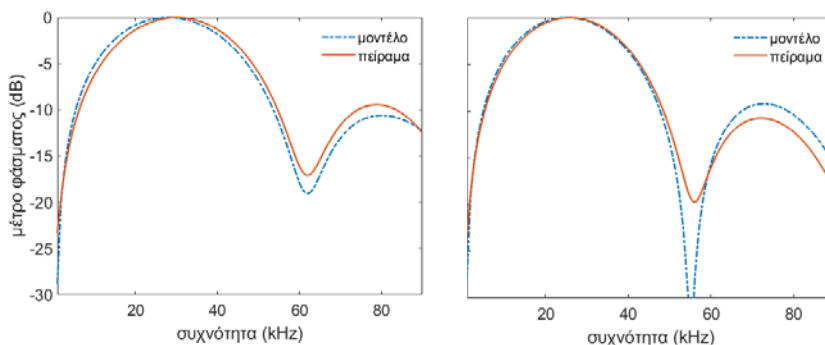
Σχήμα. 3.1 α) συνολική οπτική ακτινοβολία που ακολουθεί την δημιουργία πλάσματος λέιζερ στον αέρα και β) απομονωμένη θερμική ακτινοβολία

Εφόσον το ακουστικό κύμα είναι αποτέλεσμα θερμοελαστικής διαστολής του μέσου, είναι αναμενόμενο η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον διεγερμένο όγκο να συνδέεται με το ακουστικό σήμα. Είναι γνωστό ότι η θερμική ακτινοβολία διαμέσου της επιφάνειας ενός θερμού σώματος συνδέεται με τη ροή θερμότητας από / προς την επιφάνεια με σχέση αναλογίας. Επιπλέον η ακουστική πίεση  $p$  που παράγεται από θερμική πηγή  $H$  σε μέσο με ταχύτητα ήχου  $c$  περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \cdot p(r, t) = -\frac{\gamma-1}{c^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} H(r, t) \quad (5)$$

Στο φαινομενολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε [9], ως πηγή χρησιμοποιήθηκε το σήμα της θερμικής ακτινοβολίας που μετρήθηκε για 4 διαφορετικές ενέργειες παλμού. Με επίλυση της εξίσωσης (5) στο πεδίο της συχνότητας εξήχθησαν τα

φάσματα των αντίστοιχων παραγόμενων ακουστικών παλμών, δύο εκ των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα. 3.2: πειραματικό και θεωρητικό ακουστικό φάσματα παλμών πλάσματος λέιζερ από οπτικούς παλμούς α) 40mJ και β) 60mJ, 6ns, 532nm.

### 3.2 Η ακουστική εκπομπή των νημάτων πλάσματος laser

Στο πλαίσιο της μελέτης των ακουστικών πηγών πλάσματος, αναπτύχθηκε φαινομενολογικό μοντέλο για την περιγραφή της κατευθυντικότητας εκπομπής των νημάτων πλάσματος, βασισμένο στην κλασική θεωρία των γραμμικών ακουστικών πηγών [12]. Τα νήματα πλάσματος είναι επιμήκη κανάλια ιονισμένου αερίου τα οποία δημιουργούνται από ισχυρούς υπερβραχείς παλμούς υπό ασθeneis συνθήκες εστίασης από την εναλλασσόμενη επικράτηση της οπτικής εστίασης και της αποεστίασης πλάσματος η οποία οδηγεί σε διαδοχικές αυξήσεις και μειώσεις της οπτικής έντασης του παλμού, διατηρώντας την σε επίπεδα ικανά για ιονισμό χωρίς όμως να οδηγούν σε γρήγορη εξάντληση της ενέργειας. Το μήκος του καναλιού πλάσματος μπορεί να εκτείνεται από τα λίγα χιλιοστά έως και τα δεκάδες μέτρα, ανάλογα με τις συνθήκες εστίασης και την συνολική ενέργεια και διάρκεια του παλμού, ενώ η ακτίνα του είναι της τάξης των εκατοντάδων μικρομέτρων έως και λίγων εκατοστών [13].

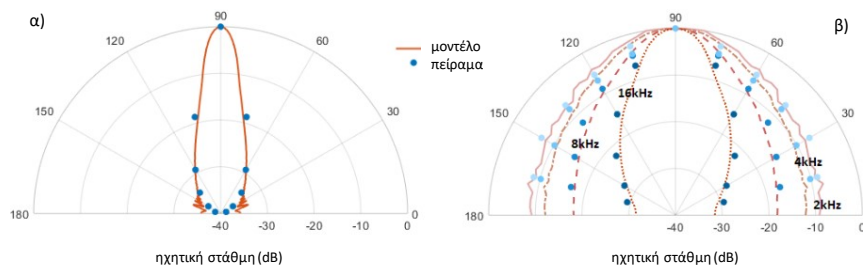
Λόγω της γραμμικής γεωμετρίας των νημάτων πλάσματος, η ακουστική τους εκπομπή προσομοιάζει την εκπομπή των γραμμικών ακουστικών πηγών (acoustic line sources), οι οποίες αποτελούν ιδανικές πηγές κυλινδρικών ακουστικών κυμάτων. Τα κυλινδρικά ακουστικά κύματα, λόγω της ισχυρής κατευθυντικότητάς τους και της βραδύτερης εξασθένισης της ακουστικής έντασης με την απόσταση στον κύριο άξονα διάδοσης, έχουν χαρακτηριστικά τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές ακουστικής και ακουστικών μετρήσεων. Η επίτευξη κυλινδρικής εκπομπής είναι πρακτικώς αδύνατη με την επικρατούσα ηλεκτρομηχανική τεχνολογία, ενώ συστήματα που προσεγγίζουν την κυλινδρική εκπομπή, όπως τα line arrays, βασίζονται σε ογκώδεις και ακριβές συστοιχίες μεγαφώνων, η εκπομπή των οποίων αποκλίνει σημαντικά από την ιδεατή κυλινδρική εκπομπή.

Η πίεση που παράγεται από ένα νήμα πλάσματος δίνεται από την γνωστή σχέση της ιδεατής γραμμικής συστοιχίας μήκους  $L$  αποτελούμενης από σημειακές πηγές με αξονική κατανομή ηχητικής πίεσης  $H_x(x)$ :

$$p(r, \phi, t) = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{H_x(x)}{r'(x)} \cdot n \left( t - \frac{r'(x)}{c} \right) dx \quad (6)$$

όπου  $n \left( t - \frac{r'(x)}{c} \right)$  είναι ο όρος της διέγερσης, δηλαδή του προφίλ της πίεσης που παράγει μια σημειακή πηγή. Στην περίπτωση των νημάτων πλάσματος, η διέγερση είναι μορφής N-παλμού, και έτσι  $n(t) = -\frac{t}{T} \cdot [u(t+T) - u(t-T)]$ . Επιπλέον, η κατανομή της πίεσης συνήθως παίρνει γκαουσιανή ή υπερ-γκαουσιανή μορφή καθώς το περισσότερο κομμάτι της ενέργειας εναποτίθεται στο κέντρο του νήματος, ενώ μειώνεται σταδιακά προς τα άκρα του.

Το φαινομενολογικό μοντέλο επαληθεύθηκε μέσω σύγκρισης με πειραματικές μετρήσεις της ακουστικής εκπομπής νήματος πλάσματος σε διάφορες γωνίες όπου διαπιστώθηκε εξαιρετική σύμπτωση στην συνολική ακουστική ενέργεια στο εύρος ζώνης της μέτρησης αλλά και σε επιμέρους μπάντες (Σχήματα 3.1α και β αντίστοιχα). Η εξαιρετική συμφωνία του θεωρητικού μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις επιτρέπει την πρόβλεψη της ακουστικής εκπομπής πλασμάτων νήματος με διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (βλ. [14]).



Σχήμα. 3.3 πειραματική και αναλυτική αξιολόγηση της α) συνολικής και β) ανά συχνοτική ζώνη οκτάβας κατευθυντικότητα ακουστικής εκπομπής νήματος πλάσματος μήκους 14 cm από οπτικό παλμό 5.4mJ, 25fs, 800nm.

#### 4. Συμπεράσματα και συζήτηση

Στην εργασία αυτή έγινε μια επισκόπηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων που έχουν παραχθεί έως τώρα από την συνεργατική έρευνα των ομάδων Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής του Πανεπιστημίου Πατρών, του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ και του Εργαστηρίου Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου και του Ινστιτούτου Engler-Bunte του Τεχνολογικού Ιδρύματος της Καρλσρούης σχετικά με την ακουστική εκπομπή των πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ και την αναπαραγωγή, μέσω αυτών, σύνθετων συνεχών ακουστικών σημάτων. Η τεχνολογία ήχου πλάσματος λέιζερ παρουσιάζει μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή συστημάτων αναπαραγωγής ήχου από κινούμενες σε πραγματικό χρόνο, άυλες πηγές υψηλής ενεργειακής απόδοσης και συστήματα παραγωγής ηχητικών μηνυμάτων σε απομακρυσμένους ή/και δυσπρόσιτους στόχους (οχήματα, πλοία κ.α.) χωρίς τη χρήση ειδικού δέκτη, αποδιαμορφωτή ή τροφοδοσίας στο σημείο της αναπαραγωγής. Λόγω της σημειακής γεωμετρίας τους και της πατοκατευθυντικής

εκπομπής τους, χωρικές διατάξεις πηγών πλάσματος λέιζερ μπορούν θεωρητικά να συνθέσουν οποιοδήποτε κατευθυντικότητα ενώ είναι κατάλληλες και για χρήση σε συνδυασμό με μετα-δομές (μεταϊλικά) που επιτυγχάνουν ελεγχόμενη χωρική και φασματική διαμόρφωση του ήχου, όπως πχ. οι ακουστικοί φακοί. Η αξιοποίηση των πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ αναμένεται να ενισχύσει και την ιατρική θεραπεία και διάγνωση με υπερήχους, καθώς επιτρέπει την ακριβή παροχή ακουστικής/θερμικής ενέργειας σε ανθρώπινους ιστούς και όργανα.

## 5. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς Κ.Κ. και Ν.Π. ευχαριστούν το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ακουστικής και Οπτοακουστικής του Τμ. Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής (ΜΤΑ) του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ) για την κάλυψη των εξόδων συμμετοχής στο συνέδριο Ακουστική 2022. Ο Κ.Κ. ευχαριστεί θερμά τους κ.κ. Γιάννη Ορφανό, ΕΔΙΠ του τμ. ΜΤΑ, και Björn Stelzner για την καθοριστική υποστήριξη τους στην πραγματοποίηση των πειραμάτων της εργασίας, καθώς και τους καθηγητές του ΕΛΜΕΠΑ κ.κ. Μάκη Μπακαρέζο, Βασίλειο Δημητρίου και Μιχάλη Ταταράκη για την σημαντική συνεισφορά τους στην κατανόηση του φαινομένου και την ανάπτυξη των φαινομενολογικών μοντέλων. Ο Κ.Κ. ευχαριστεί το ΕΛΙΔΕΚ και την ΓΓΕΤ για την μερική χρηματοδότηση της έρευνας αυτής καθώς και την δράση CA17126 - TUMIEE του προγράμματος COST για την κάλυψη των εξόδων της επίσκεψής του στο EBI του KIT για την εκπόνηση πειραμάτων.

## 6. Αναφορές

- [1] Rossi, M. Acoustics and Electroacoustics, Artech House, Norwood, MA(1988)
- [2] Kaleris, K., Stelzner, B, Hatziantoniou, P., Trimis, D. and Mourjopoulos, J., Laser-sound: optoacoustic transduction from digital audio streams, Sci Rep (2021)
- [3] Kaleris, K., Stelzner, B, Hatziantoniou, P., Trimis, D. and Mourjopoulos, J., Laser-Sound Transduction from Digital ΣΔ Streams, J. Audio Eng. Soc. (2022).
- [4] Nelson, P., Veyrie, P Berry and M., Durand., Y., Experimental and theoretical studies of air breakdown by intense pulse of light. Phys. Lett. 13, 226–228 (1964)
- [5] Oksanen, M. and Hietanen, J., Photoacoustic breakdown sound source in air. Ultrasonics 32, 327–331 (1994)
- [6] Lengert, L., et al., Optoacoustic tones generated by nanosecond laser pulses can cover the entire human hearing range, Biophotonics (2022)
- [7] Kaleris, K. et al., Experimentally validated modeling of the optical energy deposition in highly ionized ambient air by strong femtosecond laser pulses, Eur. Phys. J. D 75: 236 (2021).
- [8] Ghosh, S. and Mahesh, K. Numerical simulation of laser-induced breakdown in air, 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (2008)
- [9] Kaleris, K., Orphanos, Y., Bakarezos, M., Dimitriou, V., M., Tatrakis, M., Mourjopoulos, J. & Papadogiannis, N., On the correlation of light and sound radiation following laser-induced breakdown in air J. Phys. D: Appl. Phys. 53, 435207 (2020).
- [10] Pavan, S., Schreier, R. & Temes, G. C., Understanding Delta-Sigma Data Converters, IEEE Press, Piscataway (2017)



- [11] Kaleris, K., Stelzner, B, Hatziantoniou, P., Trimis, D. and Mourjopoulos, J. et. al Laser-driven sound reproduction from analog pulsed audio streams, manuscript in preparation
- [12] Kaleris, K., Orfanos, Y., Bakarezos, M., Papadogiannis, N. & Mourjopoulos, J., Experimental and analytical evaluation of the acoustic radiation of femtosecond laser plasma filament sound sources in air, JASA 146, EL212 (2019)
- [13] Couairon, A & Mysyrowicz, A., Femtosecond filamentation in transparent media, Phys Rep, 441 (2007)
- [14] Kaleris, K., Orfanos, Y., Bakarezos, M., Papadogiannis, N. & Mourjopoulos, The Effect of Geometry on the Acoustic Radiation of Plasma Filaments in Air, presented in Forum Acusticum (2020)

**Αμφιωτική μείωση δεδομένων για εύρωστη εκτίμηση  
γωνίας άφιξης ακουστικών πηγών μέσω συνελκτικών  
νευρωνικών δικτύων για αντηχητικά σήματα**

Παναγιώτης Ζάχος  
Υποψήφιος Διδάκτορας  
p\_zachos@upnet.gr

Γαβριήλ Καμάρης  
Υποψήφιος Διδάκτορας  
gpkamaris@upnet.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος  
Καθηγητής  
mourjor@upatras.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία αυτή προτείνει μια προσέγγιση με Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο για τον εύρωστο εντοπισμό πηγής μέσω αμφιωτικών καταγραφών από δωμάτια με αντήχηση. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη συμπίεση των αμφιωτικών παραμέτρων της Αμφιωτικής Διαφοράς Χρόνου Άφιξης και της Αμφιωτικής Διαφοράς Έντασης, σε μικρά μονοδιάστατα διανύσματα, επιτρέποντας έτσι στο μήκος των αντηχητικών σημάτων να εισάγεται στα διανύσματα παραμέτρων. Η μέθοδος έχει ελεγχθεί σε μια μεγάλη βάση δεδομένων με δωμάτια με διαφορετικά ακουστικά χαρακτηριστικά και επιτυγχάνει εύρωστο εντοπισμό σε πηγές που εκπέμπουν διαφορετικά σήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν υψηλά επίπεδα γενίκευσης της προτεινόμενης μεθόδου και ένα υποσχόμενο, ευέλικτο πλαίσιο μηχανικής μάθησης.*

***Binaural data reduction for robust direction of  
arrival estimation via convolutional neural network  
for reverberant signals***

**ABSTRACT**

*This paper introduces a Convolutional Neural Network (CNN) machine-learning approach for robust detection of the direction of arrival of any single source via binaurally recorded signals inside reverberant rooms. The proposed method relies on compacting the auditory model binaural parameters of interaural time and interaural level differences, into short one-dimensional vectors allowing the length reverberant effects to be incorporated into the feature vectors. The method has been tested in a very large database of rooms with varying acoustic characteristics and achieved robust localization with different audio source signals. The results indicate a high degree of generalization of the proposed method and a promising, flexible machine learning framework.*

## Εισαγωγή

Τα ακουστικά γεγονότα που εμφανίζονται σε συγκεκριμένες θέσεις στον χώρο, εντοπίζονται με ακρίβεια από ανθρώπινους ακροατές, ακόμα και υπό ακουστικά αντίξοες συνθήκες [1], [2]. Οι ακροατές αντιστοιχίζουν τη γωνία άφιξης και την απόσταση στα γεγονότα που γίνονται αντιληπτά, με τη λειτουργία αυτή να εκτελείται με μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την αμφιωτική ακρόαση.

Πολλές εφαρμογές επιχειρούν να χρησιμοποιήσουν τέτοιους εύρωστους μηχανισμούς ακοής αφού ο ακριβής εντοπισμός μιας (ή περισσότερων) πηγής είναι ιδιαίτερης σημασίας για την κατασκευή εμφυτευμάτων κοχλία, ακουστικών βοηθημάτων, συστημάτων αναγνώρισης φωνής καθώς και συστήματα οικιακής φροντίδας.

Εφόσον το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα καθορίζει το αζιμούθιο ήχων στο οριζόντιο πεδίο χρησιμοποιώντας δύο βασικές παραμέτρους, την Αμφιωτική Διαφορά Χρόνου Άφιξης (ITD) και την Αμφιωτική Διαφορά Έντασης (ILD), αρκετά μοντέλα που έχουν προταθεί με στόχο τον εντοπισμό της γωνίας άφιξης ακουστικών πηγών, χρησιμοποιούν αυτές τις παραμέτρους τις οποίες εξάγουν από αμφιωτικές καταγραφές [3]–[7].

Η εργασία αυτή προτείνει μια μέθοδο εντοπισμού γωνίας άφιξης, βασισμένη σε μια νέα μέθοδο προεπεξεργασίας και συμπίεσης δεδομένων [8], η οποία είναι ικανή να εντοπίζει με εύρωστο τρόπο πηγές ομιλίας, καθώς και πηγές μουσικής σε περιβάλλοντα με έντονη αντήχηση.

Η μέθοδος αυτή, εισάγει ένα μοντέλο βασισμένο σε ένα Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο (CNN), εμπνευσμένο από την ευρωστία του ανθρώπινου ακουστικού συστήματος σε ό,τι αφορά τον εντοπισμό της γωνίας άφιξης σε αντίξοες συνθήκες. Ο CNN ταξινομητής αξιοποιεί τις παραμέτρους ILD και ITD για την εξαγωγή μιας κατανομής πιθανότητας, η μέγιστη τιμή της οποίας υποδεικνύει την εκτιμώμενη θέση της πηγής. Το CNN βασίζεται σε μία μέθοδο συμπίεσης των αμφιωτικών παραμέτρων, που ελαττώνει το μέγεθος των παραμέτρων κατά 93.75%, οδηγώντας έτσι σε ένα σχετικά μικρό διάνυσμα εισόδου. Το μικρό αυτό μέγεθος, επιτρέπει την εκτενή εκπαίδευση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες ώστε να επιτευχθεί ένα γενικευμένο μοντέλο μηχανικής μάθησης.

## 1. Μέθοδος

Συνοπτικά, η μέθοδος εκμεταλλεύεται αμφιωτικές παραμέτρους για την εκτίμηση της γωνίας άφιξης ( $\theta$ ) από σήματα με αντήχηση, κατασκευασμένα από τη συνέλιξη μονοφωνικών σημάτων με Αμφιωτικές Κρουστικές Αποκρίσεις Δωματίων (BRIR). Από τα σήματα αυτά, εξάγονται τα ILD και ITD χρησιμοποιώντας καθιερωμένες μεθόδους [3], [9]. Στη συνέχεια, οι παράμετροι συμπίεζονται ακολουθώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο αμφιωτικής συμπίεσης δεδομένων και τα διανύσματα που προκύπτουν κανονικοποιούνται και συνδυάζονται σε ένα μοναδικό διάνυσμα που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση ή αξιολόγηση του CNN μοντέλου. Κατά την φάση της εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά καθαρά σήματα ομιλίας, χρησιμοποιώντας τις BRIRs που φαίνονται στον Πίνακα 1.1. Κατά την φάση της αξιολόγησης, τα υπό δοκιμή σήματα απέκτησαν χωρική διάσταση χρησιμοποιώντας

ένα διαφορετικό σύνολο BRIRs από την ίδια βάση, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

Κατά την εκπαίδευση χρησιμοποιήθηκαν σήματα ομιλίας από την βάση TIMIT [10]. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν με τυχαίο τρόπο 20 δείγματα και από αυτά εξάχθηκε το κεντρικό 1s ώστε να αποφευχθεί η σιγή στην αρχή και το τέλος. Οι βάσεις δεδομένων BRIRs που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ASH-IR [7] καθώς και οι Auditorium3 [11], Calypso [12] και Spirit [13].

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά των δωματίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του CNN

Εκπαίδευση			Αξιολόγηση		
Δωμάτιο	RT60(s)	d(m)	Δωμάτιο	RT60	d(m)
Auditorium3	1.28	1.79	R11(P1)	0.97	6.94
Calypso	0.27	1.0	R11(P2)	0.97	6.94
Spirit	0.69	2.02	R12	1.12	3
R01	0.17	2.5	R22(P1)	0.93	5.08
R05A	0.37	2.5	R22(P2)	0.93	9.67
R05B	0.83	2.5	R24	0.46	3.07
R06(P1)	0.47	3.35	R26	0.35	4.12
R06(P2)	0.47	3.0	R30	0.35	3
R07	0.41	2.5	R36	0.67	3.82
R08	0.79	2.0			
R09(P1)	0.82	5.3			
R09(P2)	0.82	4.8			
R10	0.46	4.0			
R16	1.18	15.8			
R18	0.46	2.0			
R25	0.7	6.25			

### 1.1 Μοντέλο Σημάτων

Αφού οι BRIRs ( $h_{l|r}(t)$ ) καταγραφούν με μικρόφωνα τοποθετημένα στα 2 (αριστερό/δεξί) αυτιά ενός ανδρείκελου, για κάθε σήμα  $s(t)$  που αντιπροσωπεύει μια ηχητική πηγή με σχετικό αζιμούθιο  $\theta$ , ανύψωση  $\varphi$  (σε μοίρες) και απόσταση  $d$  (m) από τη θέση της μέτρησης στο εκάστοτε δωμάτιο, τα αντίστοιχα σήματα  $x_l$  και  $x_r$ , που καταγράφονται σε αυτή τη θέση, μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$x_{l|r}(t) = h_{l|r}^{(\theta, \varphi, d)}(t) * s(t) + e_{l|r}(t) \quad (1.1)$$

όπου με  $*$  δηλώνεται η πράξη της συνέλιξης, με  $x_{l|r}$  συμβολίζεται είτε το σήμα που φτάνει στο αριστερό  $x_l(t)$ , είτε στο δεξί αυτί  $x_r(t)$  και με  $e_{l|r}(t)$  συμβολίζεται ο τυχόν θόρυβος που μπορεί να υπάρχει λόγω των μετρήσεων ή/και εσωτερικός θόρυβος, ο οποίος δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Η ανύψωση κατά τις αξιολογήσεις ήταν πάντα σταθερή στις  $0^\circ$  σχετικά με το οριζόντιο πεδίο, και αν και η απόσταση  $d$  διαφέρει μεταξύ των σημάτων, ο στόχος της εργασίας ήταν αποκλειστικά η εκτίμηση της γωνίας άφιξης, οπότε η έκφραση  $h_{l|r}^{(\theta, \varphi, d)}(t)$  μπορεί να απλοποιηθεί και να γραφτεί ως  $h_{l|r}^{(\theta)}(t)$  χάριν συντομίας.

### 1.2 Εξαγωγή αμφιωτικών παραμέτρων

Μετά την συνέλιξη των BRIRs με τα μονοφωνικά σήματα, τα πλέον αμφιωτικά σήματα διάρκειας 2s, χωρίστηκαν σε παράθυρα διάρκειας 500 ms με επικάλυψη 250 ms και η διαδικασία της εξαγωγής παραμέτρων εκτελέστηκε σε κάθε ένα από τα παράθυρα ξεχωριστά. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα ανίχνευσης ησυχίας, το οποίο απέρριπτε παράθυρα με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο.

Για την ανάλυση των σημάτων, χρησιμοποιήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο ηχητικής αντίληψης που αξιοποιεί μια τράπεζα 32 επικαλυπτόμενων φίλτρων Gammatone, με κεντρικές συχνότητες που ισαπέχουν στην κλίμακα Equivalent Rectangular Bandwidth (ERB), μεταξύ των 80 Hz και των 8000 Hz. Η λειτουργία των εσωτερικών τριχοειδών κυττάρων, προσεγγίστηκε με ανόρθωση ημίσεως κύματος ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο χαμηλοπερατό φίλτρο, αφού προηγούμενες μέθοδοι ταξινόμησης έδειξαν πως μπορούν να αξιοποιήσουν το υψίσυχο περιεχόμενο που προκύπτει [3]. Ακολούθως τα ILD και ITD υπολογίστηκαν ξεχωριστά για κάθε συχνοτική μπάνα, χρησιμοποιώντας επικαλυπτόμενα πλαίσια διάρκειας 20ms με 50% επικάλυψη. Το ILD που εκφράζεται σε dB, υπολογίζεται συγκρίνοντας την ενέργεια του κάθε πλαισίου, ενώ το ITD που εκφράζεται σε ms, υπολογίζεται εντοπίζοντας την χρονική καθυστέρηση που αντιστοιχεί στην βασικότερη κορυφή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης μεταξύ των σημάτων του αριστερού και δεξιού αυτιού ενώ τέλος εξομαλύνεται μέσω ενός βήματος απλής παραβολικής παρεμβολής.

Για σήματα που έχουν δειγματοληπτηθεί στα 16 kHz, ένα παράθυρο 500 ms θα είχε ως αποτέλεσμα παραμέτρους με διαστάσεις [49,32] με την πρώτη διάσταση να αντιστοιχεί στα χρονικά πλαίσια ( $T_f$ ) και τη δεύτερη να αντιστοιχεί στις 32 συχνοτικές μπάνες ( $F_b$ ) με τη μεταξύ τους απόσταση το 1 ERB. Έτσι, ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων και για τις δύο αμφιωτικές παραμέτρους είναι:

$$N = 2 \times T_f \times F_b = 2 \times 49 \times 32 = 3,136 \text{ δείγματα} \quad (1.2)$$

Αν και η εκπαίδευση ενός CNN μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και με σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων, έχει αποδειχθεί πως η ελάττωση των παραμέτρων εισόδου μπορεί να ωφελήσει τα αποτελέσματα ενός ταξινομητή [14], [15]. Η παρούσα εργασία παραθέτει μια νέα μέθοδο συμπίεσης αμφιωτικών παραμέτρων, η οποία αρχικά επιλέγει τις σημαντικότερες συχνοτικές μπάνες ενώ στη συνέχεια συμπιέζει περταίρω τις παραμέτρους όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

### 1.3 Αμφιωτική συμπίεση παραμέτρων

Η προτεινόμενη μέθοδος συμπίεσης, λειτουργεί σε 2 στάδια, δεν βασίζεται σε κάποιον γνωστό μηχανισμό ακοής, όμως η αποτελεσματική αξιοποίηση των παραμέτρων φαίνεται πως βοηθά την εκπαίδευση του CNN.

Κατά το πρώτο στάδιο, απορρίπτονται οι μπάνες των οποίων οι κεντρικές συχνότητες βρίσκονται εκτός του διαστήματος 2 με 4.5 kHz, οπότε οι νέες παράμετροι περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} ILD_{new} &= ILD[t, f], t = 1, \dots, T_f, f = 20, \dots, 26 \\ ITD_{new} &= ITD[t, f], t = 1, \dots, T_f, f = 20, \dots, 26 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Η επιλογή αυτών των συχνοτήτων έγινε με κριτήριο την καλύτερη δυνατή σύγκλιση του CNN. Δοκιμές με διαφορετικό πλήθος από συχνοτικές μπάντες είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικά χειρότερα αποτελέσματα.

Το δεύτερο στάδιο, έχει στόχο τον συνδυασμό των παραμέτρων σε ένα μοναδικό, χαρακτηριστικό διάνυσμα, το οποίο υπολογίζεται όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (1.4) υπό τη μορφή δύο χαρακτηριστικών 'προφίλ' ενός θετικού, και ενός αρνητικού:

$$P_{pos} = \frac{\sum_{t: Cue_{new}(t,f) > 0} Cue_{new}(t,f)}{\sum_{t: Cue_{new}(t,f) > 0} 1} \quad (1.4)$$

$$P_{neg} = \frac{\sum_{t: Cue_{new}(t,f) < 0} Cue_{new}(t,f)}{\sum_{t: Cue_{new}(t,f) < 0} 1}$$

Όπως φαίνεται και στις εξισώσεις, ο αλγόριθμος προσπελαίνει τη διάσταση  $f$  των συμπιεσμένων παραμέτρων  $ILD_{new}$  και  $ITD_{new}$  οι οποίες συμβολίζονται ως  $Cue_{new}$  στις Εξισώσεις (1.4). Έτσι για κάθε χρονικό πλαίσιο  $t$ , όπου  $1 \leq t \leq T_f$ , υπολογίζονται δύο μέσοι όροι, ένας θετικός  $P_{pos}$  και ένας αρνητικός  $P_{neg}$ .

Επακολουθως τα δύο αυτά διανύσματα διαστάσεων  $[1, T_f]$ , συνδυάζονται στο τελικό προφίλ της παραμέτρου διαστάσεων  $[2, T_f]$  ως εξής:

$$Profile[2, T_f] = [P_{pos}, P_{neg}] \quad (1.5)$$

#### 1.4 Αρχιτεκτονική CNN

Μετά την εξαγωγή των προφίλ των παραμέτρων, τα διανύσματα αυτά κωδικοποιούνται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αξιοποιηθούν βέλτιστα από το CNN. Κατ' επέκταση, γίνεται κανονικοποίηση των δεδομένων, έτσι ώστε οι τιμές των προφίλ των ILD και ITD αντίστοιχα να έχουν μέσο όρο 0 και τυπική απόκλιση 1, ενώ στη συνέχεια τα κανονικοποιημένα προφίλ συλλέγονται σε ένα 4Δ διάνυσμα *Εισόδου* ώστε να τροφοδοτηθούν στο CNN ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Είσοδος}[T_f, 1] &= Profile_{ILD}[T_f, 1] \\ \text{Είσοδος}[T_f, 2] &= Profile_{ILD}[T_f, 2] \\ \text{Είσοδος}[T_f, 3] &= Profile_{ITD}[T_f, 3] \\ \text{Είσοδος}[T_f, 4] &= Profile_{ILD}[T_f, 4] \end{aligned} \quad (1.2)$$

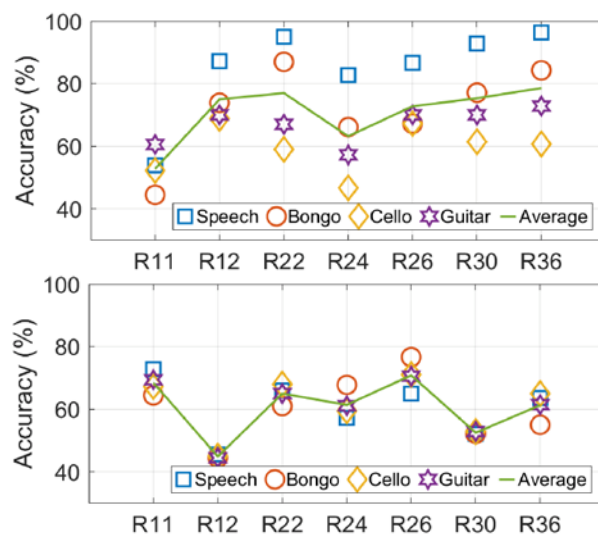
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, έχει την εξής δομή:

- Ένα επίπεδο εισόδου διαστάσεων  $[T_f, 4]$
- 3x 2Δ Συνελκτικά επίπεδα, με μέγεθος πυρήνα, 9, 6 και 6 αντίστοιχα, ακολουθούμενα από μια πράξη 2Δ Max-Pooling.
- Ένα επίπεδο flattening, το οποίο ανασχηματίζει την πολυδιάστατη έξοδο του τελευταίου επιπέδου Max-Pooling σε ένα μονοδιάστατο διάνυσμα.
- Ένα πλήρως διασυνδεδεμένο επίπεδο
- Το επίπεδο εξόδου που αποτελείται από 37 νευρώνες, κάθε ένας εκ των οποίων αντιστοιχεί στα 37 αζιμούθια του εμπροσθεν οριζόντιου επιπέδου με βήμα 5°.

## 2. Αποτελέσματα

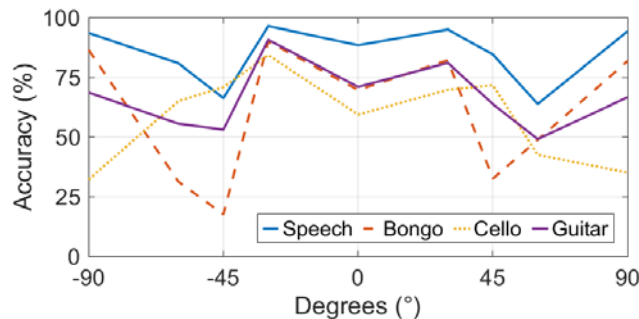
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στα Σχήματα 2.1 και 2.2 για τον εντοπισμό του DOA ηχητικών πηγών, σε σύγκριση με ένα state-of-the-art (SOTA) μοντέλο [16] ως μέτρο σύγκρισης.

Η απόδοση του μοντέλου είναι εμφανώς καλύτερη όταν η ηχητική πηγή εκπέμπει σήματα ομιλίας όπως είναι αναμενόμενο, αφού αν και έχει εκπαιδευτεί με διαφορετικά σήματα ομιλίας, το βασικό συχνοτικό περιεχόμενο παραμένει ίδιο. Ενώ κατά μέσο όρο η προτεινόμενη μέθοδος γενικά επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα, υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των διαφορετικών σημάτων, πράγμα που δεν ισχύει στη μέθοδο SOTA.



Σχήμα 2.1 Accuracy της προτεινόμενης μεθόδου (άνω) και του SOTA (κάτω) για κάθε δωμάτιο. Διαφορετικά σήματα υποδεικνύονται με διαφορετικά σχήματα: Ομιλία: Τετράγωνο, Μπόνγκο: Κύκλος, Τσέλο: Ρόμβος, Κιθάρα: Αστέρι. Η γραμμή δείχνει τη μέση απόδοση για κάθε δωμάτιο.

Τέλος στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η μέση απόδοση του μοντέλου συναρτήσει της γωνίας άφιξης. Η συμμετρική φύση της ακρίβειας εντοπισμού ως προς τις  $0^\circ$  είναι αναμενόμενη αφού τέτοιου είδους συμμετρία παρατηρείται και στις παραμέτρους ILD και ITD που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Η ακρίβεια του εντοπισμού φθίνει γύρω από τις  $45^\circ$  λόγω των ομοιοτήτων μεταξύ των παραμέτρων από σήματα που προέρχονται από εκείνη την περιοχή.



Σχήμα 2.2 Μέση ακρίβεια εντοπισμού συναρτήσει της γωνίας άφιξης για διαφορετικά σήματα σε άγνωστα δωμάτια.

### 3. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία προτείνει μια καινούρια λύση για την αποτελεσματική εκπαίδευση ενός CNN με αμφιωτικές παραμέτρους, με στόχο τον ακριβή εντοπισμό πηγών με έναν γενικευμένο τρόπο, υπό διαφορετικές αντηχητικές συνθήκες και για διαφορετικά ηχητικά σήματα.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί υπάρχουσες BRIRs οδηγούμενες από διάφορα σήματα ήχου/φωνής για την δημιουργία των ILD και ITD, που εξαρτώνται από το αξιμούθιο της πηγής, συμπιέζοντας τις παραμέτρους κατά 94% με στόχο τη δημιουργία ενός διανύσματος μικρών διαστάσεων που παρέχει στο CNN όλες τις απαραίτητες χρονοσυχνοτικές πληροφορίες. Αυτή η συνοπτική παρουσίαση των αμφιωτικών παραμέτρων, επιτρέπει την εκτενή εκπαίδευση του CNN με ρεαλιστικά δεδομένα δωματίων με αποτέλεσμα τα διάφορα σενάρια αξιολόγησης, με διαφορετικά αξιμούθια πηγής καθώς και αποστάσεις πηγής-δέκτη σε διάφορα δωμάτια να υποδεικνύουν υψηλή ακρίβεια εντοπισμού τόσο σε σήματα φωνής, όσο και σε σήματα μουσικής.

Η παρούσα εργασία περιορίζεται στον εντοπισμό πηγών που μια άγνωστη πηγή βρίσκεται σε κάποια θέση στο εμπροσθεν οριζόντιο επίπεδο, εντός ενός άγνωστου χώρου με αντήχηση. Ο εντοπισμός μια κινούμενης πηγής, πολλαπλών πηγών ή ο εντοπισμός σε γωνίες πέραν αυτού του εύρους θα χρειαστεί περαιτέρω τροποποιήσεις στη διαδικασία της εκπαίδευσης καθώς και της αρχιτεκτονικής του μοντέλου. Συγκεκριμένα, προκαταρκτικές μελέτες έχουν δείξει πως το μέγεθος του παραθύρου των διανυσμάτων εισόδου πρέπει να μειωθεί σημαντικά τόσο για τον εντοπισμό κινούμενων πηγών, όσο και για τον εντοπισμό πολλαπλών πηγών ταυτόχρονα. Επιπλέον δεδομένα θα χρειαστεί να προστεθούν στο σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης λόγω της δυσκολίας των παραπάνω προβλημάτων. Τέλος, όλες οι BRIRs που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία, έχουν καταγραφεί με το ανδρείκελο KEMAR και είναι σημείο μελλοντικής έρευνας, η διερεύνηση του πόσο η καταγραφή με διαφορετικά ανδρείκελα επηρεάζει το μοντέλο.



#### 4. Αναφορές

- [1] Lord Rayleigh, "XII. On our perception of sound direction," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 13, no. 74, pp. 214–232, 1907.
- [2] J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997.
- [3] T. May, S. van de Par, and A. Kohlrausch, "A Probabilistic Model for Robust Localization Based on a Binaural Auditory Front-End," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 19, no. 1, pp. 1–13, 2011.
- [4] J. Woodruff and D. Wang, "Binaural localization of multiple sources in reverberant and noisy environments," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 5, pp. 1503–1512, 2012.
- [5] J. Ding, Y. Ke, L. Cheng, C. Zheng, and X. Li, "Joint estimation of binaural distance and azimuth by exploiting deep neural networks," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 147, no. 4, pp. 2625–2635, 2020.
- [6] M. Zohourian and R. Martin, "Binaural speaker localization and separation based on a joint ITD/ILD model and head movement tracking," in *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Mar. 2016, pp. 430–434. doi: 10.1109/ICASSP.2016.7471711.
- [7] S. Pearce, "Audio Spatialisation for Headphones - Impulse Response Dataset (Version 6.7.0) [Data set]." 2020. doi: 10.5281/zenodo.3678948.
- [8] P. Zachos, G. Kamaris, and J. Mourjopoulos, "An Efficient Data Reduction Method for Binaural Parameter Utilization," in *Forum Acusticum*, Lyon, France, Dec. 2020, pp. 1953–1960. doi: 10.48465/fa.2020.0948.
- [9] T. May, S. Van De Par, and A. Kohlrausch, "Binaural Localization and Detection of Speakers in Complex Acoustic Scenes," in *The technology of binaural listening*, vol. 15, J. Blauert, Ed. Berlin-Heidelberg-New York NY: Springer, 2013, pp. 397–425.
- [10] J. S. Garofolo, L. F. Lamel, W. M. Fisher, J. G. Fiscus, and D. S. Pallett, "DARPA TIMIT acoustic-phonetic continuous speech corpus CD-ROM. NIST speech disc 1-1.1," *NASA STI/Recon technical report n*, vol. 93, p. 27403, 1993.
- [11] H. Wierstorf and M. Geier, "Binaural room impulse responses recorded with KEMAR in a mid-size lecture hall [Data set]." 2016. doi: 10.5281/zenodo.160749.
- [12] H. Wierstorf and M. Geier, "Binaural room impulse responses recorded with KEMAR in a small meeting room [Data set]." 2016. doi: 10.5281/zenodo.160751.
- [13] H. Wierstorf, "Binaural room impulse responses of a 5.0 surround setup for different listening positions [Data set]." 2016. doi: 10.5281/zenodo.160761.
- [14] J. Farjo, R. A. Assi, W. Masri, and F. Zaraket, "Does Principal Component Analysis Improve Cluster-Based Analysis?," in *2013 IEEE Sixth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops*, 2013, pp. 400–403. doi: 10.1109/ICSTW.2013.52.
- [15] Y. Zhang, "Artificial neural networks based on principal component analysis input selection for clinical pattern recognition analysis. *Talanta*," vol. 73, no. 1. pp. 68–75, Mar. 01, 2007. doi: 10.1016/j.talanta.2007.02.030.
- [16] N. Ma, T. May, and G. J. Brown, "Exploiting Deep Neural Networks and Head Movements for Robust Binaural Localization of Multiple Sources in Reverberant Environments," *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 25, no. 12, pp. 2444–2453, Dec. 2017, doi: 10.1109/TASLP.2017.2750760.

## **Πρώτη αποτύπωση της ακουστικής του Α' αρχαίου θεάτρου της Λάρισας**

Gavriil Kamaris<sup>1</sup>  
El. Engineer, PhD Candidate  
[gpkamaris@upatras.gr](mailto:gpkamaris@upatras.gr)

John Mourjopoulos<sup>1</sup>  
Professor  
[mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr)

Dimitrios L. Karagkounis<sup>2</sup>  
Architect Eng.  
[karagdk@gmail.com](mailto:karagdk@gmail.com)

Sofia D. Tsanaktsidou<sup>3</sup>  
Civil Engineer  
[stsanakt@gmail.com](mailto:stsanakt@gmail.com)

<sup>1</sup>Audio & Acoustic Technology Group, Electrical & Computer Engineering Dept., University of Patras, (Greece)

<sup>2</sup>Department of Archaeological Projects and Studies, Ephorate of Antiquities of Larissa, Ministry of Culture and Sports Diachronic Museum of Larissa, Mezourlo, 41500, Larissa (Greece)

<sup>3</sup>Ancient Theatre of Larissa, Ephorate of Antiquities of Larissa, Ministry of Culture and Sports Ancient Theatre of Larissa, 10-12 Mitropolitou Arseniou, Larissa, 41223, Larissa (Greece)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία αυτή παρουσιάζει τις ακουστικές ιδιότητες ενός από τα δύο αρχαία θέατρα που βρίσκονται στη Λάρισα. Το Αρχαίο θέατρο 'Α ανεγερθεί αρχικά στο πρώτο μισό του 3<sup>ου</sup> αιώνα π.Χ.. Αποτελείται από το κοίλο διαμέτρου 25.5 μέτρων (αντίστοιχα η Επίδαυρος 20μ), και την κερκίδα η οποία αποτελείται από 11 τομείς με 25 σειρές θέσεων και το κτίσμα της σκηνής το οποίο εν μέρει διατηρείται.*

*Η παρούσα εργασία περιγράφει την πρώτη προσπάθεια αποτύπωσης της ακουστικής συμπεριφοράς του θεάτρου με την χρήση : α. παντοκατευθυντικού μικροφώνου και β. αμφιωτικής διάταξης μικροφώνων.. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται επίσης με άλλα αρχαία θέατρα.*

### ***The acoustics of the recently excavated Larissa Theatre A***

#### **ABSTRACT**

*The work describes the acoustic properties of one of the two ancient theatres that existed in the city of Larissa, in Thessaly in central Greece. This theatre was initially built in the first half of the 3rd century B.C. It consists of the orchestra having a diameter of 25.5m (compared to 20m for Epidaurus), the cavea is divided in 11 sectors each with 25 tiers of seats and a partially preserved stage building is also in existence.*

*The work presents a first record of the acoustics of this monument with in-situ measurements based on: (a) an omnidirectional and (b) with a binaural dummy head. The results of these measurements are also compared to other ancient Theatres.*

## Introduction

The First Ancient Theatre of Larissa is the largest Theatre in Thessaly, having a capacity of 10,000 people. It is located in the city centre of the modern city of Larissa, in central Greece and was constructed in the first half of the 3rd century BC. In period, it was located at the southern foothills of the hill "Fortress", where the ancient city's fortified Acropolis stood. An earthquake in the late 2nd century or early in the 3rd century AD destroyed the second floor of the scene, the Doric entablature and a part of the transcendent epitheatre. Almost its total destruction was induced by a second strong earthquake that occurred in 7th century AD[1].

According to long-time head of the Ephorate of Antiquities and the monument's excavator, the archaeologist Athanasios Tziafalias, [2,3] the theatre had a lifespan of six centuries, from the early 3rd century BC until the late 3rd or early 4th century AD. During the first centuries, apart from theatrical performances, the assemblies of the senior regional authority were hosted, the so called "Koinon" of the Thessalians. In the 2nd c. BC the Romans converted it into an arena, reserved for the official celebrations. Subsequently, the theatre was gradually buried, notably so after the 1868 earthquake.

In the early 20th century, the then Ephor of Antiquities Apostolos Arvanitopoulos began excavations that revealed part of the scene ("skene"). After the Second World War blocks of flats constructed directly on the theatre's surface, which during the 1980's were compulsory demolished so that a gradual unearthing began that lasted until the mid-2000s.

Several monuments from different eras were found close to the Theatre, such as the smaller second ancient Theatre, the basilica of St. Achilles, etc, evidence to the city's continuous habitation throughout the centuries.

Today, the First Ancient Theatre of Larissa (Fig. 2.1) has been unearthed almost in its entirety. Its cavea ("koilon") is built on a natural hill side and is divided by the diazoma, a 2 m wide corridor, into the main theatre and the "epitheatron", the cavea's lower and upper section respectively. The main theatre was divided by 10 staircases ("klimakes") into 11 cunei, where each cuneus ("kerkida") consists of 25 rows of seats ("edolia"). When the theatre was converted to an arena, the three first rows were removed and their marble seats were repurposed to retain the upper rows. To this day, only a small part of the epitheatron is preserved. The orchestra has an estimated diameter of 25m and is surrounded by a closed conduit, the "evripos" that runs under the foundations of the eastern and western rooms of the scene building. The retaining walls ("anallimata") are maintained in excellent condition, although still not fully unearthed.

The Scene building ("Skene") is one of the best preserved and perhaps the most luxurious of the few examples of this category of Hellenistic buildings that survive. It is preserved in situ, retaining numerous architectural elements of the colonnade that forms the Proskenion, and the drystone masonry that forms the side rooms. The Proskenion is made of marble and the rooms are made of limestone and marble blocks without the use of mortar. The stones' origins are traced in the ancient marble quarry of Kastri (Melfos V., 2010) and limestone quarry of Tirnavos (Melfos V., 2011). Throughout the centuries several architectural elements, especially limestone blocks

were removed and used as building materials, and can now be found in nearby historic buildings of the early Byzantine and Ottoman eras [1].

## **1. Measurements**

### *1.1 Measurements*

The first set of acoustic measurements followed the approach of previous work in the ancient theatre of Epidauros [5]. The measurements' positions are placed in three different rows and in three different angles 50, 450 and 850. An additional set of 5 measurements was conducted on cunei D since this section retains the most well preserved seats though those measurements are not presented and analysed in the current work. A list of the positions is given in Table 1.1 and in Fig. 1.1. In Fig. 1.2 it is shown the measurement equipment during the preparation of the measurements.

These measurements should be considered as preliminary, as the restoration of the main theatre - by means of repositioning ancient and installing new seats - is not yet finished and in front of the skene, there was an obstacle (a crane truck of  $8 \times 2.5 \times 1.6$  m used for lifting the marble seats, in the scope of the restoration works). Although this crane was placed about 4 m from the skene façade and the sound source was about 8 m far from the truck, another set of measurements is scheduled after the restoration is finished.

Three types of measurements were conducted: (i) via an omni free field microphone for calculating the acoustical parameters (ii) via a binaural head for calculating IACC and for further virtual auralizations and (iii) via a Sound Pressure Level meter for direct measurement of the sound pressure level differences and the ambient noise. The sound source was producing white noise signal of 100 dBA at 1 m. Table 1.2 gives a list of the equipment used for the measurements.

### *1.2 Ambient noise*

Since the theatre is located in the centre of the city of Larissa and behind the skene which is below the ground level, there are many taverns and cafeterias which were closed at the time of the measurements. However, noises were present from passers-by and wind, affecting mostly measurements at the upper positions, near the hills' top. The wind gusts mostly affected the binaural measurements since as the rest of the microphones were equipped with wind shields. In general, the SNR of the measurements is greater than 30 dB.

## **2. Data analysis & Acoustic indices**

### *2.1 Measurements*

The free field measurements were performed using REW [7] software and a log sin. sweep signal of 10 sec duration [8]. The sound source was set at 100 dB at 1 m for a 1 kHz sinewave. The recordings were at 44.100 Hz and subsequently the responses were exported using a Half Hanning window of 3 seconds. The measured impulse responses (IR)  $h(t)$  were imported to Audacity [9] for analysis and calculation of the

Acoustics Parameters, using Aurora Acoustical Parameters available in Aurora plugins package [10].

The acoustical parameters calculated are, D50 (%), C80 (dB), STI/RaSTI and frequency response, as presented in the following sections.



Figure 1.1 Top view of the theatre showing the measurement positions (blue dots) and the sound source position as the red dot [6]

Table 1.1 Measurement positions

Position	Distance (m)	Angle (deg)	Row Number
R1	20	5	5
R2	25	5	12
R3	30	5	17
R4	20	45	5
R5	25	45	12
R6	30	45	17
R7	20	85	5
R8	23.5	85	11
R9	27	85	15

## 2.2 Calculation of acoustical parameters

The Acoustical Parameters are calculated in accordance to ISO3382 [11] as also mentioned in [10].

The Definition index for speech signals (D50%) is defined as:

$$D50(\%) = \frac{\int_0^{50ms} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} 100 \quad (2.1)$$

The Clarity for music C80 (dB) is defined as

$$C80(dB) = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (2.2)$$

The RaSTI index is defined as:

$$RaSTI = [S/N + 15]/30 \quad (2.3a)$$

Where S/N is the signal to noise ratio defined as:

$$S/N = 10 \log \frac{\int_0^{95ms} a(t)p^2(t) dt}{\int_{95ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.3b)$$



Figure 1.2 Preparation of the measurement setup. It consists of the KEMAR binaural dummy head, the omnidirectional microphone and the SPL meter.

Table 1.2 Measurement equipment

Item	Model
Sound Card	RME Babyface
Free Field mic.	PCB 377A40
Binaural mic.	G.R.A.S. KEMAR
SPL meter	NTi Audio XL2 – M2210
Sound Source	Mackie Thumb 15BST
Calibrator	G.R.A.S. Type 42AB

Where  $a(t)$  is the contribution of the signal to the measured sound pressure level and  $p(t)$  is the measured sound pressure level.

The STI is calculated using the Modulation Transfer Functions method described in [12].

### 2.3 Measurements

The Binaural impulse responses were recorded using Audacity [6] and processed using the Aurora plug-ins utilizing the Binaural dummy head option for the analysis [7]. The excitation signal is a sign sweep of 10 s duration at a sampling frequency of 44.100 Hz.

From the binaurally recorded impulse responses  $h_L(t)$  and  $h_R(t)$  the normalized Interaural Cross Correlation (IACC) was evaluated as:

$$\Psi_{y_l,r}(\tau) = \frac{\int_{t=-\infty}^{+\infty} y_l(t) * y_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t=-\infty}^{+\infty} y_l^2(t) * \int_{t=-\infty}^{+\infty} y_r^2(t) dt}} \quad (2.4)$$

with the internal delay  $\tau$ , and left and right sound pressure signals,  $y_l(t)$  and  $y_r(t)$  [13].

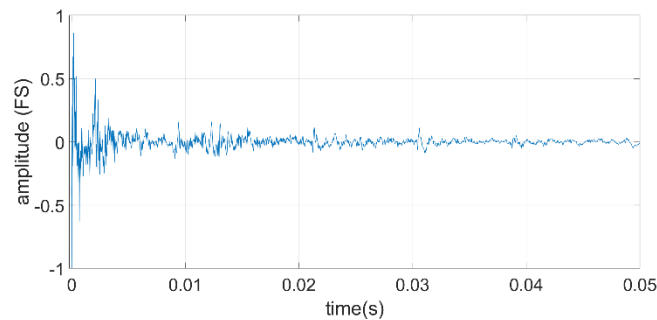


Figure 2.1 Typical IR for position R1 (first 50ms)

### 3. Results

#### 3.1 SPL vs distance

Figure 3.1 presents the measured SPL reduction with distance. The variation of SPL with distance is comparable to that measured for Epidaurus [5], noting that here the measurements were restricted to the maximum distance of 30 m as opposed to the longer distances for Epidaurus (almost 60m to the far position).

#### 3.2 Acoustic indices

##### 3.2.1 Clarity and Definition

As can be observed from Figs.3.2, both Clarity and Definition were found to be exceptional and independent of distance and angle.

##### 3.2.2 Speech intelligibility

Speech intelligibility is predicted to be excellent and largely independent of distance or angle (Fig 3.3). For the longest measured distance, intelligibility is even slightly improved, a result of the higher contribution from reflection / diffraction from the lower tiers.

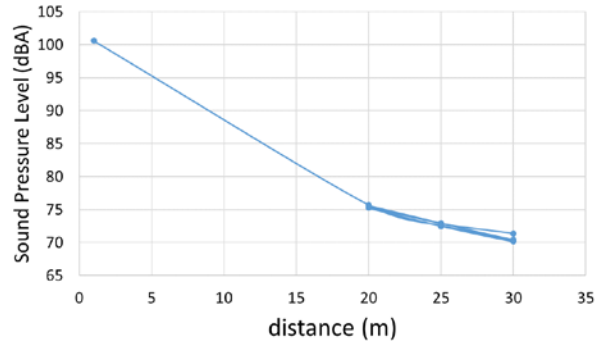


Figure 3.1 – SPL vs distance measurement

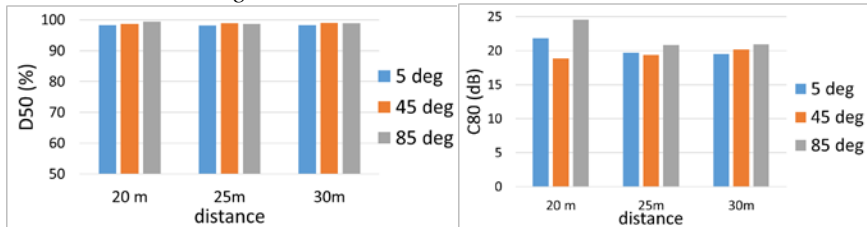


Figure 3.2 D50 (%) (left) and C80 (dB) (right) for the measurement positions.

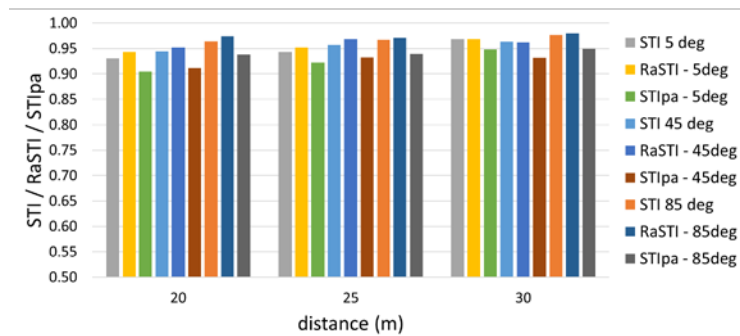


Figure 3.3 The various Speech Intelligibility Indexes for the different measurement positions.

### 3.3 Frequency domain analysis

#### 3.3.1 Response spectra

The response in Fig. 3.4 shows a rather more even characteristics than other measured theatres. The typical deep around 180 Hz (due to the orchestra floor reflection) is present but the dominant peak around 1 KHz is still present but rather less prominent than the spectra measured in Epidaurus [5].





Figure 3.4 Frequency responses for the 3 different angles and the nearest positions (R1-R4-R7).

### 3.3.2 Clarity for speech vs frequency

Figure 10 shows the mean clarity for speech (C50) over frequency for three different distances from the sound source. It is obvious that this parameter does not vary significantly with the position and even for the far away positions, the clarity of speech is expected to be at very good level.

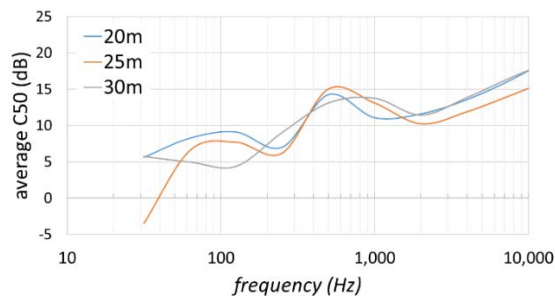


Figure 3.5 Mean C50(dB) versus frequency for the same angles and for the different distances

## 4. Conclusions

The Ancient theatre of Larisa A, after its recent unearthing and ongoing restoration was thoroughly measured here and provides evidence for brilliant acoustics for speech transmission. Although the theatre is placed in the centre of a modern city, the background noise did not affect the acoustic performance of the theatre.

This first measurement session produced data from free field microphone and a binaural dummy head, able to fully characterize the acoustics of the theatre and create virtual auralizations. Measurements are also planned for a latter stage of the ongoing restoration to record the acoustics of a fully restored cuneus and scene of the theatre.

## 5. Acknowledgements

The current measurements were conducted during the NSRF 2014-2020 funded project “Restoration of Ancient Theatre of Larissa – Phase E” where D. Karagkounis is Head Supervisor of the Restoration of the Ancient Theatre of Larissa Project (1988-2022), in collaboration with the Audio & Acoustic Technology Group of the University of Patras

Authors would like to thank the Archaeologist Elsa Zelou and the theatre guard Kaite Dalla for being patient and helpful during the measurements.

## 6. References

- [1] <http://www.larissa-theatre.com/en/about-the-theatre-2/> (accessed on 28/04/2022)
- [2] Tziafalias A. (1985). Ancient Theater of Larisa, Proceedings of A' History-Archaeology Symposium, Larissa 1985, p. 162-185 (in Greek)
- [3] Tziafalias A. (2000). The work of 15<sup>th</sup> EPKA of Larisa, The work of Ephorate of Antiquities, of the Ministry of Culture and sports at Thessaly (1990-1998), 1<sup>st</sup> Scientific meeting, Volos, p. 91-96 (in Greek)
- [4] Karagkounis D.L., Tsanaktsidou S.D. (2022) Proposal for the Restoration of the Skene of the First Ancient Theatre of Larissa, Greece. In: Vayas I., Mazzolani F.M. (eds) Protection of Historical Constructions. PROHITECH 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 209. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4\\_89N](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4_89N).
- [5] Psarras, S., Hatziantoniou, P., Kountouras, M., Tatlas, N. A., Mourjopoulos, J. N., & Skarlatos, D. (2013). Measurements and analysis of the Epidaurus Ancient Theatre acoustics. *Acta Acustica United with Acustica*, 99(1), 30-39. DOI: 10.3813/AAA.918585
- [6] Google. (n.d.). [Google Maps satellite image of the Larisa Theatre]. Retrieved March 10, 2022, from <https://goo.gl/maps/9tJTq25bsvcKYtK98>
- [7] REW v5.20.4 - <https://www.roomeqwizard.com/> (accessed on 10/04/2022)
- [8] Farina A., Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. AES, 2000.
- [9] Audacity Team (2020): Audacity (Version 2.4.1) [Computer program]. Retrieved March 10, 2022, from <http://audacityteam.org/>
- [10] Campanini, S., & Farina, A. (2009). A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module, Linux Audio Conference. Parma, Italy, paper B, 2.
- [11] ISO 3382-1. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
- [12] H.J.M. Steeneken and T. Houtgast A physical method for measuring speech-transmission quality. *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 318-326, 67(1), 1980
- [13] Blauert, J. (Ed.). (2013). The technology of binaural listening. Springer Science & Business Media.

## **Πρόσφατες έρευνες σε αρχαία θέατρα : προβλήματα ηχοπροστασίας & επαναλειτουργίας**

Νίκος Μπάρκας  
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ  
nbarkas@arch.duth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ανακοίνωση επιχειρεί να καταγράψει την υφιστάμενη κατάσταση έντεκα (11) αρχαίων θεάτρων, ως συνέχεια μιας μακροχρόνιας έρευνας παρατηρητηρίου (από το 2004) η οποία επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα (σε άλλα 21 αρχαία θέατρα), αλλά διακόπηκε την τελευταία τριετία, λόγω της πανδημίας*

*Στόχος της έρευνας είναι η ακουστική αξιολόγηση της υφιστάμενης ή δυνητικής επαναλειτουργίας των αρχαίων θεάτρων, με παραμέτρους το είδος των πηγών και τις στάθμες οχλήσεις. Η αξιολόγηση της οικοδομικής κατάστασης των θεάτρων αναφέρεται στην ορχήστρα, το κοίλο, το κτίριο της σκηνής, αλλά και τις σύγχρονες λειτουργικές υποδομές των θεατρικών χώρων. Όπως φαίνεται, την τρέχουσα περίοδο έχουν ενταθεί οι εργασίες αποκατάστασης των θεατρικών μνημείων, ενώ συνεχίζονται οι έντονες αστικές πιέσεις (κυκλοφοριακοί & αστικοί θόρυβοι) στο εγγύς περιβάλλον τους.*

### **Recent research in ancient theaters: noise protection & reuse problems**

#### **ABSTRACT**

*The announcement attempts to record the current state of eleven (11) ancient theaters, as a continuation of a long-term observatory survey (since 2004) which is repeated at regular intervals (in another 20 ancient theaters), but was interrupted during the last three years, due to the pandemic*

*The aim of the research is the acoustic evaluation of the existing or potential reuse of the ancient theaters, with parameters such as the type of sources and the levels of noise. The evaluation of the building condition of the theaters refers to the orchestra, the stage building, but also the modern operational infrastructures of the space. As can be seen, in the current period the restoration works of the monuments have been intensified, while the intense urban pressures (traffic & urban noise) in their immediate environment continue.*

#### **Εισαγωγή**

Η ιδιόμορφη ακουστική συμπεριφορά των αρχαίων ελληνικών θεάτρων προσδιορίζεται από την ηχοπροστασία του χώρου, την ευχερή ανάδειξη του άμεσου ήχου,

την ενίσχυση των έγκαιρων και την υποβάθμιση των καθυστερημένων ηχο-ανακλάσεων. [1] Η ονομαστική ακουστική τους οφείλεται στην επιτυχημένη αναλογία της απόκρισης του χώρου ως προς την αρχική ένταση του αυθεντικού μηνύματος, σε συνθήκες χαμηλής αντήχησης, αναπλήρωσης των ενεργειακών απωλειών (με ολιγάριθμους, αλλ' ισχυρές ηχο-ανακλάσεις από την ορχήστρα, τη σκηνογραφία και το συνδυασμό τους), ιδίως προς τις ψηλότερες και πλέον απομακρυσμένες βαθμίδες του κοίλου [2]. Η ευχερής ανάδυση (rising) του θεατρικού μηνύματος, όταν εκφέρεται από φωνητικά εκπαιδευμένους και έμπειρους ηθοποιούς, προϋποθέτει μια εμφανή διαφορά ηχητικής στάθμης μεταξύ του ωφέλιμου σήματος και του θορύβου βάθους (20 με 25dB), καθώς και τη σαφή διάκριση των διαδοχικών τμημάτων της γλωσσικής αλυσίδας, διαδικασία που συνδέεται με τα υποκειμενικά κριτήρια ακουστικής ποιότητας. [3]

## 1. Οι πρόσφατες έρευνες

Το νέο δείγμα των 11 αρχαίων θεάτρων που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της πανδημίας περιλαμβάνει :

-τα θέατρα της Βεργίνας και της Μιέζας στη Μακεδονία (2020)[4],

-τα θέατρα των Γιτάνων, της Κασσώπης, το μικρό θέατρο της Αμβρακίας και το ρωμαϊκό θέατρο της Νικόπολης στην Ήπειρο (2021) [5],

-τα θέατρα της Μακύνειας, της Καλυδónας, της Πλευρώνας και των Οινιάδων στην Αιτωλοακαρνανία, καθώς και το θέατρο της Συκιώνας στην Κορινθία (2022).

Τα έξοδα της περιοδείας του συγγραφέα χρηματοδοτήθηκαν από το ερευνητικό πρόγραμμα του πρώην ΤΣΜΕΔΕ.

Στα συνοπτικά δεδομένα της έρευνας του Πίνακα 3.1 περιλαμβάνονται :

-στήλη Α η ονομασία και το σύγχρονο περιβάλλον του θεάτρου, όπου (Α) αστικό, (Η) ημι-αστικό και (Φ) φυσικό

-στήλη Β η τρέχουσα χρήση, όπου (Β1) παραστάσεις, (Β2) σε αναστήλωση, (Β3) μόνο για επίσκεψη

-στήλη Γ η κατάσταση του κοίλου, όπου (Γ1) ασφαλές, (Γ2) σε αναστήλωση, (Γ3) σε απαγόρευση,

-στήλη Δ η κατάσταση της ορχήστρας, όπου (Δ1) βατή, (Δ2) εργασίες, (Δ3) σε απαγόρευση,

-στήλη Ε η κατάσταση της σκηνής, όπου (Ε1) ερείπια θεμελίων, (Ε2) χαμηλοί τοίχοι, υποσκήνιο,

-στήλη Ζ η ελάχιστη στάθμη θορύβου βάθους (min SPL), το είδος των οχλήσεων (διαρκείς Δθ, περιστασιακοί Πθ) και οι στάθμες τους.

## 2. Οι παρατηρήσεις

### 2.1. Το αρχαίο θέατρο της Βεργίνας

Εντασσόταν σε ενιαίο οικοδομικό σύμπλεγμα κατάντι του ανακτόρου των Αιγών, αλλά έμεινε ημιτελές μετά τη δολοφονία του Φιλίππου Β' (336 πχ). Διασώζονται από πωρόλιθο τα αναλήμματα των παρόδων, τα ερείπια της σκηνής, η πρώτη

σειρά των εδωλίων, η βάση της θυμέλης και ο περιμετρικός αγωγός στην ορχήστρα, ενώ τα υπόλοιπα μέλη είτε ήταν χωμάτινα, είτε αφαιρέθηκαν, οπότε χάθηκαν τα ίχνη τους. Ο χώρος της ορχήστρας φέρει ίχνη ρωμαϊκής μετατροπής για θηριομαχίες. Το κτίριο της σκηνής παρέμεινε ανολοκλήρωτο. [6]

Κατά τη σύγχρονη εποχή, το θέατρο βρίσκεται σε ημι-αστικό περιβάλλον, κοντά στον οικισμό της Βεργίνας, ωστόσο δεν μπορεί να λειτουργήσει θεατρικά, επειδή οι βαθμίδες του κοίλου παραμένουν ασαφείς. Επικρατεί χαμηλός θόρυβος βάθους (33dB[A]). Καταγράφηκαν ήχοι της φύσης 45 dB[A], οδική κυκλοφορία 57 dB[A] (σε απόσταση περίπου 1.300μ.), τουριστική κίνηση προς το μουσείο της Βεργίνας 71 dB[A], καθώς και θόρυβοι από τις αναστηλωτικές εργασίες (έως 91 dB[A]). [4]

## 2. 2. Το αρχαίο θέατρο της Μιέζας

Βρίσκεται στους πρόποδες του Βερμίου στην Ημαθία. Ανάγεται στην ελληνιστική εποχή και είχε σχήμα σφενδόνης. Σώζεται η χωμάτινη ορχήστρα ακτίνας 11μ. που μετατράπηκε σε αρένα, κοίλο με συνδυασμό λάξευσης και επιχωμάτωσης στη φυσική πλαγιά (τουλάχιστον 19 βαθμίδες σε 4 κερκίδες και 5 κλίμακες) και τα λίθινα ερείπια της σκηνής. Τα αρχικά αναλήμματα των παρόδων μάλλον κατέρρευσαν από σεισμό και αντικαταστάθηκαν από πρόχειρους τοίχους που εμφανίζουν ασύμμετρες τις απολήξεις του κοίλου. [6].

Το θέατρο βρίσκεται σε ημι-αστικό περιβάλλον και πριν από την τρέχουσα περίοδο των αναστηλωτικών εργασιών, φιλοξενούσε ευκαιριακές παραστάσεις. Ο θόρυβος βάθους είναι 33 dB[A]. Καταγράφηκαν θόρυβοι της φύσης 45dB[A], αγροτικά οχήματα (εγγύς της ορχήστρας) 50 dB[A] και χαμηλή κυκλοφορία 67 dB[A] από την επαρχιακή οδό Βέροιας-Σκύδρας (σε απόσταση 650μ) [4]

## 2.3. Το αρχαίο θέατρο των Γιτάνων

Τα Γίτανα ήταν αρχαία πόλη της Θεσπρωτίας. Το θέατρο βρέθηκε στις υπώρειες της ακρόπολης και περιβάλλεται από παραπόταμο του Καλαμά. Σώζεται η ορχήστρα (χωρίς τις παρόδους), τα ερείπια των θεμελίων της σκηνής, καθώς και τμήμα του λίθινου κοίλου (με Δ άνοιγμα προς το ποτάμι), που κτίστηκε με συνδυασμό επιχωμάτωσης και λάξευσης στην πλαγιά (με 2 διαζώματα, 28 βαθμίδες σε 5 κερκίδες χωρισμένες από 4 αξονικές κλίμακες).

Ο θεατρικός χώρος κινδυνεύει από τις υπερχειλίσσεις του Καλαμά, αλλά και τα υπόγεια ύδατα που αποσαθρώνουν το ασβεστολιθικό υποβάθρου της περιοχής. [7] Την τρέχουσα περίοδο είναι ανοιχτό στο κοινό, μέχρι να ξεκινήσουν εργασίες προστασίας. Αξιοσημείωτο είναι πως το ποτάμι (περίπου 50μ πίσω από την σκηνή), δεν παρενοχλεί το θέατρο, όπου κυριαρχούν οι θόρυβοι της φύσης (41dB[A]), με χαμηλό θόρυβο βάθους (29 στο κάτω διάζωμα και 31 dB[A] στο άνω διάζωμα ). [5]

## 2.4. Το αρχαίο θέατρο της Κασσώπης

Η αρχαία Κασσώπη βρέθηκε στις Ν υπώρειες του Ζάλογγου. Το θέατρο κατασκευάστηκε τον 3ο αιώνα πχ κάτω από την ακρόπολη και (κατά τον Σ. Δάκαρη) εμφανίζει μεγάλη τυπολογική ομοιότητα με το θέατρο της Δωδώνης. Η ορχήστρα έχει ακτίνα περίπου 8μ. χωμάτινο δάπεδο και περιμετρικό αγωγό απορροής. Το κοίλο είχε στις άκρες πολυγωνικά αναλήμματα, στη στέψη περιμετρικό τοίχο με ανοίγ-

ματα και 2 διαζώματα (10 κερκίδες με πιθανά 23 και 11 βαθμίδες, χωρισμένες από 11 ακτινωτές κλίμακες). Η σκηνή ήταν ορθογώνια, με 2 παρασκήνια εκατέρωθεν του προσκηνίου, με 6 κίονες στην πρόσοψη και ίσως θεμέλια για ράμπες προς τις παρόδους. [7]

Κατά την τρέχουσα περίοδο το θέατρο είναι απλά επισκέψιμο. Ο θεατρικός χώρος διατηρείται σε σχετικά καλή κατάσταση και θα μπορούσε να λειτουργήσει μετά τις εργασίες στερέωσης. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον. Καταγράφηκε θόρυβος βάθους 34 dB[A], φύση 46dB[A] και το εργοτάξιο 60dB[A]. [5]

### 2.5. Το μικρό θέατρο της αρχαίας Αμβρακίας

Το λεγόμενο μικρό θέατρο της Αμβρακίας κατασκευάστηκε κατά την περίοδο της βασιλείας του Πύρρου (μέσα 4ου αιώνα πχ) και λόγω μεγέθους εξυπηρετούσε μάλλον βουλευτήριο ή ωδείο. Αποκαλύφθηκε η ορχήστρα (διάμετρος 6,7μ), μέρος του κοίλου, με Ν άνοιγμα, 3 κερκίδες (στην κεντρική σώζονται 4 και στις πλάγιες 3 βαθμίδες), καθώς και τμήμα 7,5μ του στυλοβάτη του προσκηνίου (πιθανά συνολικού μήκους 10 μ. και ύψους 2,40 μ). [7]

Στην υφιστάμενη κατάσταση βρίσκεται εγκλωβισμένο ανάμεσα σε πολυκατοικίες, στο κέντρο της σύγχρονης Άρτας, με θόρυβο βάθους 40dB[A] και έντονες οχλήσεις (κυκλοφορία, αστικές δραστηριότητες 58 ως 61dB[A]). [5]

### 2.6. Το ρωμαϊκό θέατρο της Νικόπολης

Η αρχαία Νικόπολη βρίσκεται περίπου 6χλμ έξω από την Πρέβεζα, στη συμβολή της εθνικής οδού προς Φιλιππιάδα με την επαρχιακή οδό προς Νικόπολη.

Ιδρύθηκε μετά τη νίκη στο Ακτιο (31 πχ) και εποικίσθηκε με τη βίαιη μετακίνηση κατοίκων από γειτονικές πόλεις. Το θέατρο της κτίστηκε έξω από τα τείχη. Στο κοίλο του (με ΝΔ άνοιγμα) συνδυάστηκε το φυσικό πρανές με λίθινο υπόβαθρο. Διαθέτει 3 διαζώματα και περιμετρική στοά στη στέψη. Η ορχήστρα είχε σχήμα κανονικού ημικυκλίου. Το κτίριο της σκηνής (μήκους 37μ. και περίπου ύψους 12 μ.) διέθετε scaenae frons και προσκήνιο (βάθους 8μ) με παρασκήνια στις άκρες [7]

Παρά τις διαχρονικές αλλοιώσεις και τη λιθοθηρία, στο παρελθόν φιλοξένησε θεατρικές εκδηλώσεις, ενώ επί μακρόν πραγματοποιούνται εκτεταμένες εργασίες προστασίας. Το περιβάλλον είναι ημιαστικό με θόρυβο βάθους 38 dB[A]. Καταγράφηκαν θόρυβοι της φύσης 41dB[A], βαριά οδική κυκλοφορία 59 dB[A] και εργασίες του εργοταξίου 68dB[A]. [5]

### 2.7 Το αρχαίο θέατρο των Οινιάδων

Η αρχαία πόλη των Οινιάδων βρίσκεται στην Ακαρνανία, κοντά στις εκβολές του Αχελώου. Κατά τον, Το θέατρο κατασκευάστηκε στα μέσα του 4<sup>ου</sup> αιώνα πχ (μελετήθηκε από τον E. Fiechter), στη Ν πλευρά του τείχους, κοντά στους νεωσοίκους της παλιάς κοίτης του ποταμού. Τον 3<sup>ο</sup> αιώνα πχ, η σκηνή του απέκτησε 2<sup>ο</sup> όροφο και προσκήνιο με παρασκήνια εκατέρωθεν, από τα οποία σώζονται μόνο ερείπια των θεμελίων. Μετά τις ρωμαϊκές επεμβάσεις, το κέντρο της ορχήστρας (με χωμάτινο δάπεδο, λίθινο περίγραμμα, ακτίνα περίπου 8μ και αγωγό απορροής) εμφανίζεται μετατοπισμένο σε σχέση με τον άξονα του κοίλου, που με Ν-ΝΔ άνοιγ-

μα διέθετε μάλλον 30 βαθμίδες (σώζονται 19 σειρές, χωρισμένες σε 11 κερκίδες, με 12 κλίμακες, χωρίς οριζόντιο διάζωμα). [8], [9]

Το θέατρο βρίσκεται σε εξαιρετικά ήσυχο, φυσικό περιβάλλον (θόρυβος βάθους 31dB[A]), προφυλαγμένο από την αγροτική κυκλοφορία στην αντίπερα πλευρά του λόφου της ακρόπολης (απόηχος 37dB[A]). Μετά από μια περίοδο εργασιών ανάδειξης (1986) πραγματοποιούνταν τακτικά παραστάσεις. Παραμένει επί μακρόν κλειστό για ανασκαφές στην ορχήστρα και τη σκηνή (67dB [A]).

#### 2.8. Το αρχαίο θέατρο της Πλευρώνας

Κατασκευάστηκε στα Δ της ακρόπολης (μελετήθηκε από τον E. Fiechter), στα τέλη του 3<sup>ου</sup> αιώνα πχ (235/4 πχ), περίπου 5χιλ Β του Μεσολογγίου. Είναι σχετικά μικρό θέατρο (πιθανά αρχικά εξυπηρετούσε βουλευτήριο). Εξαιτίας του περιορισμένου χώρου, το κτίριο της σκηνής (μάλλον διώροφο με προσκήνιο) ήταν σε επαφή με το τείχος (που πιθανά ενισχύθηκε στο μέσο της με εξωτερικό αναλημματικό πύργο). Η ορχήστρα έχει ακτίνα 5,8μ και χωμάτινο δάπεδο. Το κοίλο με Δ-ΝΔ άνοιγμα λαξεύτηκε στην πλαγιά με 3 κερκίδες και 4 κλίμακες (σώζονται περίπου 17 βαθμίδες και η αρχή των παρόδων), διέθετε πιθανά και άνω διάζωμα με λιθοδομή. [8], [9]

Το θέατρο φιλοξένησε στο παρελθόν ευκαιριακές παραστάσεις. Κατά την τρέχουσα περίοδο ο χώρος είναι κλειστός κι απροσπέλαστος, λόγω γενικευμένων εργασιών. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον με χαμηλό θόρυβο βάθους 34 dB[A] και επηρεάζεται από τον απόηχο της κυκλοφορίας (κατάντι, 38 dB[A]).

#### 2.9. Το αρχαίο θέατρο της Μακύνειας

Είναι λαξευμένο σε βραχώδη πλαγιά με N-NA άνοιγμα προς τον πατραϊκό κόλπο. Το κοίλο έχει σχήμα καμπύλου τόξου και περίπου 14 βαθμίδες σε ενιαία κερκίδα, χωρίς αναλήμματα, κλίμακες ή διάζωμα. Η ορχήστρα έχει επίσης σχήμα καμπύλου τόξου και περικλείεται στη Β πλευρά από 3 ευθύγραμμες σειρές βαθμίδων με διακεκριμένες θέσεις και λίθινο θρόνο μπροστά από το Α άκρο της προεδρίας. Από το κτίριο της σκηνής (ισόγειο στην όψη, ημι-ισόγειο με όροφο στην καταφύγεια) διασώζονται ερείπια από τα όρια των παρόδων και τα θεμέλια του προσκηνίου, ενώ το υπόλοιπο κατέρρευσε στην πλαγιά κατάντι ή αφαιρέθηκε για λιθοθηρία. [11]

Η ιδιόμορφη σύνθεση του χώρου παραπέμπει σε κάποιο είδος βουλευτηρίου, που μάλλον αποτέλεσε αρχική ή συμπληρωματική λειτουργία του. Ο θεατρικός χώρος χρησιμοποιήθηκε για ευκαιριακές θεατρικές εκδηλώσεις και την τρέχουσα περίοδο είναι επισκέψιμος.

Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον, όπου κυριαρχεί ο απόηχος της κυκλοφορίας των οδικών αξόνων της περιοχής (48 dB[A]) κατάντι, αλλά παρενοχλείτε ΒΑ ανάντι και από την εγκατάσταση ανεμογεννητριών (42 dB[A]) σε απόσταση περίπου 700μ.

#### 2.10. Το αρχαίο θέατρο της Καλυδώνας

Η αρχαία Καλυδώνα υπήρξε αστικό κέντρο της αρχαίας Αιτωλίας. Το θέατρο της θεωρείται οικοδόμημα του 4<sup>ου</sup> αιώνα πχ και λειτούργησε μέχρι τη βίαια μετοίκηση των κατοίκων στη Νικόπολη. Ανακαλύφθηκε κατά τη διάνοιξη της παλιάς Εθνικής Οδού προς τα Γιάννενα (1967), περίπου 50 μ. ανάντι της σκηνής.

Χαρακτηριστικό του θεατρικού χώρου είναι το ορθογώνιο σχήμα της ορχήστρας (16\*14 μ) και του κοίλου (με Ν άνοιγμα και περίπου 26 ~ 30 βαθμίδες, χωρίς κλίμακες ή διάζωμα), που παραπέμπει (όπως και η γειτονική Μακύνεια), σε αρχική ή κοινή χρήση με βουλευτήριο. Οι 9 χαμηλότερες βαθμίδες του κοίλου περιγράφουν 3 πλευρές της ορχήστρας, ενώ οι υπόλοιπες διατηρούν το ορθογώνιο σχήμα, αλλά με καμπύλες συναρμογές στις γωνίες. Από το κτίριο της σκηνής (μάλλον διώροφο, πιθανά σε μετέπειτα οικοδομική φάση, όπως και οι ψηλότερες βαθμίδες) διατηρούνται ερείπια των θεμελίων, (3 δωμάτια και κεντρικό θύρωμα προς το προσκήνιο). [10]

Φιλοξενεί ευκαιριακές παραστάσεις. Βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον με χαμηλό θόρυβο βάρους (32 dB[A]) και επηρεάζεται από την οδική κυκλοφορία (περίπου 50dB[A])

### 2.11. Το αρχαίο θέατρο της Συκιώνας

Η αρχαία Συκιώνα χτίστηκε στο τέλος του 4<sup>ου</sup> αιώνα π.χ, σε λόφο που δεσπόζει στον Κορινθιακό (πάνω από το Κιάτο). Το θέατρο της πόλης είχε Β-ΒΑ άνοιγμα, ορχήστρα ακτίνας περίπου 12μ (η οποία μειώθηκε σε ημι-κύκλιο κατά τη ρωμαϊκή μετατροπή), με χωμάτινο δάπεδο και περιμετρικό αγωγό απορροής. Η σκηνή του ήταν διώροφη, με προσκήνιο, παρασκήνια και κεκλιμένες ράμπες προς τις παρόδους. Το κοίλο είχε προεδρία και ήταν χωρισμένο σε 3 μέρη, με 2 διαζώματα. Διέθετε συνολικά 60 βαθμίδες με λίθινα εδώλια, με 15 κερκίδες στο κάτω διάζωμα χωρισμένες από 16 κλίμακες (σώζονται περίπου 8 βαθμίδες). [9]

Μοναδικό δείγμα διευθέτησης της κυκλοφορίας αποτελούν οι θολωτές δίοδοι στο μεσαίο διάζωμα (μήκους 16μ, εκ των οποίων εκκρεμεί η στερέωση της δυτικής) που εξασφάλιζαν την προσπέλαση των θεατών πίσω από το θέατρο και εξουδετέρωναν καθυστερημένες ηχο-ανακλάσεις από τις πλευρικές άκρες του κοίλου.

Κατά την τρέχουσα περίοδο ο χώρος είναι κλειστός για εργασίες στερέωσης. Το θέατρο βρίσκεται σε φυσικό περιβάλλον (θόρυβος βάρους 31 dB[A], άνεμος 42 dB [A]) με χαμηλή επιρροή από τον απόηχο της κυκλοφορίας κατάντι (33 dB[A]).

## 3. Επίλογος

Η εύρυθμη θεατρική λειτουργία σε υπαίθριες συνθήκες συναρτάται με τα ανθρωπομετρικά δεδομένα (φωνητικά και ακουστικά), την κλίμακα του χώρου, καθώς και τη συνδυαστική συνεισφορά της ορχήστρας και της σκηνογραφίας στη (παθητική) μεγαφωνική ενίσχυση του θεατρικού χώρου.

Από τις αρχές του 20ου αιώνα αναπτύχθηκε μια τάση επιστροφής του αρχαίου δράματος στο φυσικό χώρο του, με παραστάσεις έργων σχεδόν αποκλειστικά της κλασικής εποχής. Δυστυχώς όμως, οι απαραίτητες εργασίες προστασίας των θεατρικών μνημείων περιλαμβάνουν την αποκατάσταση ρωμαϊκών επεμβάσεων (που είχαν καταστροφική επίδραση στην αρχιτεκτονική σύνθεση του χώρου), ενώ το έλλειμα της ακουστικής ανάγεται μάταια στον ηλ/ακ εξοπλισμό των παραστάσεων.

Τα ερευνητικά δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την περίοδο της πανδημίας δείχνουν μια εκτεταμένη τύκνωση των εργασιών προστασίας, οι οποίες έχουν θέσει επί μακρόν εκτός θεατρικής λειτουργίας (ή και επίσκεψης) διάφορα θέατρα. Παράλ-



ληλα, επιβεβαιώνονται οι έντονες αστικές πιέσεις, κυρίως από κυκλοφοριακούς θορύβους στο σύγχρονο ηχητικό περιβάλλον των αρχαίων θεάτρων. [1] Συνοπτικά :

Πίνακας 1.2 Συνοπτική καταγραφή των δεδομένων

<b>Α21 Βεργίνα</b>	B3	Γ3	Δ1	E1	37
Φ / Πθ	φύση 45, εργασίες προστασίας 59				
<b>Α22 Μίεζα</b>	B1	Γ1	Δ1	E1	39
Φ / Πθ	φύση 47, κυκλοφορία 49				
<b>Α23 Γίτανα</b>	B2	Γ2	Δ1	E1	29 - 31
Φ / Πθ	φύση 41, άνεμος 50				
<b>Α24 Κασσώπη</b>	B2	Γ3	Δ2	E1	34
Φ / Πθ	φύση 46, εργασίες προστασίας 60				
<b>Α25 Αμβρακία</b>	B3	Γ2	Δ3	E1	40
A / Δθ	αστικές δραστηριότητες 58 - 61				
<b>Α26 Νικόπολις</b>	B2	Γ2	Δ2	E2	38
H / Δθ	κυκλοφορία 58, εργασίες προστασίας 68				
<b>Α27 Μακύνεια</b>	B1	Γ1	Δ1	E1	37
Φ / Δθ	αιολικά 42, απόηχος κυκλοφορίας 48				
<b>Α28 Καλυδώνα</b>	B1	Γ1	Δ1	E1	32
Φ / Δθ	κυκλοφορία ανάντι 50				
<b>Α29 Πλευρώνα</b>	B2	Γ3	Δ2	E1	34
Φ / Πθ	απόηχος κυκλοφορίας 38				
<b>Α30 Οινιάδες</b>	B2	Γ2	Δ2	E1	31
H / Πθ	κυκλοφορία 37, εργασίες προστασίας 67				
<b>Α31 Συκιώνα</b>	B2	Γ1	Δ1	E1	31
N / Πθ	απόηχος κυκλοφορίας 33, φύση 42				

-παραμένουν κυρίως σε φυσικό (ή έστω ημι-αστικό) περιβάλλον (8/11), με χαμηλό θόρυβο βάθους (< 35dB[A] σε 6/11 θέατρα του δείγματος)

-για να αντιμετωπιστούν οι παραπάνω σηλήσεις θα χρειαστούν πολεοδομικές ρυθμίσεις στην ευρύτερη περιοχή του μνημείου,

-βρίσκονται εκτός θεατρικής λειτουργίας (7/11 θέατρα),

-έχουν φιλοξενήσει εκδηλώσεις στο παρελθόν, ευκαιριακά και χωρίς θεατρικές υποδομές (8/11), ενώ σε κάποια θέατρα (2/11) είναι μάλλον ανέφικτη η σύγχρονη επαναλειτουργία,

-παντού απομένουν μόνο ερείπια θεμελίων στο χώρο της σκηνής,

-ελλείπει σκηνής, η ενεργοποίηση των ακουστικών δυνατοτήτων κάθε θεατρικού χώρου θα απαιτήσει ανακλητές (προσωρινές) σκηνογραφικές παρεμβάσεις.

Η αναλυτική παρουσίαση, καθώς και η υπολογιστική ακουστική αξιολόγηση της ανάδυσης του ωφέλιμου σήματος στο χώρο καθενός θεάτρου, σε εναλλακτικά σενάρια ενεργοποίησης της (παθητικής) μεγαφωνικής ακουστικής λειτουργίας (χωρίς ηλ/ακ ενίσχυση) και σε συνάρτηση με τις διαστάσεις κάθε χώρου θα παρουσιαστεί σε προσεχή δημοσίευση.

#### 4. Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Barkas, N.: «Ancient Greek Theaters: current operation vs contemporary noise environment» ψηφιακά πρακτικά *Euronoise Crete*, pp 2133 - 2142, 2018 \*
- [2] Canac, Fr.: *L'Acoustique des Théâtres Antiques*, éditions CNRS, Paris 1967
- [3] Barkas, N.: «The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Greek Ancient Theatres» *MDPI Acoustics*, 1, pp 337–353, 2019 \*
- [4] Γεροκώστας, Α. - Κούκου, Στ.: «Διερεύνηση του σύγχρονου ηχητικού περιβάλλοντος σε αρχαία θέατρα της Μακεδονίας, Ερευνητική εργασία, TAM-ΔΠΘ, 2020
- [5] Δήμα, Μ. - Τσόγκα, Ν. Κ. : «Διερεύνηση του σύγχρονου ηχητικού περιβάλλοντος σε αρχαία θέατρα της Ηπείρου», Ερευνητική εργασία, TAM-ΔΠΘ, 2021
- [6] Drougou, St.: «Το Θέατρο στο βασίλειο της Αρχαίας Μακεδονίας», Λογείον, τ 7, 2017 \*
- [7] <https://ancienttheatersofepirus.gr/> \*
- [8] Fiechter, E., *Die Theater von Oiniadai und Neu Pleuron*, W. Kohlhammer, Stuttgart, 1931
- [9] <http://ancienttheater.culture.gr/> \*
- [10] Βικάτου, Ο. - Σαράντη, Φ. : *Ο αρχαιολογικός χώρος και το Ηρώο της Καλυδώρας*, έκδοση ΥΠΠΟ, Μεσολόγγι, 2013.
- [11] <https://www.korinthiakos.info/content/istoria/> \*

\* σημείωση : τελευταία πρόσβαση στις ιστοσελίδες 28/8/2022

**Πλήρης ανακατασκευή του Δημοτικού Θεάτρου  
Λευκωσίας και μετατροπή του σε αίθουσα συναυλιών και  
πολλαπλών χρήσεων**

**Ιωάννης Τιμαγένης<sup>1</sup>, Θόδωρος Τιμαγένης<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, Αρχιτέκτων Μηχανικός –  
Σύμβουλος Ακουστικής, MSc Architectural and Environmental Acoustics,  
Dip Arch (RIBA 2), Ba (Hons) Architecture (RIBA 1)

<sup>2</sup> Αρχιτέκτων Μηχανικός – Σύμβουλος Ακουστικής ΕΜΠ, MSc Un of London

Κ. Παλαιολόγου 5, Πειραιάς τηλ. 210 4119545  
www.timagenis-acoustics.com,  
athens@timagenis-acoustics.com

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η απόφαση για την δημιουργία Δημοτικού Θεάτρου στην Λευκωσία, ελήφθη κατά την δεκαετία του 50. Το θέατρο εγκαινιάσθηκε το 1967.*

*Τον Ιούνιο του 2008, μετά από εργασίες ανακαίνισης και προσθήκες ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων η στέγη του κατέρρευσε.*

*Το κτίριο παρέμεινε σε αυτή την κατάσταση για περίπου 8 χρόνια οπότε αποφασίσθηκε η πλήρης (πλην των εξωτερικών όψεων και του πύργου της σκηνής) ανακατασκευή του, με όσες επεμβάσεις απαιτούντο, προκειμένου να καταστεί κατάλληλο πλέον και για συναυλιακές εκδηλώσεις κλασικής μουσικής, διότι η κατασκευή ενός εντελώς νέου Μεγάλου Μουσικού, έχει μετατεθεί στο άγνωστο μέλλον για διάφορους λόγους.*

*Τα εγκαίνια του νέου κτιρίου έγιναν στις 18/06/2019 με την παρουσία του Προέδρου της Κυπριακής Δημοκρατίας κ. Ν. Αναστασιάδη.*

*Στην παρούσα εργασία, αναλύεται η διαδικασία του ακουστικού σχεδιασμού της κεντρικής αίθουσας, τα αποτελέσματα των τελικών μετρήσεων ακουστικής αυτής, καθώς η αξιοποίηση των σύγχρονων συστημάτων μετρήσεων και ελέγχου ακουστικών παραμέτρων των αιθουσών για την περαιτέρω εμβάθυνση των γνώσεων που αφορούν στην βελτίωση της χωροαίσθησης εντός των αιθουσών ακροατηρίου.*

*Λέξεις κλειδιά:* Λευκωσία, Αίθουσα συναυλιών, Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, Χωροαίσθηση, Κατάρρευση, Κλασική Μουσική

## ***Nicosia Municipal Theatre: The chronicles of the full reconstruction and its conversion to a multi-purpose concert hall***

### **ABSTRACT**

*The decision for designing the first Municipal Theatre in Nicosia was taken during the 50s. The theatre has officially opened in 1967. In June 2008 soon after the refurbishment works and the addition of new lighting and electro-acoustical equipment the roof of the auditorium collapsed completely and remained in this situation for almost 8 years. Due to the above it has been decided to preserve only the external building shell and reconstruct in full the entire building.*

*The aim of the redevelopment was the creation of a contemporary Concert Hall for classical music & symphonic orchestras. Further performing art events were also included in the schedule of uses such as, ballet as well as theatre performances.*

*Given the above context, the present article delineates the intervention of the architectural design, the measurement results and the key acoustic highlights that contributed in the enhancement of the spatial envelopment.*

**Key Words:** *Nicosia, Concert Hall, Classical Music, Architectural redesign, Spatial impression, Collapsed*

### **Εισαγωγή**

Είναι γνωστό, ότι η ακουστική μελέτη, ειδικά ενός θεατρικού συναυλιακού χώρου (ακουστική – ηχομόνωση – ηχοπροστασία) – σε μεγάλο ποσοστό – σχεδόν ταυτίζεται με την αρχιτεκτονική μελέτη του κτιρίου. Η ανάγκη σωστής χωροθέτησης των λειτουργιών, η μελέτη κατάλληλων κατασκευαστικών λεπτομερειών, η επιλογή των απαραίτητων επενδύσεων των χώρων, ο καθορισμός του όγκου και του σχήματος, ειδικότερα σε αίθουσες μεγάλης χωρητικότητας, είναι ορισμένες από τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν από τον σύμβουλο ακουστικής ή σε συνεργασία με αυτόν. Τα ανωτέρω περιγράφονται ακόμη και στα βασικά εγχειρίδια ακουστικής [1].

Περαιτέρω συμμετοχή του συμβούλου ακουστικής απαιτείται στις αποφάσεις για την διάταξη και χωροθέτηση των Η/Μ εγκαταστάσεων, και σε πολλές περιπτώσεις και στην διαμόρφωση του στατικού φορέα. Όταν προβλέπεται ότι ο φορέας θα επιβαρυνθεί με πρόσθετα (πέραν των συνήθων) φορτία προς επίλυση των απαιτήσεων της ακουστικής, η π.χ. αν απαιτείται βαρεία Ψ/Ο στην αίθουσα ή η διάνοιξη ειδικών αρμών σε συγκεκριμένες θέσεις (όπως ενδεικτικά ΜΜΑ, ΜΜΘ [2] ή στο κτίριο του Ιδρύματος Μείζονος Ελληνισμού [3]).

### **1. Ιστορικό**

Το νέο κτίριο του ΔΘΛ είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από τα πολλά που επιβεβαιώνουν τα ανωτέρω, σε όλη την έκτασή τους.

Η απόφαση για την δημιουργία Δημοτικού Θεάτρου στην Λευκωσία, ελήφθη κατά την δεκαετία του 50. Το θέατρο εγκαινιάστηκε το 1967.

Τον Ιούνιο του 2008, μετά από εργασίες ανακαίνισης και προσθήκες ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων, η στέγη του κατέρρευσε.

Το κτίριο παρέμεινε σε αυτή την κατάσταση για περίπου 8 χρόνια οπότε αποφασίστηκε η πλήρης ανακατασκευή του, με όσες επεμβάσεις απαιτούντο προκειμένου να καταστεί κατάλληλο πλέον και για συναυλιακές εκδηλώσεις κλασικής μουσικής, δεδομένου ότι η κατασκευή ενός νέου «Μεγάλου Μουσικής» στην Κύπρο (δηλ. προορισμένου αποκλειστικά για συναυλίες κλασικής μουσικής), για διάφορους λόγους έχει μετατεθεί στο άγνωστο μέλλον.

Τα εγκαινία του νέου κτιρίου έγιναν στις 18/06/2019 με την παρουσία του Προέδρου της Κυπριακής Δημοκρατίας κ. Ν. Αναστασιάδη [4].

## **2. Στόχοι και μεθοδολογία της μελέτης**

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις – προδιαγραφές της διακήρυξης του έργου, το νέο κτίριο θα έπρεπε να έχει άριστη ακουστική για συναυλίες κλασικής μουσικής, όπερες, θεατρικές παραστάσεις, παραστάσεις μπαλέτου καθώς και μουσικές εκδηλώσεις όλων των ειδών, που θα λαμβάνουν χώρα αναλόγως είτε με είτε χωρίς χρήση ηλεκτροακουστικού συστήματος.

Όλα αυτά θα έπρεπε να επιτευχθούν χωρίς να αλλοιωθεί το υφιστάμενο εξωτερικό περιμετρικό κέλυφος του κτιρίου. Η σκηνή στο νέο κτίριο είναι αναβαθμισμένη και πλέον έχει έκταση 200m<sup>2</sup>, ο πύργος της σκηνής καθώς και το όρυγμα (pit) των μουσικών, εκσυγχρονίστηκαν ώστε να ανταποκρίνονται στις σύγχρονες μουσικές και θεατρικές ανάγκες . Κατασκευάστηκε επίσης αίθουσα θεατρικών δοκιμών.

Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υψηλές ακουστικές απαιτήσεις για το σύνολο των προβλεπόμενων διαφορετικών χρήσεων του κτιρίου, ελήφθησαν διάφορα μέτρα, σύμφωνα με τις κλασικές αρχές της ακουστικής επιστήμης [5, 6] (δημιουργία μαθηματικού μοντέλου, στατιστική ακουστική, αρχιτεκτονική σύνθεση και ρύθμιση της αίθουσας με παραμετρικό σχεδιασμό), αλλά για την ολοκλήρωση της μελέτης, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της «περιφώνησης» που επίσης χρησιμοποιήθηκε και για την μελέτη της Κεντρικής Αίθουσας του ΠΣΚΗ [7].

Οι κυριότερες αρχές που εφαρμόστηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Η αίθουσα, κατασκευάστηκε υψηλότερη και στενότερη από την προηγούμενη
- Ο εξώστης κατεδαφίστηκε και κατασκευάστηκε νέος με ικανοποιητικότερη κλίση
- Στους τοίχους διαμορφώθηκαν κατάλληλα διαχυτικού στοιχεία, που σύμφωνα και με την αρχιτεκτονική πρόταση θα έπρεπε να παραπέμπουν (οπτικά) στην αρχική μορφή του θεάτρου.
- Κατασκευάστηκε νέα Ψ/Ο, με κατάλληλη αυξημένη μάζα και κατάλληλη διατομή, για να εξυπηρετεί τις ανάγκες ακουστικής και φωτισμού

- Κατασκευάστηκε κατάλληλο plenum, κάτω από την πλατεία, ώστε η προσαγωγή του αέρα του κλιματισμού να γίνεται μέσω του πατώματος της πλατείας.

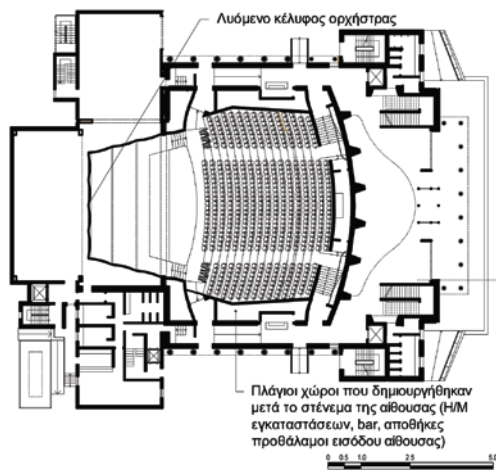
### 3. Αποτελέσματα

Το ανακατασκευασμένο κτίριο του ΔΘΛ, διαθέτει πλέον σύγχρονη αίθουσα χωρητικότητας 1000 θέσεων, η οποία ήδη λειτουργεί με εξαιρετική επιτυχία και στην οποία ικανοποιούνται όλες οι προδιαγραφές υψηλής ακουστικής ποιότητας που απαιτούνται για το ανέβασμα θεατρικών παραστάσεων, όπερας, μπαλέτου καθώς συναυλιών κλασικής και σύγχρονης μουσικής

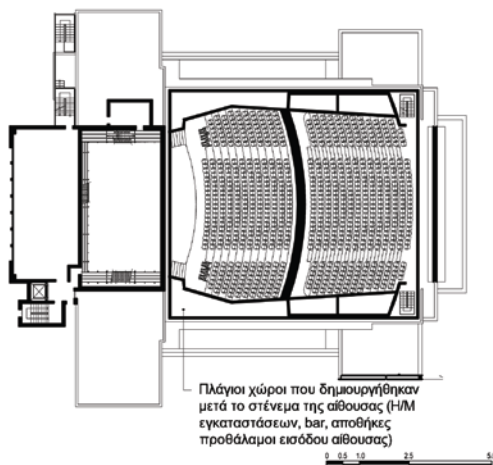
Τα αποτελέσματα των ηχομετρήσεων περιλαμβάνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.1 Single number frequency averaging

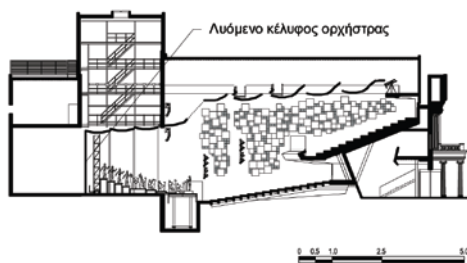
Παράμετρος	T30	EDT	LF	LFC	GLL	G	G [0;80]	G [80;∞]	BR	TR
M.O κατά ISO	1,52	1,26	0,2	0,33	-1; 2,3	4,76	2,42	0,90	1,3	0,8
Συνήθη όρια κατά ISO	-	+1; +3	+0,05; +0,35	-14; +1	-2; +10	-	-	-	-	-



Σχήμα3.1: Κάτοψη αίθουσας (επίπεδο πλατείας)



Σχήμα3.2: Κάτοψη αίθουσας (επίπεδο εξώστη)



Σχήμα3.3: Τομή αίθουσας



*Σχήμα3.4: Η κατάσταση στο θέατρο μετά την κατάρρευση της οροφής και πριν από την έναρξη των εργασιών*

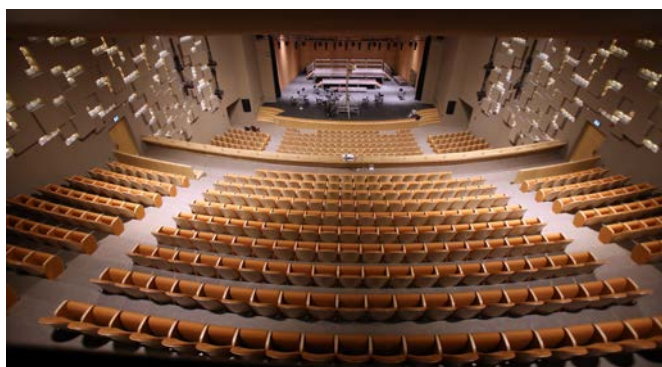


*Σχήμα3.5: Εξωτερική άποψη του θεάτρου, όπου φαίνεται ο όγκος που προστέθηκε καθ' ύψος στην αίθουσα*

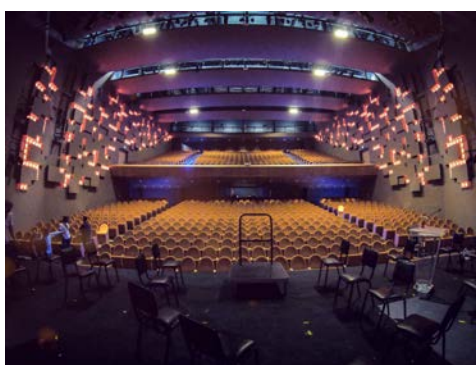


*Σχήμα3.6: Προσομοίωση παλαιάς μορφής και υφής πλάγιων τοίχων (απορροφητικών στοιχείων) με νέα στοιχεία ανακλαστικά / διαχυτικά*





*Σχήμα3.7: Όψη προς τη σκηνή*



*Σχήμα3.7: Όψη προς τα πίσω*



*Σχήμα3.9: Ανόμενο κέλυφος ορχήστρας*

#### **4. Ομάδα έργου**

Ακουστική Μελέτη: Timagenis Acoustics – Architects

Αρχιτεκτονική Μελέτη: Μαραθεύτης – Γιαννούρης Αρχιτέκτονες Μηχανικοί  
Υπεύθυνη μελέτης : Παυλίνα Καλαθά

Κατασκευή : Cyfield Development Public Ltd  
Υπεύθυνος έργου: Ανδρέας Κωνσταντινίδης

#### **5. Αναφορές**

[1] P.H. Parkin, H.R. Humpreys and J.R. Cowell – Acoustics, Noise and Buildings – Faber and Faber, 4<sup>th</sup> editions 1979

[2] Τιμαγένης Θεόδωρος – Ακουστικός σχεδιασμός του Μεγάλου Μουσικής Θεσσαλονίκης – Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ – Ακουστική 2002 Πάτρα

[3] Τιμαγένης Θεόδωρος – Αίθουσες Πολλαπλών Χρήσεων ή Πολυμορφικές Αίθουσες – Το παράδειγμα του κτιρίου «Θέατρον» του Ιδρύματος Μείζονος Ελληνισμού – Πρακτικά 5<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ – Ακουστική 2010 Αθήνα, ΕΜΠ

[4] <https://www.philenews.com/oikonomia/epicheiriseis/article/715218/etoimoga-tin-premiera-to>

[5] Beranek L. – Concert and Opera Halls: How They Sound - Acoustical Society of America 1996

[6] Barron M – Auditorium Acoustics and Architectural Design – 1993

[7] Ι. Τιμαγένης, Θ. Τιμαγένης - Προσομοιωτής για την αναπαράσταση ακουστικών πεδίων. Εφαρμογή στην ακουστική μελέτη του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου Ηρακλείου Κρήτης (ΠΣΚΗ) Πρακτικά 11<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ – Ακουστική 2022 Θεσσαλονίκη

**Σχεδιασμός ηχητικών εμπειριών στα ιστορικά μνημεία  
της Θεσσαλονίκης · αλληλεπίδραση μεταξύ αρχιτεκτόνων  
και συνθετών μουσικής**

Στυλιανός Δήμου,  
DMA  
Research Assistant  
Professor,  
HKBU Academy of  
Music  
s\_dimou\_mus@hkbu.  
edu.hk

Παναγιώτης  
Καραμπατζάκης,  
Επιστημονικός  
συνεργάτης, Τμήμα  
Αρχιτεκτόνων ΑΠΘ  
info@nestos.net

Δήμητρα  
Σιδερίδου  
Υποψήφια  
διδάκτωρ,  
Τμήμα  
Αρχιτεκτόνων ΑΠΘ  
di.sideridou@gmail.  
com

Αιμιλία  
Καραποστόλη  
PhD,  
Τμήμα Αρχιτεκτόνων  
ΑΠΘ  
aimilia@karapostoli.gr

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραματισμών, σχεδιασμού και αλληλεπίδρασης μεταξύ αρχιτεκτόνων και συνθετών μουσικής για την αξιοποίηση των αρχιτεκτονικών ακουστικών ποιοτήτων των ιστορικών μνημείων της Θεσσαλονίκης (Ροτόντα, Αχειροποιήτος και Παναγία Χαλκείων). Οι ακουστικές μετρήσεις υπεισέρχονται στην μουσική σύνθεση ως μια σειρά δεδομένων απαραίτητων για την δημιουργία ψηφιακών αλλά και πραγματικών ηχητικών χώρων. Ο αντίκτυπος της παρούσας αλληλεπίδρασης εκτός από την δημιουργία ηχητικών εγκαταστάσεων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες (site-specific sound installations), συνεισφέρει στην διεύρυνση της ηχητικής εμπειρίας του εκάστοτε μουσικού έργου και τον πληρέστερο σχεδιασμό της.*

***Design of sound experiences in the historical monuments  
of Thessaloniki • interaction between architects and music  
composers***

## **ABSTRACT**

*This paper presents the results of a series of experiments, designing and interacting between architects and music composers concerning the architectural acoustic qualities of the historical monuments of Thessaloniki (Rotonda, Achieropoitos and Panagia Chalkeon). The acoustic measurements are included in the music composition as a series of data necessary for the creation of digital as well as real sound spaces. The impact of this interaction, in addition to the creation of sound installations in specific locations (site-specific sound installations),*

*contributes to the expansion of the sound experience of each musical work and an even integrated design.*

## **Εισαγωγή**

Λίγα μόνο χρόνια μετά τη δημιουργία της εξίσωσης του Wallace Sabine και την αρχή της συστηματοποίησης της αρχιτεκτονικής ακουστικής, η αλματώδης τεχνολογική ανάπτυξη της ηλεκτρακουστικής τεχνολογίας την κατέστησε μέχρι ενός σημείου δευτερεύουσα [1]. Η βαθιά ρήξη της άμεσης σχέσης του αρχιτεκτονικού χώρου και του μουσικού ήχου οδήγησε στη δημιουργία μιας σειράς μετατοπίσεων, όχι απαραίτητως αρνητικών, που οφείλονται στην κυριαρχία της νεωτερικότητας και στην αδιαμφισβήτητη υπεροχή της τεχνολογικής προόδου. Η παρούσα έρευνα χρησιμοποιεί ακουστικές παραμέτρους και μεγέθη σε συνδυασμό με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των χώρων ως βασικά εργαλεία ανάλυσης ακουστικής για τη δημιουργία τεχνητών ακουστικών προφίλ, με την βοήθεια των κατάλληλων λογισμικών για το εκάστοτε μουσικό έργο.

Η Θεσσαλονίκη που αναμορφώθηκε έντονα κατά την Παλαιοχριστιανική και την Βυζαντινή περίοδο, είναι γεμάτη από λατρευτικά κτίρια, αυτά των Βασιλικών, που κατά κύριο λόγο βασίστηκαν στην Ρωμαϊκή μορφολογία των Forum, και αποτελούν μία αυτοτελή ομάδα κτισμάτων, με πολλές παραλλαγές. Η εργασία επικεντρώνεται στους χρόνους αντήχησης του Ι.Ν. Αγ. Γεωργίου (Ροτόντα), του Ι.Ν. Αχειροποιήτου και του Ι.Ν. Παναγίας Χαλκίων, δηλαδή μνημεία κατασκευασμένα μέσα στην περίοδο τουλάχιστον δέκα αιώνων με την αντίστοιχη πορεία προς την αρχιτεκτονική και ακουστική πολυπλοκότητα.

Η Ροτόντα ανήκει στα περίκεντρα οικοδομήματα, άλλωστε οφείλει την ονομασία της στο κυκλικό της σχήμα. Χτίστηκε στα χρόνια του καίσαρα Γαλερίου, γύρω στα **306 μ.Χ.**, ως ναός του Δία ή του Κάβειρου ή κατ' άλλους ως Μανσωλείο του ιδίου. Στον άξονά της κατέληγε πομπική οδός που συνέδεε τη ψίδα του Γαλερίου με το ανακτορικό συγκρότημα, που έχει ανασκαφεί νοτιώς της Εγνατίας οδού. Το κτήριο, διαμέτρου 24,50 μ καλύπτει ισοδιάστατος θόλος από οπτόπλινθους, που φτάνει σε ύψος τα 29,80 μ.. Ο κυλινδρικός τοίχος, πάχους 6,30μ., διασπάται εσωτερικά σε οκτώ ορθογώνιες κόγχες, από τις οποίες η νότια αποτελούσε την κύρια είσοδο [2].

Στο κέντρο της Θεσσαλονίκης, επί της οδού Αγίας Σοφίας και βόρεια από τον ομώνυμο ναό σώζεται ο ναός της Αχειροποιήτου, του οποίου η χρονολογία ανέγερσης τοποθετείται γύρω στα μέσα του **5ου** αι μΧ. Η Αχειροποίητος εντάσσεται στον τύπο της **τρίκλιτης ξυλόστεγης βασιλικής** με υπερώα, η οποία καταλήγει στα ανατολικά σε ημικυκλική ψίδα, είναι παλαιοχριστιανική βασιλική της Θεσσαλονίκης και σήμερα σώζεται στην ίδια μορφή που κατασκευάστηκε τον 5ο αιώνα. Το γεγονός που την καθιστά μοναδική στην ανατολική Μεσόγειο [2].

Στην Πλατεία της Αρχαίας Αγοράς βρίσκεται ο ναός της **Παναγίας Χαλκίων**. Κτίστηκε στο χώρο της κεντρικής αγοράς της Θεσσαλονίκης, κοντά στη Χαλκευτική στοά, όπου έως και πρόσφατα συναντούσε κανείς τα εργαστήρια των χαλκωματάδων. Η κτητορική επιγραφή στο μαρμάρινο υπέρθυρο της δυτικής εισόδου μας πληροφορεί ότι το **1028 μΧ** ο Χριστόφορος Πρωτοσπαθάρης, έχτισε το ναό για τη Θεοτόκο. Η εκκλησία ανήκει στο νέο τύπο που διαμορφώνεται την

εποχή της δυναστείας των Μακεδόνων αυτοκρατόρων, το σταυροειδή εγγεγραμμένο με τρούλο ναό [2].

Η οντολογική προσέγγιση του ακουστικού σχεδιασμού, ο οποίος και ανήκει στο πεδίο των θετικών επιστημών, είναι αρκετά θετικιστική [3]. Όσον αφορά τον ήχο, τον αντιλαμβάνεται αποκλειστικά ως ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο εκφράζεται μέσα από τη μουσική παράσταση και την ομιλία. Ο αρχιτεκτονικός ακουστικός σχεδιασμός συμβάλει στην επίτευξη του ιδανικού γεωμετρικού κελύφους που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή του ιδεατού ηχητικού αποτελέσματος. Στο επίπεδο της πόλης, ο ήχος μεταφράζεται ως αστικός θόρυβος, ο οποίος αποτελεί μια άσχημη, ανεπιθύμητη κατάσταση και η οποία πρέπει να λυθεί χρησιμοποιώντας αμυντικές τακτικές [4], δηλαδή χαμηλώνοντας τα επίπεδα της ηχητικής έντασης των ηχητικών αστικών πηγών, ελέγχοντας τη διαδρομή του θορύβου και, τέλος, προστατεύοντας τους δέκτες [5]. Εν αντιθέσει, οι ανθρωπιστικές επιστήμες και οι καλλιτεχνικές πρακτικές αποδέχονται τον θόρυβο ως ένα πολύπλοκο κοινωνικό κατασκευάσμα, αλλά και ως ένα δείγμα ελευθερίας, που σχηματίζεται μέσα από το αστικό περιβάλλον, αποτελώντας ένα πεδίο που χρήζει λεπτομερειακής μελέτης [6], φανερώνοντας πολλαπλές πτυχές των τόπων της πόλης, τόσο για τις επιστήμες, όσο και για τον ίδιο τον αρχιτεκτονικό και αστικό σχεδιασμό.

Η παρούσα έρευνα επιλέγει να προσεγγίσει τον ήχο όχι αποκλειστικά ως ένα φυσικό φαινόμενο, αλλά ως μια πολυδιάστατη έννοια που επηρεάζει αλλά και επηρεάζεται από το αρχιτεκτονικό περιβάλλον [7]. Ερευνώνται τρία θρησκευτικά μνημεία της Θεσσαλονίκης προσεγγίζοντας τον ακουστικό και αρχιτεκτονικό χώρο μέσα από επιστημονικές αλλά και καλλιτεχνικές πρακτικές, χρησιμοποιώντας και τα αντίστοιχα εργαλεία - λογισμικά.

Δεν αποτελεί προσπάθεια προσομοίωσης αντίληψης του ήχου (auralisation) [8], αλλά περισσότερο μια διεύρυνση της μουσικής συνθετικής διαδικασίας, που ο μουσικός συνθέτης συνομιλεί (μεταφορικά αλλά και κυριολεκτικά) με τους ακουστικούς και τους αρχιτέκτονες για την παραγωγή μουσικής τέχνης. Μια διαδικασία που είναι απαραίτητη για ηχητικά έργα site specific αλλά και για την επιστημονική και καλλιτεχνική έρευνα, καθώς και για την εφαρμογή σε πολλά άλλα μέσα (κινητά τηλέφωνα, παιχνιδιομηχανές, κοκ). Για αυτό και η παρούσα έρευνα δεν αποσκοπεί να παράγει σαφή αποτελέσματα, αλλά να δώσει έμφαση στην ερευνητική και σχεδιαστική μουσική διαδικασία. Όπως μας λέει και ο Miller ο ήχος είναι προϊόν από πολλά και διαφορετικά περιβάλλοντα σύνθεσης [9].

## 1. Μεθοδολογία

Στην έρευνα χρησιμοποιούνται λογισμικά όπως το *CATT-Acoustic* για τον υπολογισμό κτιριακής ακουστικής σε τρεις διαστάσεις της Σουηδικής Catt Acoustics και την μοντελοποίηση των μνημείων της πόλης (σε συνδυασμό με το Progecad της ProgeSoft), και το *Max/MSP*, μια γλώσσα εικονικού προγραμματισμού της Cycling '74. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη *SPAT* (ή *Spatialisateur* στα γαλλικά) του ερευνητικού IRCAM στο Παρίσι, ένας real-time spatial audio processor, που επιτρέπει σε συνθέτες μουσικής (ακουσματικής και ηλεκτροακουστικής), καλλιτέχνες ήχου, performers και μηχανικούς ήχου να προγραμματίζουν διςδιάστατους και τριςδιάστατους τεχνητούς ακουστικούς

χώρους (virtual spaces) και να περιγράψουν τη συμπεριφορά ηχητικών πηγών μέσα σε αυτούς.

Πρωταρχική κρίνεται η μοντελοποίηση του κάθε ιστορικού μνημείου ώστε να γίνει εφικτός ο υπολογισμός μιας σειράς μετρητικών και υπολογιστικών στοιχείων, όπως και η διαφοροποίηση λόγου RT ανά όγκο (data από προηγούμενες εργασίες [10], [11]) καθώς και η χρήση πραγματικών μετρήσεων.

Πίνακας 1.1 Πίνακας με πραγματικές μετρήσεις

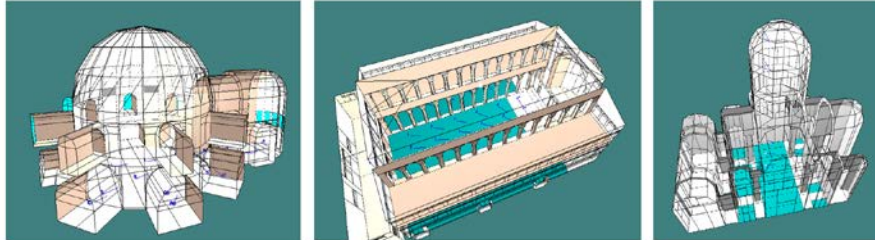
a/a	Ονομασία χώρου	# of measurements	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1	I.N. Αγ. Γεωργίου (Ροτόντα)	57	6,03s	4,07s	4,36s	3,76s	3,22s	2,28s
2	I.N. Αχειροποιήτου	58	3,08s	3,21s	3,88s	3,37s	2,58s	2,20s
3	I.N. Παναγίας Χαλκέων	40	1,54s	1,76s	1,53s	1,26s	1,34s	1,16s

Πίνακας 1.2 Πίνακας με μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο Max/MSP

a/a	Ονομασία χώρου	F low 250 Hz	F high 8 kHz	Room size m3	Ηχητικές πηγές (2 μέτρα απόσταση μεταξύ A-B)	Μικρόφωνο (μετρήσεις)
1	I.N. Αγ. Γεωργίου (Ροτόντα)	4,07s	2,28s	15433	2	8
2	I.N. Αχειροποιήτου	3,21s	2,20s	19557	2	11
3	I.N. Παναγίας Χαλκέων	1,76s	1,16s	869	2	8

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά ηχητικά samples - high frequency, low frequency και granular samples - στο κάθε δυσδιάστατο ψηφιακό ακουστικό χώρο που αντιστοιχεί στο κάθε ιστορικό μνημείο (Ροτόντα, Αχειροποίητος και Παναγία Χαλκέων) διαγράφοντας την ακουστική συμπεριφορά του κάθε μνημείου. Τα αποτελέσματα είναι εννιά ηχητικά samples με διακριτή ακουστική συμπεριφορά στο κάθε ιστορικό μνημείο που ευνοούν ή όχι το καθένα από τα επιλεγμένα samples.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στα μετρητικά και υπολογιστικά στοιχεία των δύο προηγούμενων εργασιών του Παναγιώτη Καραμπατζάκη, που παρουσιάστηκαν στα συνέδρια, «Ακουστική 2008» και «Ακουστική 2010» [10,11].



Σχήμα 1 Μοντέλα της Ροτόντας, Αχειροποίητου και Παναγίας Χαλκέων στο CATT-Acoustic

## 2. Δεδομένα

Τα αποτελέσματα της έρευνας δεν αποτελούν διακριτές μουσικές συνθέσεις αλλά ηχητικά δείγματα που σκοπό έχουν να αναδείξουν τις ομοιότητες, διαφορές αλλά και τις πιθανές προτάσεις για την ανάδειξη του κάθε ιστορικού μνημείου για ζωντανές performances ή και ψηφιακές εφαρμογές.

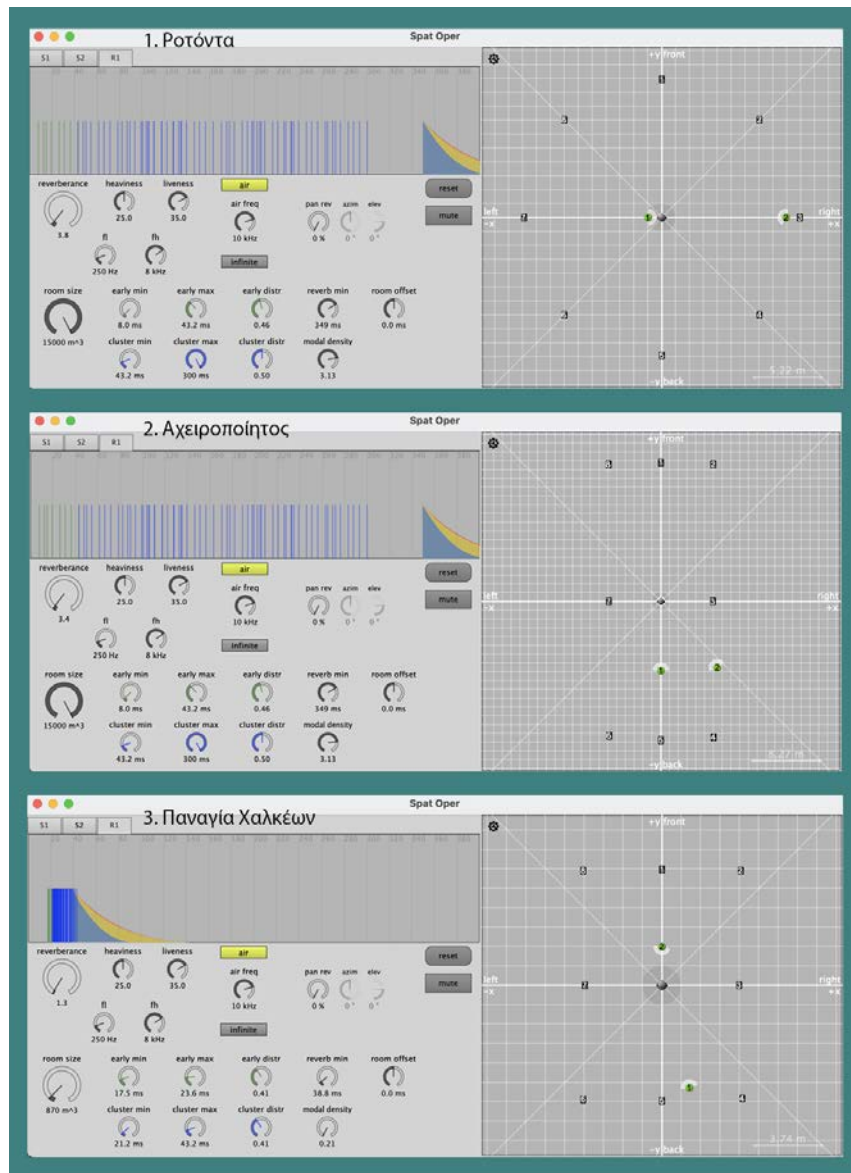
Οι αρχιτεκτονικές κατόψεις αποτέλεσαν ένα βασικό στοιχείο για την δημιουργία ηχητικών εγκαταστάσεων με οχτώ μικρόφωνα, και το κοινό στο κέντρο. Η κυκλική κάτοψη της Ροτόντας έχει ως απόρροια, μια παρόμοια κυκλική διάταξη των μικροφώνων, ενώ η Αχειροποίητος μια ορθογωνική και η Χαλκέων μια τετράγωνη. Ενδιαφέρον στοιχείο αποτελεί πως ο real time processor **SPAT** (ή Spatialisateur στα γαλλικά) του ινστιτούτου IRCAM [12-15] μπορεί να αναπαραστήσει χώρους μέχρι όγκου μέχρι 15.000 κμ πράγμα που έχει ως συνέπεια, οι χώροι της Ροτόντας και της Αχειροποίητου να εξισώνονται χηριστικά (επίσης οι μετρήσεις για αντίχηση 4000 hz χρησιμοποιήθηκαν αντί για 8000 hz που ζητούσε το λογισμικό, οι υπόλοιπες τιμές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν).

Το air frequency υπολογίστηκε ως 10000 Hz και για τα τρία ιστορικά μνημεία, και υπολογίστηκαν δύο ηχητικές πηγές (ιερέας και ψάλτης) όπως και έγιναν από τα μοντέλα και τις μετρήσεις του Παναγιώτη Καραμπατζάκη. Τέλος τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο Max/MSP δημιουργήθηκαν με 8 ηχεία για την αναπαραστάση, με δυσδιάστατη μοντελοποίηση – 2D modeling – του τεχνητού ακουστικού χώρου σε στούντιο.

Αν και απότερος σκοπός ήταν η δημιουργία μιας βιβλιοθήκης ψηφιακών ηχητικών χώρων που θα αναδείξει την πόλη, αποτελεί το πρώτο βήμα για την πρωμοδότηση των ιστορικών μνημείων ως φυσικούς χώρους για μουσική έρευνα και πειραματισμό, πέρα από τις λατρευτικές τους χρήσεις και θα διευκολύνει συνθέτες μουσικής αλλά και μηχανικούς ήχου για πιθανές μουσικές συναυλίες ή και virtual μουσικά έργα.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά ηχητικά samples - high frequency, low frequency και granular samples - στο κάθε δυσδιάστατο ψηφιακό ακουστικό χώρο που αντιστοιχεί στο κάθε ιστορικό μνημείο (Ροτόντα, Αχειροποίητος και Παναγία Χαλκέων) διαγράφοντας την ακουστική συμπεριφορά του κάθε μνημείου. Τα αποτελέσματα είναι εννιά ηχητικά samples με διακριτή

ακουστική συμπεριφορά στο κάθε ιστορικό μνημείο που το αναδεικνύουν με καλύτερη ακουστική και φασματική σαφήνεια. Με αυτά τα ηχητικά κλιπς προσπαθήσαμε να κατανοήσουμε ακουστικά πως αντιδράει το δυσδιάστατο τεχνητό μοντέλο κάθε εκκλησίας.



Σχήμα 2 Μοντέλα της Ροτόντας, Αχειροποίητου και Παναγίας Χαλκείων στο SPAT IRCAM



Μέσα από τη διαδικασία μοντελοποίησης παρέχουμε ένα εργαλείο – ένα patch (available upon request) – που περιέχει τα τρία ακουστικά μοντέλα των εκκλησιών όπου είναι διαθέσιμα, μέσα από το πρόγραμμα Max/MSP, για δημιουργική χρήση και περαιτέρω πειραματισμό για συνθέτες, μουσικούς και sound artists που προτίθενται να δοκιμάσουν τη διάχυση της μουσικής τους μέσα σε αυτά τα τρία τεχνητά ακουστικά μοντέλα, σε στούντιο οκτώ ηχείων ή σε απλή μορφή στέρεο. Καθώς η παρούσα μοντελοποίηση είναι δυσδιάστατη, η μελλοντική εξέλιξη αυτού του πειράματος αλλά και ο ανασχεδιασμός αυτού του εργαλείου θα γίνει για τρισδιάστατη ακουστική απεικόνιση, με την κατάλληλη χρηματοδότηση.

### 3. Συζήτηση

Οι μουσικοί συνθέτες αγνοούν την σχέση αρχιτεκτονικού χώρου και φυσικού ήχου, δηλαδή υπήρξε δυσπιστία μεταξύ όγκου και χρόνου αντήχησης και προσδοκία μεγαλύτερης αντήχησης. Λόγω της ηλεκτρακουστικής τεχνολογίας, υπάρχει μια δυσαναλογία χώρου και φυσικής ακουστικής, όπως τα φίλτρα των φωτογραφιών στο instagram, τα οποία διαστρεβλώνουν την πραγματικότητα. Το στοιχείο αυτό δεν αποτελεί αρνητικό στοιχείο αλλά μια διαπίστωση, για μια κατάσταση που μπορεί να δικαιολογήσει την δημοφιλία των site-specific ηχητικών έργων.

Η ανάγκη για μια βιβλιοθήκη με τα ιδιαίτερα ακουστικά αλλά και ηχητικά χαρακτηριστικά των χώρων της Θεσσαλονίκης (ένας εναλλακτικός ηχητικός χάρτης) είναι απαραίτητη, ώστε να οι συνεργασίες ειδικών του ήχου, καλλιτεχνών και μηχανικών, να διευρύνουν την ηχητική εμπειρία, τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό αλλά και τον πληρέστερο έλεγχο του μουσικού έργου. Οι αλληλεπιδράσεις και ο διαμερισμός δεδομένων (μετρήσεων, μοντέλων και ηχητικών πειραματισμών) στόχο έχουν την πληρέστερη συνεργασία και το αρτιότερο ηχητικό αποτέλεσμα τόσο σε πραγματικό χώρο, όσο και ψηφιακό. Ευχόμαστε η συγκεκριμένη έρευνα να είναι μόνο η αρχή.

### 4. Αναφορές

[1] E. A. Thompson, *The Soundscape Of Modernity: Architectural Acoustics And The Culture Of Listening In America, 1900-1933*. Massachusetts, The MIT Press, 2004.

[2] Κόμβος «Οδυσσέας». (2022, Σεπ. 19). "Οδυσσέας" Πύλη του Ελληνικού Πολιτισμού στο Διαδίκτυο. Διαθέσιμο: <http://odysseus.culture.gr>.

[3] L. Groat and D. Wang. *Architectural research methods*. New York, John Wiley & Sons, 2002.

[4] H. Björn, "The sonic identity of European cities—a presentation of the work conducted by the Swiss-French researcher Pascal Amphoux", *Soundscape Studies and Methods. The Finnish Society for Ethnomusicology*, Publ., no. 9, pp. 59-82, 2002.

[5] Ν. Π. Τσινίκας, "Αρχιτεκτονικός 'Αντιθορυβικός' Σχεδιασμός" *Επιστημονική επετηρίδα της Πολυτεχνικής Σχολής - Τμήμα Αρχιτεκτόνων*, τόμος ΙΗ, Έκδοσις του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, 2002.

[6] B. LaBelle. *Acoustic Territories: Sound Culture and Everyday Life*. London, Bloomsbury Academic, 2010.

[7] Α. Α. Καραποστόλη. "Η μελέτη και ο σχεδιασμός του ηχητικού περιβάλλοντος στην αρχιτεκτονική θεωρία και πρακτική: αναζητώντας τα σύγχρονα ηχοτοπία της Θεσσαλονίκης", διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, 2016.

[8] M. Noisternig, B. FG Katz, S. Siltanen, and L. Savioja. "Framework for real-time auralization in architectural acoustics." *Acta Acustica United with Acustica* 94, no. 6 (2008): 1000-1015, 2008.

[9] P. D. Miller, *Rhythm Science*, Massachusetts, The MIT Press, 2004.

[10] Π. Καραμπατζάκης, "Ακουστικές μετρήσεις σε 11 βυζαντινούς ναούς της Θεσσαλονίκης". *Συνέδριο ακουστικής Ε.Λ.Ι.Ν.Α.*, 2008.

[11] Π. Καραμπατζάκης, "Παρατηρήσεις πάνω στην εξέλιξη της ακουστικής των χριστιανικών λατρευτικών κτισμάτων της Θεσσαλονίκης. Από τους Παλαιοχριστιανικούς, έως τους ναούς του 14ο αιώνα", *Συνέδριο ακουστικής Ε.Λ.Ι.Ν.Α.*, 2014.

[12] T. Carpentier, M. Noisternig, O. Warusfel. Twenty years of Ircam Spat : looking back, looking forward. *41st International Computer Music Conference (ICMC)*, Denton, TX, USA, Sept 2015.

[13] T. Carpentier. Récents développements du Spatialisateur. *Journées d'Informatique Musicale (JIM)*, Montréal, May 2015.

[14] T. Carpentier. Une nouvelle implémentation du Spatialisateur dans Max. *Journées d'Informatique Musicale (JIM)*, Amiens France, 2018.

[15] T. Carpentier. A new implementation of Spat in Max. *15th Sound & Music Computing Conference (SMC)*, Limassol Cyprus, July 2018.

*Spatialisateur is an IRCAM registered trademark. The design of Spat and the reverberation module are protected under several French and international patents ([FR] 92 02528; [US] 5,491,754, [FR] 95 10111; [US] 5,812,674). All other trademarks belong to their owners. Max/MSP is the property of IRCAM and Cycling'74.*

## **Ακουστικό μονοπάτι στις βόρειες περιοχές της Αθήνας**

Ευάγγελος Κάππας,  
Εκπαιδευτικός ΤΠΕ,  
Α. Χαλκιά 12 Χαλάνδρι, 15232, Αθήνα  
[vkappa@yahoo.com](mailto:vkappa@yahoo.com)

Καλλιόπη Χουρμουζιάδου  
Αρχιτέκτων Μηχ., MArch, PhD  
Ομήρου 5, 55236, Θεσσαλονίκη  
[k.chourmouziadou@windowslive.com](mailto:k.chourmouziadou@windowslive.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Έρευνες έχουν δείξει ότι οι τιμές θορύβου στο κέντρο της Αθήνας είναι άνω των ορίων του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.). Η εργασία αυτή στηρίζεται στην υπόθεση ότι στα βόρεια προάστια της Αθήνας - όπου δεν έχουν γίνει μετρήσεις - οι στάθμες ανταποκρίνονται στους δείκτες του υπόλοιπου πολεοδομικού συγκροτήματος. Αρχικά, πραγματεύεται την καταγραφή του ακουστικού περιβάλλοντος και τη συσχέτισή του με τη θεωρία της προσέγγισης και της ηχοτοπίου. Η ηχομέτρηση πραγματοποιήθηκε παράλληλα με ηχοπεριπάτους, σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, με χρήση της μικροσκοπικής και της μακροσκοπικής μεθόδου, επιτρέποντας την κατανόηση του ηχοτοπίου σε συγκεκριμένα σημεία αλλά και στο ευρύτερο περιβάλλον. Αυτό επέτρεψε την αναγνώριση περιοχών οι οποίες επιβαρύνονται περισσότερο από υψηλή στάθμη ήχων ή αρνητικούς θορύβους.

Η μελέτη αναδεικνύει ότι, τελικά, οι κάτοικοι των περιοχών αυτών εκτίθενται σε ήχο/θόρυβο άνω των 50 dB κατά μέσο όρο, όπως ορίζει ο Π.Ο.Υ. Παράλληλα όμως επισημαίνεται ότι η έκθεση σε αρνητικούς ήχους υψηλής στάθμης δεν είναι μόνιμη, και σχετίζεται με την ώρα μετακίνησης προς την εργασία. Οι περιοχές αυτές διασχίζονται από λεωφόρους αλλά χαρακτηρίζονται από μεγάλα τμήματα όπου επικρατούν θετικοί ήχοι είναι κατάλληλες για μια ισορροπημένη διαβίωση.

### ***Acoustic path in the north suburbs of Athens***

#### **ABSTRACT**

*Studies have shown that noise levels in the centre of Athens are above the noise levels set by WHO. This study is based on the hypothesis that in the north suburbs of Athens – where no measurements have yet been conducted – these levels would follow the example of the rest of Athens. Initially, the acoustic environment is recorded and analysed within the theoretical framework of the soundscape approach. Sound measurements were carried out along with soundwalks, at different times of the day, applying the microscopic and macroscopic methods, allowing soundscape understanding of a specific place but also a wider environment. This identified areas with impact of high-level or negative sounds.*

*The study reveals that the residents of these areas experience noise levels above 50 dB, as determined by WHO. However, this study also shows that exposure to high level sounds or negative sounds is not constant and is associated with commuting. These areas, characterised by large avenues but also large spaces where positive sounds dominate, are suitable for living.*

## Εισαγωγή

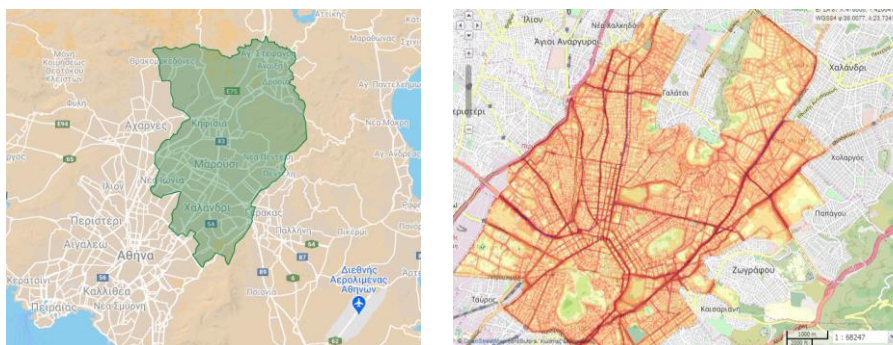
Τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζεται όλο και πιο έντονα η διερεύνηση όχι μόνο του ακουστικού περιβάλλοντος, αλλά της αντίληψης και κατανόησης του ήχου. Τη δεκαετία του 1970, ο μουσικός συνθέτης R. M. Schafer, στην έρευνα της σύγχρονης μουσικής στο Simon Fraser University Vancouver, όρισε το ‘soundscape’, το ηχοτοπίο, τονίζοντας τη διαφοροποίηση μεταξύ του ακουστικού περιβάλλοντος και της αντίληψης αυτού [1]. Πλέον, είναι ευρέως διαδεδομένη η σημασία της αντίληψης του ήχου και η σχέση της ποιότητας ζωής με την έκθεση στον θόρυβο/ήχο. Έχει παρατηρηθεί επιπλέον ότι η ποιότητα ζωής δε συνδέεται μόνο με το επίπεδο θορύβου, όπως ήταν αποδεκτό μέχρι πρόσφατα, αλλά με το χαρακτήρα του ήχου, με θετικές και αρνητικές επιδράσεις [2].

Η εργασία αυτή αφορά σε αντικειμενικές μετρήσεις και καταγραφή που πραγματοποιήθηκαν στα βόρεια προάστια της Αθήνας, σε συνδυασμό με υποκειμενική αξιολόγηση των επικρατέστερων ήχων υποπεριοχών με διαφορετικά χωρικά χαρακτηριστικά (περιοχή αμιγούς κατοικίας, οδικός άξονας, άλσος κλπ.).

### 1. Μελέτη περίπτωσης: Το πολυεδομικό συγκρότημα της Αθήνας

Η Αθήνα, έχει αναφερθεί σε πολλά δημοσιεύματα του τύπου εδώ και δεκαετίες ως μια πόλη με σοβαρή ηχορύπανση. Μια επίσκεψη στην Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών του Υπουργείου Περιβάλλοντος δείχνει τα αποτελέσματα μιας μελέτης του 2018, στο κέντρο της Αθήνας, η οποία αναδεικνύει ότι η Αθήνα είναι μια εξαιρετικά θορυβώδης πόλη με τιμές  $L_{den}$  στους δρόμους από 65dB έως και 90dB [3].

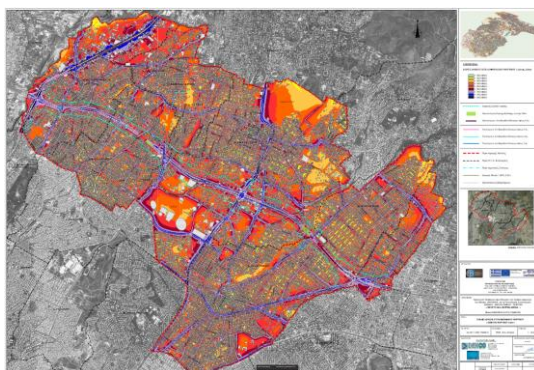
Στον χάρτη της πόλης το κέντρο ξεκινάει από τη Νέα Σμύρνη και φθάνει ως τον Περισσό, περιλαμβάνοντας τις περιοχές που βρίσκονται μεταξύ της Εθνικής Οδού Αθηνών-Θεσσαλονίκης και λίγο βορειότερα από τη Λεωφόρο Μεσογείων στο ύψος του Παπάγου, όπως και την οδό Καποδιστρίου στο ύψος της Φιλοθέης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Παρόλα αυτά, τα βόρεια προάστια δεν αποτέλεσαν τμήμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης και σύνταξης των χαρτών θορύβου.



Σχήμα 1 Χάρτης Αθήνας και προαστείων σε αντιπαραβολή με χάρτη θορύβου.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη για εμπλουτισμό των χαρτών θορύβου με δεδομένα που αφορούν σε αυτές τις περιοχές, αλλά και για βαθύτερη

κατανόηση του ηχητικού περιβάλλοντος και του ηχοτοπίου, ειδικότερα περιοχών με χρήση κυρίως κατοικίας, οι οποίες περιβάλλονται από επιβαρυμένες οδικές αρτηρίες. Επιπλέον, η αναγνώριση και καταγραφή του είδους των επικρατέστερων ήχων είναι σημαντική για τον προσδιορισμό του ηχοτοπίου κάθε περιοχής και κατ' επέκταση της ποιότητας ζωής, όπως προτείνεται από την βιβλιογραφία. Πρόσφατα, μετά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας προστέθηκαν τμήματα κάποιων βορείων προαστίων, όπως φαίνεται στον Σχήμα 2, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εργασία αυτή.



Σχήμα 2 Χάρτης Βορείων προαστείων.

Δεδομένου ότι ένα ηχοτοπίο συντίθεται από ποικιλία ήχων (ανθρωπογενείς, μηχανολογικοί, φυσικοί ήχοι), είναι σχεδόν αδύνατο να αξιολογηθεί ως θετικό ή αρνητικό με γνώμονα αποκλειστικά επίπεδα στάθμης θορύβου. Το ηχοτοπίο ενός πάρκου μπορεί να ερμηνευτεί ως πιο ευχάριστο, πιο καθησυχαστικό, λιγότερο εκνευριστικό, από το ηχοτοπίο ενός πεζοδρομίου δίπλα από έναν πολυσύχναστο δρόμο [4]. Παρόλα αυτά, ένα ηχοτοπίο όπου κυριαρχούν ανθρωπογενείς ήχοι μπορεί να γίνει αντιληπτό ως θετικό και αρνητικό ή απλά ως αποδεκτό [5]. Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι ένα ήρεμο ηχοτοπίο θεωρείται ευχάριστο και μη ποικιλόμορφο, ένα χαοτικό ηχοτοπίο μη-ευχάριστο και ποικιλόμορφο και ένα μονότονο ηχοτοπίο μη-ευχάριστο και μη-ποικιλόμορφο [4].

## 2. Μεθοδολογία

Ένα από τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία ήταν οι ηχομετρήσεις. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ένα ηχόμετρο UNI-T UT353 σε συνδυασμό με την εφαρμογή κινητής συσκευής, INVH 2.1.1 (Bosch) for Android σε κινητή συσκευή Samsung S9+ βαθμονομημένη με το προηγούμενο (έτσι ώστε να δίνουν το κατά το δυνατόν αντίστοιχα αποτελέσματα).

Προκειμένου να συσχετιστούν τα αποτελέσματα βάσει αντικειμενικών και υποκειμενικών κριτηρίων επιλέχθηκε η μέθοδος του ηχοπερίπατου, η οποία χρησιμοποιείται τακτικά για την αξιολόγηση των ηχοτοπίων [6]. Σε περιπτώσεις που ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί, ο ηχοπερίπατος αντικαταστάθηκε από διαδρομές που πραγματοποιήθηκαν με ποδήλατο ή με αυτοκίνητο. Ο στόχος ήταν η χρήση των μεθόδου της τριγωνοποίησης (μικροσκοπικά και μακροσκοπικά),

σύμφωνα με την βιβλιογραφία [7], επιτρέποντας την κατανόηση του ηχοτοπίου σε συγκεκριμένα σημεία αλλά και στο ευρύτερο περιβάλλον.

Οι ηχοπερίπατοι πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, για να διαπιστωθούν τυχόν αλλαγές στο ηχοτοπίο, έτσι ώστε να υπάρξει μια ουσιαστική βάση για σύγκριση μεταξύ περιοχών και να αναδειχτούν περιοχές οι οποίες είτε επιβαρύνονται σε μεγαλύτερο βαθμό από θόρυβο, είτε χαρακτηρίζονται από φυσικούς-επιθυμητούς ήχους σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας.

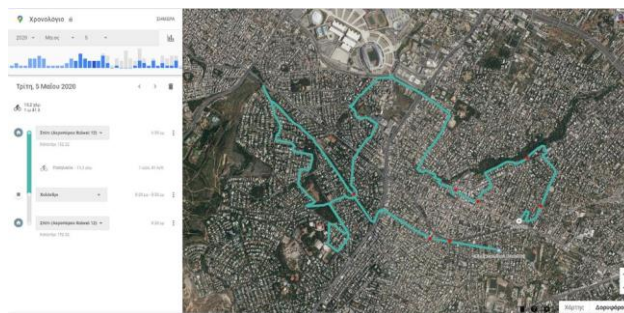
Με σκοπό να καταγραφούν διαδρομές που είναι αντιπροσωπευτικές, οι ηχοπερίπατοι περιλαμβάνουν διαδρομές από σπίτι σε εργασία, σε σουπερμάρκετ και σημεία καθημερινού ενδιαφέροντος. Μέσω των αποτελεσμάτων επιχειρήθηκε να δοθεί απάντηση στα παρακάτω ερωτήματα:

- Ποιοί είναι οι ήχοι στους οποίους εκτίθεται ένας άνθρωπος στην καθημερινότητά του, και πόσο διαφέρουν ανά περιοχή;
- Υπάρχουν διαφορές στη στάθμη θορύβου στην οποία εκτίθεται ένας άνθρωπος στην καθημερινότητά του, με βάση την περιοχή;
- Με δεδομένο τις υψηλές στάθμες, εφόσον δεν είναι όλοι οι ήχοι ενοχλητικοί αλλά κάποιοι είναι ανώδυνοι ή ίσως και επιθυμητοί, μπορεί να θεωρηθεί κάποια περιοχή της Αττικής πιο ελκυστική ηχητικά;

Επειτα από την κατηγοριοποίηση των ήχων πραγματοποιήθηκε ανάλυση με χρήση του Ms Excel. Το προσδοκώμενο αποτέλεσμα, ήταν η αναγνώριση διαφορετικών ηχοτοπίων μεταξύ των περιοχών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου οι στάθμες είναι εξίσου υψηλές, λόγω της γεωμορφολογίας τους. Επιχειρήθηκε η διασύνδεση της ποιότητας του ήχου με την προτίμηση των κατοίκων, καθώς και η πιθανότητα συσχέτισης της με οικονομικά κριτήρια.

### 3. Αποτελέσματα – Ανάλυση ηχοτοπίου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων, των καταγραφών και της παρατήρησης. Ενδεικτικά εδώ αναφέρονται τα αποτελέσματα για τις περιοχές της Φιλοθέης και του Ψυχικού, οι οποίες παρουσιάζουν ομοιότητες και ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς χαρακτηρίζονται από εναλλαγές στην γεωμορφολογία και στις χρήσεις γης, με κύριο χαρακτηριστικό μεγάλες εκτάσεις πρασίνου και χαμηλό συντελεστή δόμησης. Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται η διαδρομή που επιλέχθηκε για τον ηχοπερίπατο στις περιοχές αυτές.

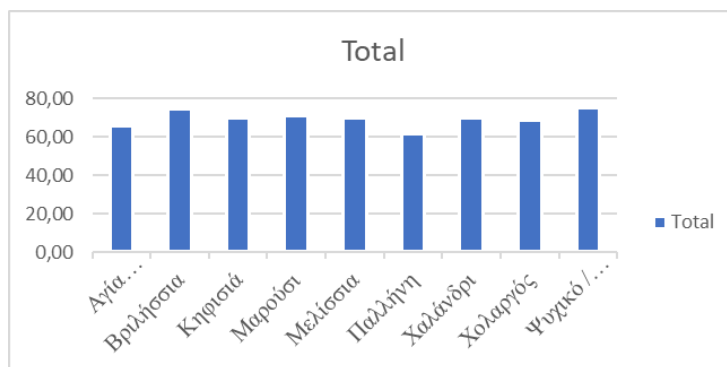


Σχήμα 3 Ηχοπερίπατος στις περιοχές Φιλοθέης και Ψυχικού.

Συγκεκριμένα, μετά από μετρήσεις σε πάρκο της Φιλοθέης παρατηρούνται τιμές  $L_{inst}$  66,9dB,  $L_{eq}$  80,5dB με ελάχιστες τιμές  $L_{min}$  46,2dB και μέγιστη  $L_{max}$ : 102,9dB. Παράλληλα, οι καταγραφές ανέδειξαν ήχους πουλιών, συζητήσεις ανθρώπων και παιδιών που παίζουν. Συνολικά, δεν παρουσιάζεται μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των δήμων Ψυχικού-Φιλοθέης και Κηφισιάς, και των δήμων Χαλανδρίου και Αμαρουσίου, όσον αφορά την έκθεση στο θόρυβο. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι στον δήμο Ψυχικού-Φιλοθέης, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως «υπνούπολη», διαθέτει όμως πολύ πράσινο, ο μέσος όρος θορύβου είναι 75dB, δηλαδή πάνω από τον αντίστοιχο μέσο όρο των αστικών προαστίων με κομβικό χαρακτήρα, όπως το Χαλάνδρι και το Μαρούσι.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4, ο μέσος όρος ηχητικής στάθμης κατά τη διάρκεια των καταμετρήσεων στα βόρεια προάστια είναι ελάχιστα κάτω από 70dB. Ακόμη κι αν και υπάρχει κάποια απόσταση από το κέντρο της πόλης, ο ήχος υπερβαίνει κατά πολύ το συστημένο όριο των 55dB. Παρόλα αυτά, ενώ δεν υπάρχει σχεδόν καμία διαφορά με τον μέσο όρο στάθμης θορύβου στο κέντρο της Αθήνας στην προκειμένη περίπτωση το ηχοτόπιο δεν προκαλεί ενόχληση [8], καθώς συντίθεται από ήχους πουλιών, συζητήσεις ανθρώπων, παιδιών που παίζουν και γενικά ήχους θετικού στο ανθρώπινο αυτί, οι οποίοι δεν φαίνεται να ενοχλούν όσο ο κυκλοφοριακός θόρυβος του κέντρου.

Επίσης, τα βόρεια προάστια δεν μπορούν να χαρακτηριστούν πιο ήσυχα από το κέντρο της πόλης, αν ληφθούν υπόψη οι στρατηγικοί χάρτες του Υπουργείου [3]. Γενικά, ο κύριος ήχος χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλές στάθμες, ακόμα και σε τμήματα περιοχών απομακρυσμένα από οδικές αρτηρίες, καθώς σχετίζεται με ανθρώπινες δραστηριότητες ή φυσικούς ήχους, όπως στην πιο αγροτική περιοχή Παλλήνη-Κάντζα και ομοίως σε περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως Βριλήσσια, Μελίτσια κλπ. Η Αγία Παρασκευή, παρά τον αστικό της χαρακτήρα, διαφέρει σχετικά λίγο από τις παραπάνω περιοχές.



Σχήμα 4 Σύγκριση αποτελεσμάτων.

Σχετικά με την επιλογή συγκεκριμένων δήμων από υψηλά εισοδηματικά κριτήρια και λαμβάνοντας υπόψη και τα ποσοστά πρασίνου, οι διαφορές σε dB είναι ελάχιστες μεταξύ ακριβών και πράσινων περιοχών σε σύγκριση με περιοχές πιο πυκνοδομημένες / μεσαίων εισοδημάτων. Στην Κηφισιά, όπου ο αστικός ιστός

καταλαμβάνεται κυρίως από μονοκατοικίες ο μέσος όρος θορύβου είναι σχεδόν 70dB, ενώ στο Μαρούσι που είναι πιο αστικό, είναι μόνο κατά 1,38dB υψηλότερος.

Αντίθετα, παρατηρήθηκαν διαφορές στον μέσο όρο θορύβου μεταξύ περιοχών οι οποίες θεωρούνταν παρόμοιες. Τα Μελίσσια, λόγω γεωγραφικού χαρακτήρα, πιο κοντά σε δασύλλια με μεγαλύτερες περιοχές πρασίνου, θεωρούνταν πιο ήσυχα από τα Βριλήσσια, αν και δεν αναμενόταν αυτή η διαφορά να φτάνει τα περίπου 5dB. Για παράδειγμα, σε εξωτερικό χώρο κατοικίας στο Χαλάνδρι (Πίνακας 1α), η τιμή είναι άνω των 60dB, με κύρια συστατικά του τους ήχους ζώων και πουλιών. Μόνο ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις όπου υπάρχουν ήχοι από ανθρωπογενείς δραστηριότητες με τη μέση τιμή ήχου να είναι κάτω των 55dB, όπως σε δρόμο ήπιας κυκλοφορίας στην Κηφισιά - 44,1dB (1β), στο Χολαργό - 45,1dB (1γ), και στην Αγία Παρασκευή - 40,7dB (1δ). Ακόμα και στα πάρκα και στις ρεματιές, σύμφωνα με τις μετρήσεις, όταν υπάρχουν ανθρωπογενείς δραστηριότητες, η στάθμη θορύβου μπορεί να είναι αρκετά υψηλή.

Πίνακας 1 Σημεία με χαμηλή μέση τιμή ήχου.

<table border="1"> <tr> <td>44.5</td> <td>62.3</td> </tr> <tr> <td>37.8</td> <td>73.1</td> </tr> </table>	44.5	62.3	37.8	73.1	<table border="1"> <tr> <td>43.3</td> <td>44.1</td> </tr> <tr> <td>40.0</td> <td>54.5</td> </tr> </table>	43.3	44.1	40.0	54.5	<table border="1"> <tr> <td>51.7</td> <td>45.1</td> </tr> <tr> <td>33.8</td> <td>58.7</td> </tr> </table>	51.7	45.1	33.8	58.7	<table border="1"> <tr> <td>37</td> <td>40.7</td> </tr> <tr> <td>33.6</td> <td>52.9</td> </tr> </table>	37	40.7	33.6	52.9
44.5	62.3																		
37.8	73.1																		
43.3	44.1																		
40.0	54.5																		
51.7	45.1																		
33.8	58.7																		
37	40.7																		
33.6	52.9																		
α	β	γ	δ																

Παρόλα αυτά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το είδος του επικρατέστερου ήχου σε κάθε περίπτωση, καθώς οι υψηλές στάθμες ήχου δε συνεπάγονται ενόχληση. Η ανάλυση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, βάσει μιας κατηγοριοποίησης σε δύο επίπεδα – αρχικά με αντικειμενική καταγραφή της στάθμης του ήχου και σε δεύτερο επίπεδο με ηχητικές πηγές του ήχου – δείχνει ότι όσον αφορά στα συστατικά του ηχοτοπίου, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην καθημερινή κίνηση των πολιτών ανεξαρτήτως περιοχής. Σημαντική πηγή είναι μηχανικοί και τεχνολογικοί ήχοι, σε όλα τα προάστια, ακόμα και στην Παλλήνη-Κάντζα. Υπάρχουν όμως και τμήματα περιοχών όπου είναι δευτερεύοντες ή απόντες, όπως στο Άλσος Συγγρού και σε πάρκα σε Φιλοθέη, Βριλήσσια και Μελίσσια, και Χαλάνδρι (Πίνακας 2). Σε αυτά τα κενά του αστικού ιστού, πάρκα, άλση και πλατείες, κυριαρχούν ήχοι πουλιών, εντόμων, ανθρώπων ενίοτε, είτε ως κυρίαρχοι είτε στο υπόβαθρο, όπως αναμενόταν. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά καθώς οι ήχοι που σχετίζονται με τη φύση θεωρούνται θετικοί, ενώ οι μηχανικοί και τεχνολογικοί ήχοι, αρνητικοί. Οι ήχοι από ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορούν να είναι και θετικοί και αρνητικοί, αλλά συνήθως θεωρούνται πιο ευχάριστοι ή λιγότερο δυσάρεστοι από μηχανικούς και τεχνολογικούς ήχους.

Έστω και αν εξαιρεθούν οι πράσινες περιοχές, οι παραπάνω δήμοι είναι αρκετά ελκυστικοί από ηχητικής άποψης, όπως ο Δήμος Χαλανδρίου, στα περισσότερα σημεία, και ο Δήμος Φιλοθέης-Ψυχικού. Αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που κάποιος που διαμένει ή εργάζεται σε αυτές τις περιοχές εκτίθεται σε υψηλές τιμές θορύβου, έχει την ευκαιρία να βρεθεί σε ένα ευχάριστο ηχητικό τοπίο. Σε δρόμους ήπιας κυκλοφορίας με χρήση κατοικίας, οι υψηλές στάθμες, άνω των 60dB, προέρχονται



από ανθρωπογενή δραστηριότητα και φυσικούς ήχους, που στην προσέγγιση του ηχοτοπίου έχει θετικό πρόσημο.

Πίνακας 3.2 Στάθμες σε περιοχές πάρκων και πλατειών.

Ρεματιά Χαλανδρίου	Βριλήσσια πάρκο Αττικής οδού	Πάρκο στα Μελίσια
Πλατεία στο Ψυχικό	Πάρκο στο Ψυχικό	Αλσος Συγγρού

Φυσικά, η αντίληψη του ήχου από τους κατοίκους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλαίσιο συνθηκών [9]. Στην Παλλήνη και την Κάντζα, οι κατώτατες τιμές είναι λιγότερο από τα 50dB αλλά οι ανώτερες, σε συγκεκριμένα σημεία και/ή χρονική στιγμή περνούν τα 80dB. Σε αυτή την περίπτωση η γεωγραφική θέση και ο δομημένος ιστός δεν επηρεάζουν σημαντικά την αντίληψη. Η συνολικά χαμηλή τιμή θορύβου υποδεικνύει ότι ο Δήμος είναι ηχητικά ελκυστικός, αλλά στην πραγματικότητα, έχει μεγάλη επιβάρυνση από αρνητικούς ήχους, που προέρχονται κυρίως από κατασκευαστικές εργασίες. Άρα, υπάρχει η περίπτωση ένα προάστιο, αν και πιο απόμακρο και με αγροτικό χαρακτήρα, να παρέχει δυσάρεστο ή και ενοχλητικό ηχητικό περιβάλλον, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

#### 4. Συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η καταγραφή του ακουστικού περιβάλλοντος σε προάστια της Αθήνας, και η συσχέτιση του με τη θεωρία της προσέγγισης του ηχοτοπίου. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν παρουσιάζουν έντονες διαφορές μεταξύ τους, λόγω γεωγραφικού χαρακτήρα, δομημένου ιστού και εισοδηματικών κριτηρίων των κατοίκων τους. Σύμφωνα με τις καταγραφές οι περισσότεροι ήχοι, ανεξαρτήτως περιοχής, σχετιζόταν με ανθρώπινες δραστηριότητες και οι μέσες τιμές στάθμης, στα περισσότερα σημεία των δήμων, ήταν σχετικά υψηλές. Φαίνεται ότι γεωγραφική θέση και πολεοδομικά κριτήρια δεν επηρεάζουν σημαντικά είδος των ήχων. Επίσης, οι στάθμες δεν προσδιορίζουν την ποιότητα του ήχου καθώς άλλα χαρακτηριστικά, όπως οι τυχατικοί ήχοι, η χρονική περίοδος/στιγμή ή συνθήκες ανάπτυξης περιοχών προκαλούν μεγάλη επιβάρυνση από αρνητικούς ήχους.

Η μελέτη έδειξε ότι τελικά, οι κάτοικοι των Αθηνών, ανεξαρτήτως περιοχής όπου κατοικούν ή εργάζονται, δύσκολα βρίσκονται σε χώρο όπου οι τιμές θορύβου είναι στα επιθυμητά όρια κάτω των 50dB σε μέσο όρο και συχνά εκτίθενται σε τιμές που ξεπερνούν τα 55, ακόμα και τα 80dB. Μεγάλες διαφορές δεν παρατηρούνται μεταξύ των περιοχών, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής τοποθεσίας ή του οικονομικού υπόβαθρου των κατοίκων. Η έκθεση σε υψηλό θόρυβο, τουλάχιστον για τους περισσότερους κατοίκους των βορειών προαστίων, δεν είναι μόνιμη, αλλά σχετίζεται με την ώρα μετακίνησης προς την εργασία. Παρόλο που κοντά στις

κεντρικές αρτηρίες καταγράφονται υψηλές στάθμες, προερχόμενες από κυκλοφοριακό θόρυβο, ο οποίος είναι ανεπιθύμητος, στους παράδρομους και σε πράσινες περιοχές, οι τιμές θορύβου μπορεί να είναι υψηλές, αλλά προέρχονται από πηγές με θετικό πρόσημο (φυσικοί ήχοι κλπ).

Συμπερασματικά, παρόλο που οι περιοχές που ερευνήθηκαν διασχίζονται από μεγάλες λεωφόρους, βάσει των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους και της γεωμορφολογίας τους, έχουν αντίστοιχα και μεγάλα τμήματα όπου οι θετικοί ήχοι κυριαρχούν και τις καθιστούν πιο κατάλληλες από το κέντρο της πόλης, καθώς προσφέρουν ποικιλία ερεθισμάτων και φυσικών ήχων.

## 5. Αναφορές

- [1] M. Schaffer *The Tuning of the world* Knopf, New York, (1977).
- [2] F.Aletta, , J. Kang, and O. Axelsson «Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models» *Landscape and Urban Planning* **149**, pp 65-74 (2016).
- [3] Κ. Στεφανάκης «Συνολικός θόρυβος, Αθήνα (Κέντρο)». Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2019).
- [4] Ö. Axelsson, M.E. Nilsson and B. Berglund «A principal components model of soundscape perception» *J.Acoust. Soc. Am.* **128**, pp 2836-2846 (2010).
- [5] B. Schulte-Fortkamp «Integrating the soundscape in the community noise area» *in 19<sup>th</sup> International Congress of Acoustics* (2007).
- [6] J. Kang et al «Ten questions on the soundscapes of the built environment». *Building and Environment*, **108** (2016).
- [7] P. Lercher and B. Schulte-Fortkamp «Soundscape of European Cities and Landscapes – Harmonising» in J. Kang et al ed. *COST TUD Action TD0804: Soundscape of European Cities and Landscapes*, Soundscape COST, Oxford, (2013), pp 118-127 (2013).
- [8] B. Berglund, T. Lindvall, and D. H. Schwela eds. «Guidelines for Community Noise» *World Health Organization* (1999).
- [9] K. Sakantamis and K. Chourmouziadou «Χρόνο-Σφαίρες: συνδυαστική μελέτη του αστικού Οσμο-Ηχο-τοπίου της Θεσσαλονίκης» στο Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής Ακουστική 2014, (2014).

## **Ηχητικές ταυτότητες περιοχών διαφορετικού υψομετρικού επιπέδου: Η περίπτωση του ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης**

Αναστασία Κορκόντζιλα ΠΜΣ «Περιβαλλοντικός Αρχιτεκτονικός & Αστικός Σχεδιασμός» Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ anaskork@arch.auth.gr	Αιμιλία Καραποστόλη PhD, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ aimilia@karapostoli.gr	Τσαλιγόπουλος Άγγελος PhD, Εργαστήριο Ακουστικής Οικολογίας, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, tsaligopoulos@env.aegean.gr	Ματσίνοσ Γιάννης Καθηγητής, Εργαστήριο Ακουστικής Οικολογίας, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, matsinos@aegean.gr
--	--	---	---

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Ολοένα και αυξανόμενες είναι οι επιπτώσεις που επιφέρει ο θόρυβος εντός των μεγάλων αστικών συγκροτημάτων, όχι μόνο στην ευημερία του ίδιου του ανθρώπου, αλλά και ολόκληρου του πλανήτη μας. Έτσι, η δημιουργία ή η εύρεση και αξιοποίηση «ήσυχων περιοχών» εντός των μεγάλων πολεοδομικών συγκροτημάτων φαντάζει πλέον μονόδρομος. Η συγκεκριμένη έρευνα, χρησιμοποιώντας μια ευρεία γκάμα εργαλείων, επιχειρεί να αξιολογήσει τα ηχητικά χαρακτηριστικά ήσυχων περιοχών του ευρύτερου ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης, που βρίσκονται όμως σε διαφορετικό υψομετρικό επίπεδο από αυτό του σημερινού οδικού δικτύου και να αναδείξει το κατά πόσο η υψομετρική αυτή διαφορά παίζει ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση του ηχοτοπίου εν δυνάμει ήσυχων περιοχών σε επίπεδο αστικού ιστού.*

### ***Sonic identities of areas of different altitudes: The case of Thessaloniki's (Greece) Historic Centre***

### **ABSTRACT**

*The impact of noise within large urban agglomerations, is increasing, concerning the well-being of mankind and the entire planet. A seemingly easy solution to this problem is to create or find and “re-use” quiet areas in the urban fabric. This paper, attempts -by using a wide range of tools and methodologies-, to evaluate the sound characteristics of quiet areas of Thessaloniki's (Greece) Historic Centre, which are at a different level from that of the current road network and to highlight whether this elevation difference contributes substantially to the formation of the sound identity of a potentially quiet area in the urban fabric.*

## Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, το πρόβλημα του περιβαλλοντικού θορύβου ιδιαίτερα εντός των μεγάλων αστικών κέντρων, προβληματίζει όλο και περισσότερους επιστήμονες. Μάλιστα, σύμφωνα με προβλέψεις του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, αναμένεται να λάβει ακόμη μεγαλύτερες προεκτάσεις μέχρι το 2030, εξαιτίας της αμείωτης αστικής ανάπτυξης και κατ' επέκταση της αυξημένης ζήτησης για μεταφορές [1].

Μια βιώσιμη λύση στο πρόβλημα, με πολλαπλά οφέλη για τον άνθρωπο αλλά και τη βιόσφαιρα γενικότερα, είναι η εύρεση και διατήρηση ή ακόμη και η δημιουργία ήσυχων περιοχών (Η.Π.) [2] εντός αστικού ιστού, στις οποίες οι πολίτες θα μπορούν χωρίς κάποια ιδιαίτερη προσπάθεια να «αποδράσουν» έστω και για λίγο από τον θόρυβο των μεγαλουπόλεων. Ήδη, αρκετές μελέτες έχουν γίνει πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα, με πολλές από αυτές να αποδεικνύουν μάλιστα, ότι Η.Π. μπορούν να θεωρηθούν ακόμη και χώροι όπως αυλές ιστορικών οικοδομημάτων, εκκλησίες και υπαίθριοι αρχαιολογικοί χώροι (π.χ. αρχαία θέατρα) [3-5].

Αναμφίβολα, η προσέγγιση αυτή προσφέρει πολλαπλά οφέλη ιδιαίτερα σε χώρες όπως η Ελλάδα -στις οποίες το πρόβλημα ύπαρξης ελαχίστων Η.Π. (πράσινων ή μη) στις αστικές της περιοχές είναι δεδομένο- καθώς, πέρα από την διαφύλαξη της πολιτιστικής κληρονομιάς και ταυτότητας των ιστορικών αυτών τόπων, «λύνει» ταυτόχρονα και τα χέρια όλων όσων ασχολούνται με την ανάδειξη Η.Π. εντός μεγάλων αστικών κέντρων.

### 1. Μέθοδος, εργαλεία και λογισμικά

Για την υλοποίηση της παρούσας έρευνας αξιοποιήθηκαν: α) η μεθοδολογία καθορισμού και διαχείρισης ήσυχων περιοχών πολεοδομικού συγκροτήματος του Ευρωπαϊκού προγράμματος QUADMAP [6], β) το περιγραφικό μοντέλο του World Soundscape Project (WSP) [7] και γ) η φαινομενολογική προσέγγιση που προτείνει το ινστιτούτο CRESSON [8].

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το ιστορικό κέντρο της Θεσσαλονίκης, πόλη η οποία εκτός όλων των άλλων προτερημάτων της είναι κτισμένη σε πολλά διαφορετικά επίπεδα, γεγονός που την καθιστά ιδανική επιλογή για μια τέτοιου είδους μελέτη. Η τελική επιλογή των περιοχών που αναλύθηκαν έγινε με τη βοήθεια των ίδιων των κατοίκων της πόλης αλλά και 3 επιστημόνων διαφορετικών ειδικοτήτων που σχετίζονται άμεσα με τον ήχο -όπως προτείνει ο Hellström [9]- έχοντας προσωπική εμπειρία από την πόλη.

Οι 3 περιοχές που αναδείχθηκαν ως χαρακτηριστικότερες Η.Π. εντός των ορίων του ευρύτερου ιστορικού κέντρου της πόλης είναι:

- **"Περιοχή πρασίνου" στο επίπεδο του δρόμου:** Πανεπιστήμια -29,9%, Πάρκο ΧΑΝΘ -64,4%, Πλ. Αριστοτέλους -3,5%, Πλ. Δικαστηρίων -2,2%
- **Περιοχή υψηλότερα από το επίπεδο του δρόμου:** Λευκός Πύργος -29,6%, Ορίζοντες Roof Garden Bar-Restaurant (Electra Palace Thessaloniki) -18,3%, Παιδαγωγική Σχολή (Πύργος) -19,0%, Πύργος Ο.Τ.Ε. -33,0%
- **Περιοχή χαμηλότερα από το επίπεδο του δρόμου:** Ι.Ν. Παναγίας Χαλκέων-15,9%, Ι.Ν. Παναγίας Αχειροποιήτου -13,0%, Πλ. Ναυαρίνου -21,8%, Ρωμαϊκή Αγορά -49,3%

Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημανθεί το γεγονός ότι λόγω των εκτάκτων μέτρων που έλαβε η πολιτεία για τον περιορισμό εξάπλωσης της πανδημίας του Covid-19, ο Πύργος του ΟΤΕ δεν ήταν προσβάσιμος την ημέρα που ορίστηκε να γίνουν οι καταγραφές πεδίου. Προκειμένου να διατηρηθεί αναλλοίωτο το πρωτόκολλο, η καταγραφή έλαβε χώρα στην αμέσως επόμενη σε προτίμηση περιοχή, το δώμα μιας πολυκατοικίας 8 ορόφων στην πλ. Αγίας Σοφίας. Επίσης, τα αποτελέσματα που αφορούν το Πάρκο της ΧΑΝΘ δεν παρουσιάζονται εδώ, μιας και η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στον παράγοντα ύψος -και βάθος αντίστοιχα- και το πώς επηρεάζει αυτός τον χαρακτηρισμό μια περιοχής ως ήσυχης.

### 1.1 Πρωτόκολλο συλλογής δεδομένων

Το πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε για τις ηχογραφήσεις πεδίου είναι αυτό που έχει αναπτύξει η Ελληνική Εταιρεία Ακουστικής Οικολογίας [10]. Κατά τη διαδικασία του πειράματος συγκεντρώθηκαν συνολικά 3 ηχητικά αρχεία, διάρκειας 10 λεπτών. Από κάθε ηχητικό αρχείο εξήχθησαν τα 4' με την περισσότερη ηχητική πληροφορία, τα οποία και εισήχθησαν στο λογισμικό R 'Stats'. Με τα πακέτα (R packages) Seewave [11], TuneR [12], Soundecology [13] και Ineq [14] εξήχθη ο δείκτης Ακουστικής Πολυπλοκότητας (*Acoustic Complexity Index, ACI*), ο δείκτης Ηχοτοπίου (*Normalized Difference Soundscape Index, NDSI*), ο δείκτης βιοποικιλότητας Shannon (*Shannon Index*) και ο δείκτης Ακουστικής Ποικιλομορφίας (*Acoustic Evenness Index (AEI)*).

Για το θεωρητικό κομμάτι, τη διαδικασία των συνεντεύξεων (ανοικτού, ημιδομημένου τύπου, χωρίς χρονικό περιορισμό), υιοθετήθηκε η μεθοδολογία του ινστιτούτου CRESSON [9] και έτσι -εν τέλει- διαμορφώθηκε η ηχητική ταυτότητα της κάθε περιοχής με τη βοήθεια του μοντέλου E-M-P [15], το οποίο για τον καθορισμό της ηχητικής ταυτότητας μιας περιοχής συνδυάζει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά χαρακτηριστικά του ηχητικού περιβάλλοντος [9].

## 2. Αποτελέσματα

### 2.1 Ηχητική ταυτότητα Ρωμαϊκής Αγοράς

Ένα από τα σημαντικότερα και μεγαλύτερα σε έκταση μνημεία της Θεσσαλονίκης. Βρίσκεται ανάμεσα στην Εγνατία και την οδό Αγίου Δημητρίου, βόρεια της Πλατείας Αριστοτέλους και είναι χώρος ανοικτός, στην καρδιά της πόλης, αλλά μακριά από δυνατές πηγές θορύβου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Ρωμαϊκή Αγορά

Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε την Πέμπτη 12 Μαρτίου 2020, στις 12:08μμ, με τη θερμοκρασία την ώρα της δειγματοληψίας να είναι 17° C. Βάσει αποτελεσμάτων, αν και οι ήχοι ανθρωπογενούς προέλευσης υπερτερούν στον χώρο αυτό, η Ρωμαϊκή Αγορά θα μπορούσε να χαρακτηριστεί Η.Π. βάσει του μέσου όρου των dB(A) που καταγράφηκαν σε αυτήν.

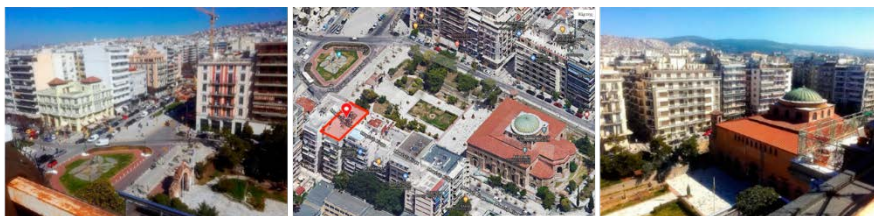
### 2.1.1 Περιγραφή ηχητικού αποσπάσματος

Σχετικά με το ηχοτοπίο της, οι ήχοι υποβάθρου ήταν πολύ πιο έντονοι από τους ήχους στο προσκήνιο, που ήταν κατά κύριο λόγο ανθρωπογενούς προελεύσεως. Η ποιότητα της ηχογράφησης χαρακτηρίστηκε ομόφωνα καλή. Ο πρώτος από τους συμμετέχοντες αντιλήφθηκε σχεδόν αμέσως την ιδιαιτερότητα της περιοχής, ότι δηλαδή μιλάμε για ένα μέρος «θαμμένο», κοντά όμως σε δρόμο, στο οποίο ο ήχος είναι «από πάνω σου». Ο δεύτερος είναι σίγουρος ότι μιλάμε για περιοχή με λίγη βλάστηση στο κέντρο της πόλης και ο τελευταίος, διακρίνει ότι η καταγραφή δεν έγινε στο επίπεδο του δρόμου, διευκρινίζει ωστόσο λανθασμένα ότι έγινε σε κάποιο μπαλκόνι, δεύτερου ή τρίτου ορόφου, σε περιοχή κοντά, αλλά όχι στο κέντρο της πόλης. Μάλιστα, χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο ηχοτοπίο «συνηθισμένο σε έναν πολίτη της Θεσσαλονίκης». Η ηχογράφηση έγινε σίγουρα άνοιξη, πραινές ώρες, συμφωνούν όλοι οι συνεντευξιαζόμενοι. Τέλος τα ηχητικά εφέ που έγιναν αντιληπτά είναι βόμβος, επικάλυψη και επανάληψη.

Η Ρωμαϊκή Αγορά, γίνεται αντιληπτή ως χώρος ανοικτός, δημόσιος, μεγάλης έκτασης, εντός αστικού ιστού, με εμφανή την έλλειψη δομημένου περιβάλλοντος (σε κοντινή απόσταση). Πρόκειται για ένα μοναδικό ηχοτοπίο της πόλης της Θεσσαλονίκης, σημαντικής ηχητικής άνεσης και ιδιαίτερης ακουστικής ποιότητας και ηχητικής πολυπλοκότητας, το οποίο ωστόσο είναι ισορροπημένο ως προς την αναλογία των βιολογικών και ανθρωπογενών ήχων που παρατηρούνται σε αυτό.

### 2.2 Ηχητική ταυτότητα δώματος πολυκατοικίας στην πλατεία Αγ. Σοφίας

Στην πλ. Αγ. Σοφίας παρατηρούνται ψηλά μέτωπα παλιών πολυκατοικιών, οι περισσότερες χωρίς εξώστες (μπαλκόνια), που ευνοούν τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων, κυρίως χαμηλών συχνοτήτων. Ακόμη, στο επίπεδο του δρόμου βρίσκεται ένας από τους μεγαλύτερους πεζοδρόμους της Θεσσαλονίκης, στον οποίο συχάζουν πολλοί μουσικοί του δρόμου, συνθέτοντας ένα αρκετά χαρακτηριστικό ηχοτοπίο. Η πολυκατοικία στην οποία έγινε η καταγραφή είναι 8 ορόφων. Επομένως, το σημείο καταγραφής βρίσκεται περίπου 27m πάνω από το επίπεδο του δρόμου (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Δώμα πολυκατοικίας, πλατεία Αγ. Σοφίας

Και αυτή η καταγραφή πραγματοποιήθηκε την Πέμπτη 12 Μαρτίου 2020, στις 11:39μμ, με τη θερμοκρασία την ώρα της δειγματοληψίας να είναι 16° C. Και σε αυτή την περιοχή υπερτερούν ξεκάθαρα οι ήχοι ανθρωπογενούς προέλευσης -ακόμη και υπό συνθήκες lockdown-, ωστόσο και πάλι, βάσει του Μ.Ο. των επιπέδων θορύβου της θα μπορούσε να χαρακτηριστεί Η.Π.

### 2.2.1 Περιγραφή ηχητικού αποσπάσματος

Οι ήχοι υποβάθρου είναι κι εδώ κατά πολύ εντονότεροι από αυτούς του προσκήνιου, με την Ανθρωποφωνία για άλλη μια φορά να κυριαρχεί στο προσκήνιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κίνηση στο συγκεκριμένο σημείο της πόλης είναι σαφέστατα κατά πολύ μειωμένη σε σχέση με τις προ-Κορωνοϊού συνθήκες.

Ένας εκ των συμμετεχόντων διαπιστώνει την χαμηλή ηχηρότητα του υπό μελέτη ήχου και επισημαίνει εύστοχα ως χώρο ηχογράφησης δώμα σε πολυκατοικία του κέντρου (Αγίας Σοφίας, Εγνατία), ενώ οι άλλοι δύο επισημαίνουν ότι ο θόρυβος ασθενεί, αλλά το αποδίδουν ο μὲν ένας στο ότι η ηχογράφηση πιθανώς πραγματοποιήθηκε εν μέσω Κορωνοϊού και ο ἄλλος στο ότι έχει αρκετό κρύο. Ο τελευταίος αμφιταλαντεύεται εάν η ηχογράφηση πραγματοποιήθηκε σε κάποιο όροφο διότι τα στοιχεία του δρόμου δεν είναι τόσο έντονα, παρόλο που ακούγονται καθαρά. Η ποιότητα της ηχογράφησης χαρακτηρίστηκε από όλους καλή, ωστόσο, μόνο ένας εκ των τριών συμμετεχόντων βρήκε το συγκεκριμένο περιβάλλον ηχητικά άνετο.

Σε άμεση αντίθεση με την Ρωμαϊκή Αγορά, το δώμα της πολυκατοικίας στην πλ. Αγ. Σοφίας προσδιορίζεται σαν μικρής κλίμακας ανοικτός χώρος, ο οποίος αποκτά ενδιαφέρον κυρίως λόγω του μουσικού του δρόμου. Μάλιστα, ο συνδυασμός ανθρώπινης παρουσίας (στο προσκήνιο) και ήχος πουλιών και βόμβος οχημάτων (στο υπόβαθρο) παραπέμπει ξεκάθαρα σε κτίσμα εντός αστικού κέντρου, το οποίο είναι ιδιαίτερα ψηλό, καθώς τα επίπεδα έντασης των διαφόρων στοιχείων, που συνθέτουν το συγκεκριμένο ηχοτόπιο, είναι σαφώς μειωμένα σε σχέση με αυτά που συναντάει κανείς στο επίπεδο του δρόμου.

Τέλος, τα ηχητικά εφέ που παρατηρήθηκαν είναι *βόμβος, συνεκδοχή, επανάληψη* και τέλος *επικάλυψη*.

## 3. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη, αξιοποιώντας την άποψη των ίδιων των κατοίκων της Θεσσαλονίκης, ανέδειξε περιοχές του ιστορικού κέντρου της πόλης που πληρούν τα κριτήρια καθορισμού -βάσει των οποίων μια περιοχή χαρακτηρίζεται ήσυχη. Επιπρόσθετα, κατόρθωσε να επιτύχει και τους άλλους δύο στόχους που είχαν τεθεί εξ' αρχής: α) να αποτυπωθεί η ηχητική ταυτότητα αυτών -μέσω επιλεκτικής ακρόασης ηχητικών καταγραφών και ημιδομημένων συνεντεύξεων- και β) να αξιολογηθεί το κατά πόσο ο παράγοντας ύψος -και βάθος αντίστοιχα- παίζει ρόλο στη διαμόρφωση του ηχοτοπίου εν δυνάμει Η.Π. σε επίπεδο αστικού ιστού. Ακόμη, τα αποτελέσματα ανέδειξαν πως η αστική ησυχία αφορά περισσότερο την ηχητική πολυπλοκότητα και λιγότερο τα επίπεδα έντασης του θορύβου.

Εν κατακλείδι, η εν λόγω μελέτη φαίνεται πως συμβάλλει ουσιαστικά στην «επέκταση» της επιστημονικής γνώσης, έστω και σε ένα πολύ αρχικό στάδιο. Το

πρωτόκολλο που δημιουργήθηκε και που συνδυάζει εργαλεία πολλαπλών επιστημονικών κλάδων όπως η Ακουστική Οικολογία, η Οικοακουστική, η Επιστήμη των πολιτών, η Αρχιτεκτονική και ο Πολεοδομικός Σχεδιασμός, αξίζει να τροποποιηθεί ή/και να συμπληρωθεί κατάλληλα από ειδικούς του κάθε πεδίου. Η εύρεση νέων, αλλά και η διαφύλαξη ήδη γνωστών Η.Π. σε επίπεδο αστικού ιστού, με ιδιαίτερες -ή και όχι- ηχητικές ταυτότητες, είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να περιοριστούν οι πάρα πολλές αρνητικές επιπτώσεις του περιβαλλοντικού θορύβου.

#### 4. Αναφορές

[1] European Environment Agency (EEA) Environmental noise in *Europe - 2020 (EEA Report No 22/2019)* Publications Office of the EU, Luxembourg (2020)

[2] Α. Κορκόντζιλα «Αποτύπωση ηχητικών ταυτοτήτων Ήσυχων Περιοχών διαφορετικού υψομετρικού επιπέδου: Η περίπτωση του Ιστορικού Κέντρου της Θεσσαλονίκης», Μυτιλήνη, Λέσβος (2020)

[3] A. Korkontzila, A. Karapostoli, A. Tsaligopoulos & Y. G. Matsinos «Assessing the Effects of Noise on Sound Identities of Historical Landmarks» *Acoustics*, **2**, pp.719-734 (2020)

[4] L. Maffei, M. Masullo & A. Oliviero «Quiet areas inside historical city centers» in *Proceedings of Internoise 2017*, Hong Kong, China (2017)

[5] M. Masullo, F. Castanò, R. A. Toma & L. Maffei «Historical Cloisters and Courtyards as Quiet Areas» *Sustainability*, **12**, 2887 (2020)

[6] C. Bartalucci, F. Borch, M. Carfagni, L. Governi, G. Zonfrillo, I. Aspuru, I. Garcia, K. Herranz, M. Weber, H. Wolfert, P. Gaudibert, F. Mietlicki, C. Ribeiro, R. Bellomini, L. Busa, S. Luzzi & R. Natale *Guidelines for the Identification, Selection, Analysis and Management of Quiet Urban Areas* (2015)

[7] R. M. Schafer *The Soundscape: Our Sonic Environments and the Tuning of the World*, Rochester: Destiny Books (1994)

[8] J.-F. Augoyard & H. Torgue *Sonic Experience: A Guide to Everyday Sounds*, © McGill-Queen's University Press 2005, p.137 (2006)

[9] B. Hellström «The Sonic Identity of European Cities: A Presentation of the Work Conducted by the Swiss-French researcher Pascal Amphoux» *Soundscape Studies and Methods*, **9**, pp.59-82 (2002)

[10] Κ. Παπαδημητρίου «Το εργαστήριο των "Ηχοερευνητών" ως εισαγωγή σε βασικές έννοιες της Ακουστικής Οικολογίας» in *8<sup>ο</sup> Συνέδριο Ακουστικής*, Αιγάλεω, Αθήνα (2016)

[11] J. Sueur, T. Aubin & C. Simons «Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis» *Bioacoustics*, **18**, pp. 213-226 (2008)

[12] U. Ligges, S. Krey, O. Mersmann & S. Schnackenberg «tuneR: Analysis of Music and Speech» (2018)

[13] L. J. Villanueva-Rivera & B. C. Pijanowski «Soundscape Ecology: 'soundecology', R package version 1.3.3» (2018)

[14] A. Zeileis και C. Kleiber «Measuring Inequality, Concentration, and Poverty: 'ineq', Version 0.2-13» (2015)

[15] Α. Καραποστόλη «Η μελέτη και ο σχεδιασμός του ηχητικού περιβάλλοντος στην αρχιτεκτονική θεωρία και πρακτική | Αναζητώντας τα σύγχρονα ηχοτοπία της Θεσσαλονίκης», Θεσσαλονίκη (2016)



## **Οι σχέσεις εικονογραφίας και ακουστικής στην βυζαντινή ναοδομία.**

Παναγιώτης Καραμπατζάκης  
Αρχιτέκτων Μηχανικός  
Σύμβουλος ακουστικής  
Επιστημονικός συνεργάτης Εργαστηρίου ακουστικής τεχνολογίας Α.Π.Θ.  
[info@nestos.net](mailto:info@nestos.net), [pkar38@arch.auth.gr](mailto:pkar38@arch.auth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Κατά τους πιστούς, τους ιστορικούς της τέχνης και τους εμπλεκόμενους με τα «θεία», στο δόγμα της ορθοδόξου πίστεως, η αγιογραφία, παίζει τον ρόλο της γέφυρας, ανάμεσα στον άνθρωπο και το Θείο. Με άλλα λόγια, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες, της ένωσης των πιστών, με την πίστη τους.*

*Μετά από την περίοδο της εικονομαχίας, στην Ζ' οικουμενική σύνοδο του 787 μ.Χ. η «έννοια» των «εικόνων», αποκαταστήθηκε, δημιουργώντας τη γνωστή παράδοση της αγιογράφησης των ναών. Η παράδοση αυτή επεκτάθηκε, με την βοήθεια των «ιστορικών» και «θεολογικών» καταβολών της και κυριάρχησε, «φιλοσοφικά» αλλά και χωρικά στην βυζαντινή ναοδομία.*

*Με δεδομένη την «επέκταση» και την «κυριαρχία» της αγιογράφησης των ναών κατά τα χρόνια του Βυζαντίου και γνωρίζοντας την έλλειψη «ενεργών» επιφανειών, στον εσωτερικό χώρο, εξ αιτίας της «κυριαρχίας» αυτής, οι παράμετροι ακουστικού πεδίου που καταγράφονται, αναμένεται, να βρίσκονται, μοιραία, σε επίπεδα που σήμερα θα ήταν απαγορευτικά. Ωστόσο, στους σταυροειδείς ναούς, αυτό, κατά κύριο λόγο, δεν συμβαίνει. Η παρούσα εργασία, μέσω μία σειράς, «διαφορικών» συλλογισμών, καταδεικνύει μία λύση βελτίωσης του ακουστικού πεδίου, σε μεγάλους χώρους, χωρίς την χρήση, απορροφητικών μέσων, με ευρεία χρήση του φαινομένου, καθ' όπως φαίνεται, στην οικοδομική των σταυροειδών ναών.*

## The connection between iconography and acoustics in Byzantine temples.

Panagiotis Karampatzakis  
Architect – Acoustic Consultant  
Scientific associate, Laboratory of Acoustics Technology A.U.T.H, Greece  
info@nestos.net, pkar38@arch.auth.gr

### ABSTRACT

*According to the believers, art historians, and those involved with the Divine affairs in general, in the doctrine of the Orthodox faith, iconography plays the role of a bridge between man and the Divine. In other words, it is one of the key factors in uniting believers with their faith.*

*Following the period of the iconoclasm, during the 7th Ecumenical council of 787 AD, the "meaning" of the "icons", was restored, creating the well-known tradition of the iconography of temples. This tradition was extended, with the help of its "historical" and "theological" origins, and dominated, "philosophically" but also spatially in Byzantine temples.*

*Considering the "expansion" and "dominance" of the iconography of the temples during the Byzantine era and taking into account the lack of "active", surfaces, in the interior, due to this "dominance", the recorded parameters of the acoustic field, are expected to be, inevitably, at prohibitive levels under the contemporary view. However, in cruciform temples, this usually is not the case. The present essay, through "differential" reasoning, presents a solution for improving the acoustic field, in large spaces, without the use of absorbent means, with the widespread use of the phenomenon, as it seems, in the properties of cruciform temples.*

## Εισαγωγή

### Ιστορικά

Η Ζ' Οικουμενική Σύνοδος (ή Β' της Νικαίας) της Χριστιανικής Εκκλησίας συγκλήθηκε στις 24 Σεπτεμβρίου 787 στην Νίκαια της Βιθυνίας. Κατά την σύνοδο αυτή, τέθηκαν οι βάσεις για την άρση της απαγόρευσης της λατρείας των θρησκευτικών εικόνων

Πράγματι στις 24 Σεπτεμβρίου 787 στην Νίκαια της Βιθυνίας. Οι 350 επίσκοποι<sup>1</sup> υπό την προεδρία του Πατριάρχη Κωνσταντινουπόλεως Ταράσιου, αποκήρυξαν τις αποφάσεις της εικονομαχικής συνόδου της Ιερείας, που είχε συγκαλέσει το 754 ο αυτοκράτορας Κωνσταντίνος Ε', καταδίκασε τους εικονομάχους πατριάρχες και επισκόπους και αποκατέστησε την τιμή των εικόνων με βάση τη θεολογία του Ιωάννη του Δαμασκηνού. Η σύνοδος όρισε ότι πρέπει να υπάρχουν μέσα στις εκκλησίες οι εικόνες των αγίων, με τη διαφορά ότι οι χριστιανοί δεν πρέπει να τις λατρεύουν, αλλά απλώς να τις προσκυνούν «τιμής ένεκεν», γιατί εικονίζουν πρόσωπα άγια, που έχυσαν το αίμα τους για την πίστη του Χριστού ή έζησαν βίο άξιο μίμησης. Η σύνοδος απέκρουσε έντονα την κατηγορία και την ταύτιση της εικονολατρίας με την ειδωλολατρία. Στην συνέχεια το 813 και το 843, Μετά από «πολιτικές διεργασίες» επικυρώθηκαν η/και ανανεώθηκαν τα πρακτικά της Ζ' οικουμενικής συνόδου [2]

Δεν είναι αντικείμενο της παρούσας μελέτης η λεπτομερής έναρξη και η ιστορική συνέχεια της βυζαντινής εικονογραφίας. Περιληπτικά αναφέρεται ότι η βυζαντινή τέχνη είναι συνέχεια της αρχαίας ζωγραφικής και της τεχνικής των πορτρέτων Φαγιούμ

Η αγιογράφηση των ναών ήταν μόνιμη, εύχρηστη, λιγότερο δαπανηρή από τα ψηφιδωτά – προσιτά μόνο σε υψηλούς κύκλους – γρήγορη σε εκτέλεση, απευθυνόμενη ως μέσο κατήχησης σε όλα τα κοινωνικά στρώματα, θα διαδοθεί σε όλο το γεωγραφικό εύρος της Βυζαντινής αυτοκρατορίας, αλλά και σε όλες τις χώρες θρησκευτικής και πολιτισμικής επιρροής και θα επηρεάσει απόλυτα τα αισθητικά και φιλοσοφικά δεδομένα της βυζαντινής ναοδομίας.

### 1. Ερωτήματα

Κατά την ανάπτυξη της μορφής της ελεύθερης ή της εγγεγραμμένης σταυροειδούς<sup>2</sup> και κυρίως από τον 10<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, η αγιογράφηση του εσωτερικού χώρου του παραπάνω τύπου ναού, ήταν σχεδόν απόλυτη και δημιουργούσε την τελική επιφάνεια των δομικών στοιχείων που ήταν καλυμμένα με σοβά.

<sup>1</sup> Συμπεριλαμβανομένων και 2 απεσταλμένων του Πάπα Αδριανού Α'

<sup>2</sup> Μετά τον 9<sup>ο</sup> αιώνα

Με δεδομένο ότι ήταν θεολογικά και φιλοσοφικά αδιανόητο, να καλυφθούν κάποιες από τις μορφές που απεικονίζονταν, με απορροφητικά μέσα και υλικά<sup>3</sup> γεννάται το ζήτημα, πώς χώροι με όγκο από 800m<sup>3</sup> έως 4000 ή 5000m<sup>3</sup>, κατασκευασμένοι κυρίως από Opus Mixtum, πέτρα, σοβά κλπ, χωρίς την χρήση ηχο – απορροφητικών, διαμόρφωναν την αντήχηση τους, σε επίπεδα αποδεκτά ακόμα και από σύγχρονες οδηγίες όπως το DIN18041<sup>4</sup>, ενώ άλλες μορφές (πχ Βασιλικές κλπ) ακόμα και με χρήση περισσότερων απορροφητικών στοιχείων είναι μακριά από τα προσδοκώμενα. [3]

Από προηγούμενες έρευνες [4] προέκυψαν συμπεράσματα, πώς οι χρόνοι αντήχησης έχουν μεγάλες ή μικρές διαφοροποιήσεις από τον ιδανικό προτεινόμενο χρόνο αντήχησης κατά το DIN18041, το οποίο προτείνει τον βέλτιστο χρόνο αντήχησης για χώρους ανάλογα με την χρήση τους και τον όγκο.

Για την περίπτωση της Αχειροποίητου (Ναός μεγάλου όγκου) οι διαφοροποιήσεις είναι πολύ μεγάλες, ενώ για την περίπτωση της Παναγίας Χαλκίων (Ναός μικρού όγκου) είναι εξαιρετικά μικρές.

Προκειμένου να αναλυθούν βαθύτερα οι χώροι και τα ακουστικά τους αποτελέσματα, σχεδιάστηκαν εικονικά μοντέλα, με τον ίδιο όγκο, αλλά με πολύ διαφορετική πολυπλοκότητα, ο απλός χώρος<sup>5</sup> και ο σύνθετος<sup>6</sup>.

### 1.1 Τρόπος προσέγγισης των ερωτημάτων.

Αρχικά ο χρόνος αντήχησης υπολογίζεται μέσω παράστασης του Sabin.

Σύμφωνα με τον υπολογισμό αυτόν, ο χρόνος αντήχησης ενός χώρου με όγκο Vtot, απορρόφηση υλικών a1, a2,... και επιφάνειες S1, S2,... υπολογίζεται από τον τύπο (1.1)

$$Rt = k \cdot 0,163 \cdot \frac{V_{tot}}{[(a_1 S_1 + a_2 S_2 \dots) + A_{air}]} \quad \text{σε sec} \quad (1.1)$$

Ο συντελεστής k προκύπτει από το σχήμα του χώρου και βελτιώνει την πρόγνωση του υπολογιζόμενου χρόνου αντήχησης ανάλογα με το σχήμα του χώρου. [5]

Γενικά όταν έχει εφαρμογή ο νόμος Sabin (1.1) ισχύει :

$$MFP \approx 4(V_{tot}/S_{tot}) \quad (1.2) [6]$$

Όπου MFP, Μέση απόσταση ανάκλασης (Mean Free Path)

Στην περίπτωση που θα εξεταστεί παρακάτω, θεωρούμε ότι ο χώρος δημιουργείται από ένα υλικό<sup>7</sup> και η παράσταση Sabin μπορεί να γραφτεί

<sup>3</sup> Βέλα, λάβαρα και εν γένει πορώδης ηχο-απορροφητικές επιφάνειες

<sup>4</sup> Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμμόρφωση για την περίπτωση Μουσικής

<sup>5</sup> Simplex model

<sup>6</sup> Complex model

<sup>7</sup> Opus Mixtum αλλά γενικά οποιοδήποτε «σκληρό υλικό»

$$Rt = k \cdot 0,163 \cdot \frac{V_{tot}}{(\alpha \cdot S_{tot} + A_{air})} \quad (1.3)$$

Όπου  $A_{air}$  η απορρόφηση του αέρα<sup>8</sup>

Στην παραπάνω παράσταση, για να επηρεαστεί ο χρόνος αντίχρησης του χώρου, πρέπει, να μεταβληθεί ή/και ο όγκος του χώρου ή/και να μεταβληθεί η συνολική επιφάνεια απορρόφησης ή/και να μεταβληθεί η ηχοαπορροφητική ικανότητα των υλικών.

Πράγματι στην περίπτωση που αυξηθεί ο όγκος του χώρου, ο χρόνος αντίχρησης αυξάνεται ενώ αντίθετα αν αυξηθεί ο συντελεστής ηχοαπορροφησίας του χώρου ή η συνολική επιφάνεια απορρόφησης ο χρόνος αντίχρησης μειώνεται.

Στην περίπτωση της ναοδομίας (γενικά και στις περισσότερες περιπτώσεις) ο όγκος του χώρου είναι δεδομένος. Η κατασκευή δε του χώρου είναι από ομοιογενή υλικά.

Από τον παραπάνω συλλογισμό και από τον τύπο (1.1) είναι φανερό ότι η μόνη λύση για την μεταβολή της αντίχρησης του χώρου εάν οι τιμές του όγκου του χώρου και της ηχώ - απορρόφησης των υλικών παραμένουν σταθερές, είναι η μεταβολή της συνολικής επιφάνειας.

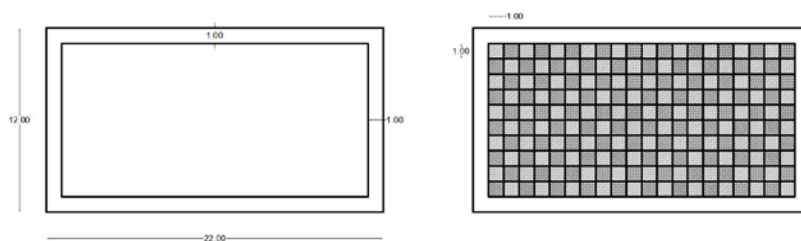
Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, θεωρούμε δεδομένο κατά των 8<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, ότι ήταν θεολογικά και φιλοσοφικά αδιανόητο, να καλυφθούν κάποιες από τις μορφές που απεικονίζονταν, με απορροφητικά μέσα και υλικά<sup>9</sup>.

Παρακάτω θα εξεταστεί η επίδραση της αύξησης της επιφάνειας ενός χώρου αφού κρατούνται σταθερά ο όγκος του χώρου και η απορρόφηση.

## 1.2 Πειραματική διερεύνηση

Έστω ότι ο υπό εξέταση χώρος είναι μεγέθους της τάξης των ~3000m<sup>3</sup>.

Για τις ανάγκες της διερεύνησης σχεδιάστηκαν εικονικοί ορθογώνιοι χώροι με διαστάσεις 22X12X12m όγκου 3168m<sup>3</sup>.

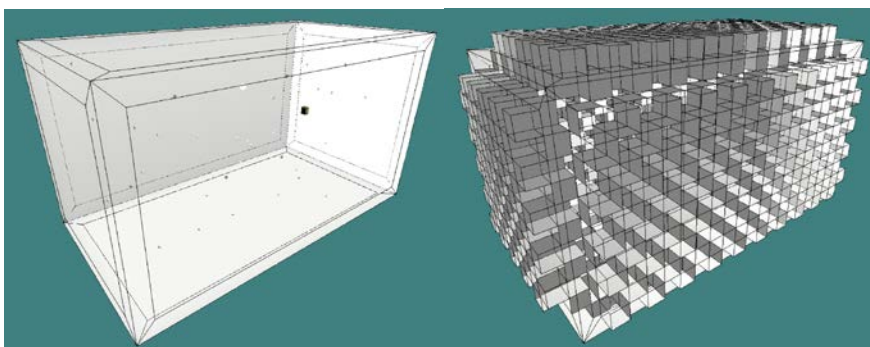


Εικόνα 1.2.1 οι δύο χώροι που σχεδιάστηκαν

<sup>8</sup> Η απορρόφηση του αέρα στην περίπτωση των μοντέλων και των μετρήσεων θεωρούνται ίδιες γιατί οφείλονται σε κανονικές συνθήκες 25°C και RH=45%.

<sup>9</sup> Βέλα, λάβαρα και εν γένει πορώδης ηχο-απορροφητικές επιφάνειες

Ο χώρος αριστερά είναι απολύτως απλός (Shoebox) με παράλληλες τις 6 πλευρές του. Ο χώρος στα δεξιά είναι πολύ πιο σύνθετος με κύβους όγκου  $1\text{m}^3$  να προστίθενται και να αφαιρούνται ώστε ο όγκος να παραμένει ίδιος



Εικόνα 1.2.2 Ο απλός χώρος και Ο πολύπλοκος χώρος

Και οι δύο παραπάνω χώροι έχουν τον ίδιο όγκο  $V_{\text{tot}}=3168\text{m}^3$ . Για την διερεύνηση των παραπάνω χώρων τοποθετήθηκαν 38 δέκτες σε τυχαίες θέσεις μέσα στον χώρο και σε απόσταση από τα όρια αυτού, άνω του 1.5m.

Ως συντελεστές απορρόφησης χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που προέκυψαν, μετά από στατιστική ανάλυση των χώρων της Αχειροποιήτου και της παναγίας Χαλκείων, από τα δεδομένα μετρήσεων του 2008. [7]

Πίνακας 1.2.1 Συντελεστές απορρόφησης που προέκυψαν από μετρήσεις σε ναούς της Θεσσαλονίκης. Στατιστικός υπολογισμός ηχοαπορρόφησης σε %

Συχνότητα σε Hz	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Αχειροποιήτος</b>	16	15	13	14	17	16
<b>Χαλκείων</b>	10	9	9	11	10	11
<b>Average</b>	13	12	11	13	14	14

Γενικά για το συγκεκριμένο πείραμα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν χαμηλοί συντελεστές απορρόφησης εξ αιτίας των «σκληρών» απορροφητικών υλικών δόμησης. Οι συγκεκριμένοι αποτελούν έναν μέσο όρο του τρόπου δόμησης opus mixtum. Οι συντελεστές την Αχειροποιήτου είναι υψηλότεροι εξ αιτίας παρουσίας επιπρόσθετων απορροφητικών μέσων.

Η διερεύνηση των παραπάνω χώρων έγινε με το λογισμικό CATT 9.0/TUCT V1.1. Το μεν απλό μοντέλο είναι σχεδιασμένο από 30 συνολικά επιφάνειες και η διερεύνηση έγινε με  $50000\text{rays/oct}$  με τον αλγόριθμο 1.1. Το σύνθετο μοντέλο είναι σχεδιασμένο με 5024 επιφάνειες και η διερεύνηση έγινε με  $50000\text{rays/oct}^{10}$  με τον αλγόριθμο 1.1.

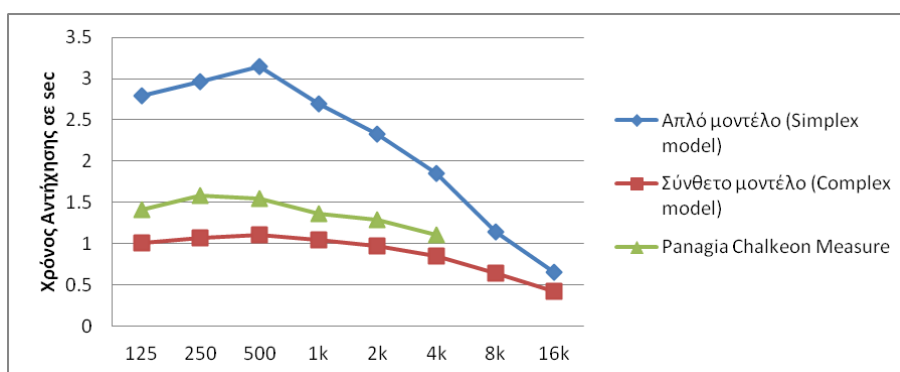
<sup>10</sup> Ο αλγόριθμος υπολογισμού των απαραίτητων rays/oct TUCT για μοντέλο 5000faces, πρότεινε  $14500\text{rays/oct}$

### 1.3 Αποτελέσματα της διερεύνησης

Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:  
Για τον χρόνο αντήχησης:

Ο χρόνος αντήχησης που υπολογίζεται για τα δύο μοντέλα περιγράφεται στο παρακάτω γράφημα:

Γράφημα 1.2.1 Χρόνοι αντήχησης των μοντέλων



Ανάμεσα στις δύο καμπύλες των μοντέλων (με πράσινο χρώμα) φαίνεται ο χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε σε πραγματικό χώρο (Παναγία Χαλκείων, 2008) για λόγους σύγκρισης.

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι ενώ όλες οι παράμετροι (εκτός της συνολικής επιφάνειας  $S_{tot}$ ) παραμένουν σταθερές, στην μετάβαση από το απλό στο σύνθετο μοντέλο, ο χρόνος αντήχησης μειώνεται δραματικά.

Ταυτόχρονα από τα ακουστικά μοντέλα προκύπτουν τα εξής:

Ο λόγος  $V_{tot}/S_{tot}$  μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, από το απλό μοντέλο, στο σύνθετο.

Πίνακας 1.2.1 Λόγος  $V_{tot}/S_{tot}$

	$V_{tot}$ σε $m^3$	$S_{tot}$ σε $m^2$	$V_{tot}/S_{tot}$	Mean RT (125-4K Hz) σε sec
<b>Simplex model</b>	3168	1344	2.36	2.63
<b>Complex model</b>	3168	5344	0.59	1.01

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται, ότι η μείωση του λόγου  $V_{tot}/S_{tot}$  έχει ως συνέπεια την μείωση του χρόνου αντήχησης του χώρου.

Μετατρέποντας τον λόγο  $V_{tot}/S_{tot}$  σε κάτι πιο αντιληπτό, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι σε χώρους με τις ίδιες ακουστικές παραμέτρους χαμηλότερη αντήχηση,

έχει αυτός ο οποίος είναι πιο πολύπλοκος γεωμετρικά. Πράγματι, μεταξύ δύο χώρων κατασκευασμένων με τα ίδια υλικά και τον ίδιο όγκο, χαμηλότερη αντήχηση έχει αυτός που έχει περισσότερες επιφάνειες, αυτός δηλαδή που έχει χαμηλότερο τοπ λόγο  $V_{tot}/S_{tot}$ .

Επιπροσθέτως θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι τιμές της μέσης ανακλώμενης απόστασης MFP διαμορφώνονται για το μεν απλό μοντέλο (Simplex) σε  $MFP_S=9.43m$  και για το σύνθετο (Complex) σε  $MFP_C=2.37m$ . Με άλλα λόγια, όσο μικρότερο είναι το MFP τόσο χαμηλότερος είναι ο χρόνος αντήχησης.

## 2. Συμπεράσματα

Μετά τον 8<sup>ο</sup> αιώνα αποκαταστάθηκε η χρήση των εικόνων για λατρευτικούς σκοπούς και έγινε ευρεία χρήση τοιχογραφιών για την «Ιστορία» των ναών, διότι η εφαρμογή τους, ευνοούσε την «Διακοσμητική» των Ναών, για «φιλοσοφικούς» και «οικονομοτεχνικούς» λόγους.

Ήδη πριν την περίοδο της εικονομαχίας, είχε ξεκινήσει η κάλυψη σχεδόν όλης της εσωτερικής επιφάνειας των ναών με ψηφιδωτά ή άλλα μέσα, αλλά μετά τον 8<sup>ο</sup> αιώνα, η τεχνική αυτή εξαπλώθηκε σημαντικά.

Στους ναούς στους οποίους υπάρχει εκτεταμένη ιστορία, έχουν απολεσθεί και μάλιστα ανελαστικά, οι όποιες επιφάνειες θα μπορούσαν να φέρουν μέσα ακουστικής βελτίωσης<sup>11</sup>. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στους σταυροειδείς ναούς

Τα ζητήματα ακουστικής που είχαν προκύψει, κατά την λειτουργία των Βασιλικών, μειώθηκαν εν μέρει με την μετάβαση σε μικρότερους ναούς (Αρχή Αγ. Σοφία Θεσσαλονίκης) και την επικράτηση των σταυροειδών ναών.

Παρά την βελτίωση του χρόνου αντήχησης, οι χώροι των ναών, εξακολουθούσαν να κατέχουν τόσο όγκο<sup>12</sup> ώστε ακόμα να χρειάζονται «ειδική θεραπεία» ώστε να γίνουν ακουστικά «αποδεκτοί»<sup>13</sup>

Από τους συλλογισμούς των προηγούμενων κεφαλαίων, είναι φανερό ότι η μόνη λειτουργική επέμβαση που θα μπορούσε να γίνει προκειμένου να βελτιωθεί ο χρόνος αντήχησης των χώρων, είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας των χώρων, δηλαδή η μείωση του λόγου  $V_{tot}/S_{tot}$  δηλαδή η γενναία αύξηση του  $S_{tot}$ <sup>14</sup> ή η μείωση του MFP.

Από την κατασκευή της Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης και μετά (που θεωρείτε μεταβατικός – πειραματικός τύπος) η «ιστορία» κυριαρχεί αλλά και ταυτόχρονα παρατηρείται μία συνειδητή αύξηση της πολυπλοκότητας των σταυροειδών ναών.

Με την διαδικασία της «πολυπλοκο-ποίησης» δηλαδή μείωση του  $V_{tot}/S_{tot}$  δηλαδή αύξηση των ενεργών επιφανιών, ακόμα και όταν το υλικό της επιφάνειας αυτής είναι «φτωχό» απορροφητικά.

<sup>11</sup> Του χρόνου αντήχησης

<sup>12</sup> από 800m<sup>3</sup> έως και 5000m<sup>3</sup>

<sup>13</sup> Για χώρο ~700m<sup>3</sup> με μορφή shoebox και σκληρά υλικά, υπολογίζεται  $RT=3.2sec$  στα 500Hz

<sup>14</sup> Με δεδομένο ότι ο  $V_{tot}$  δεν αλλάζει



Συνεπώς από το  $V_{tot}/S_{tot}=2.51m$  της Αχειροποίητου με χρόνο αντήχησης 3.75sec (500Hz) και απόκλιση από την πρόταση του DIN18041 61% περάσαμε στην Αγία Σοφία Θεσσαλονίκης με  $V_{tot}/S_{tot}= 1.91m$  με χρόνο αντήχησης 2.69sec (500Hz) και απόκλιση από την πρόταση του DIN18041 26% προκύπτει η Παναγία Χαλκείων με  $V_{tot}/S_{tot} = 0.94m$  και χρόνο αντήχησης 1.55sec (500Hz) και απόκλιση από την πρόταση του DIN18041 3%

Θα μπορούσαμε να πούμε πως ενδεχομένως ή «εμμονή» της Βυζαντινής Ναοδομίας στην «Ιστορία» των ναών και η αυστηρή τήρηση των κανόνων, δημιούργησε ένα ακουστικό πρόβλημα του οποίου η λύση ήταν μονόδρομος και ενδεχομένως, συνειδητά, να οδήγησε στην πολυπλοκότερη μορφή των σταυροειδών ναών του 10<sup>ου</sup> και μετά αιώνα.

### 3. Αναφορές

[1] "Οικουμενικά Σύνοδοι", *Θρησκευτική και Ηθική Εγκυκλοπαίδεια* (ΘΗΕ), τόμ. 9, εκδ. Μαρτίνοσ Αθ., Αθήνα 1966, στ. 690.

[2] <https://www.sansimera.gr/articles/1170>

[3] Παναγιώτης Καραμπατζάκης, Παρατηρήσεις πάνω στην εξέλιξη της ακουστικής των χριστιανικών λατρευτικών κτισμάτων της Θεσσαλονίκης. Από τους Παλαιοχριστιανικούς, έως τους ναούς του 14ο αιώνα. Συνέδριο ΕΛΙΝΑ Θεσσαλονίκη 2014.

[4] Julius O. Smith III, `Physical Audio Signal Processing, W3K Publishing, 2010,

[5] Lothar Cremer, Helmut A Muller, Theodore J Schultz, Principles and Applications of Room Acoustics, Volume 2, Applied Science Publishers,Ltd., Barkiny, Essex, England,1982

[6] Όμοια με την [3]

[7] Π. Καραμπατζάκης, Ακουστικές μετρήσεις σε 11 βυζαντινούς ναούς της Θεσσαλονίκης. Συνέδριο ΕΛΙΝΑ, Ξάνθη 2008.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ εκ βαθέων τον πιο ανεξάντλητο «διδάσκαλο» που είχα στην πορεία μου κ.κ. Γουεφρίδο Σούμπερτ κυρίως γιατί όταν διορθώνει τις εργασίες μου, ανεβαίνουν οι παλμοί μου.

Στην Αθανασία, στη Σοφία και στο Νίκο.

## **Οι ατμόσφαιρες στον ήχο των οπτικοακουστικών αφηγήσεων**

Χρήστος Γούσιος      Λάζαρος Βρύσης  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Ένα από τα κύρια συστατικά του κινηματογραφικού ήχου, είναι οι ατμόσφαιρες. Είναι οι ήχοι που χαρακτηρίζονται από συνέχεια και επιτρέπουν την συνύπαρξη όλων των άλλων ήχων που συνθέτουν το σύνολο του κινηματογραφικού ήχου (διάλογοι, εφέ, μουσική). Αποτελούν απαραίτητα εργαλεία της ηχητικής σύνθεσης. Στη συγκεκριμένη εργασία διακρίνονται οι χρήσεις των ατμοσφαιρών και δίνονται παραδείγματα της ατμόσφαιρας-εργαλείου και της ατμόσφαιρας-αφήγησης. Διερευνάται και υπογραμμίζεται η αναγκαιότητα της χρήση αυτής της κατηγορίας των ήχων μέσα από την παρουσίαση παραδειγμάτων, που τεκμηριώνουν τη θεωρητική προσέγγιση. Επίσης γίνεται προσπάθεια παρουσίασης της πολυπλοκότητας των ατμοσφαιρών, αλλά και της συνολικής αλληλοεπικάλυψης των ήχων, κατά τη διαδικασία του ηχητικού σχεδιασμού. Παρουσιάζονται οι τρεις κύριοι τρόποι που μπορούν να επιτρέψουν τη συνύπαρξη διαφορετικών επιπέδων ήχου στην τελική μίξη: αυξομείωση της στάθμης, παράλλαξη του συχνοτικού περιεχομένου, τοποθέτηση στον στερεοφωνικό, αλλά και τον περιφερειακό χώρο. Παρουσιάζεται παράδειγμα από απόσπασμα σειράς, όπου συνδυάζονται όλα τα παραπάνω: το αφηγηματικό με το πρακτικό σκέλος των ατμοσφαιρών και οι τρόποι συνύπαρξής τους στο περιφερειακό ηχοσύστημα (surround sound system)*

***Δυναμικά μεταβαλλόμενη μείξη για την ενίσχυση της  
ακουστικής αντίληψης σε περιβάλλοντα Ακουστικώς  
Επαυξημένης Πραγματικότητας***

Νικόλαος Μουστάκας  
Ε.Τ.Ε.Π.  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο  
nmoustakas@ionio.gr

Ανδρέας Φλώρος  
Καθηγητής  
Τμήμα Τεχνών Ήχου  
και Εικόνας,  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο  
floros@ionio.gr

Εμμανουήλ Ροβίθης  
Ε.ΔΙ.Π.  
Τμήμα Τεχνών Ήχου  
και Εικόνας,  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο  
emrovithis@ionio.gr

Κωνσταντίνος Βόγκλης  
Επικ. Καθηγητής  
Τμήμα Τουρισμού  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο  
voglis@ionio.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η Ακουστικώς Επαυξημένη Πραγματικότητα, αποτελεί ένα πεδίο έρευνας και ανάπτυξης με συνεχή εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, ένα σημαντικό πρόβλημα που συναντάται, είναι ο στατικός τρόπος μείξης του εικονικού με το πραγματικό ακουστικό περιβάλλον. Το πρόβλημα έγκειται στη συνεχή μεταβολή του πραγματικού ακουστικού περιβάλλοντος το οποίο δημιουργεί την ανάγκη είτε για επανακαθορισμό της στάθμης από τον ακροατή, είτε για δυναμική μεταβολή του εικονικού περιβάλλοντος, ώστε να προσαρμόζεται στο πραγματικό. Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος, υλοποιήθηκε ένα πρωτότυπο μοντέλο δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης το οποίο στοχεύει στην ακουστική προσαρμογή του εικονικού περιβάλλοντος στο πραγματικό με τη χρήση κανόνων που βασίζονται στην εξόρυξη χαρακτηριστικών ακουστότητας σύμφωνα με ένα πρωτότυπο μοντέλο υπολογισμού αμφιωτικής ακουστότητας σε λειτουργία πραγματικού χρόνου. Τα θετικά αποτελέσματα από τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου έναντι του παραδοσιακού μοντέλου μείξης μέσα σε ένα ηχητικό παιχνίδι επαυξημένης πραγματικότητας σε περιβάλλον εργαστηρίου, επιβεβαιώνουν την βελτίωση της ακουστικής αντίληψης του ακροατή.*

***Dynamically Variable Mixing to Enhance Auditory  
Perception in Audio Augmented Reality Environments***

**ABSTRACT**

*Augmented Reality Audio is a field of research and development with continuous development in recent years. However, a major problem encountered is the static way of mixing the virtual with the real acoustic environment. The problem lies in the constant change of the real acoustic environment which creates the need either for the listener to redefine the level, or for a dynamic change of the virtual environment to adapt to the real one. To address such a problem, a prototype dynamically changing mixing model was implemented which aims to acoustically adapt the*

*virtual environment to the real one by using rules based on the extraction of loudness features according to a prototype model for calculating binaural loudness in real-time mode. The positive results from the use of the proposed model against the legacy mixing model in an augmented reality audio game in a laboratory environment, confirm the improvement of the listener's auditory perception.*

## **Εισαγωγή**

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα Ήχου (Augmented Reality Audio – ARA) αποτελεί έναν συνεχώς αναπτυσσόμενο τομέα έρευνας και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν αρκετές έρευνες που εστιάζουν στον τρόπο χρήσης της τεχνολογίας ARA σε σενάρια διάφορων θεματικών όπως είναι η τηλεπαρουσία [1], η πλοήγηση σε μουσεία [2], ηχητικά παιχνίδια [3] αλλά και σε τεχνικά θέματα όπως είναι το ζήτημα της αναπαραγωγής του πραγματικού ακουστικού περιβάλλοντος και η χρήση του κατάλληλου ακουστικού εξοπλισμού [4].

Ωστόσο, εκτός από τα παραπάνω, ένα αναπόσπαστο κομμάτι του πλαισίου της Επαυξημένης Πραγματικότητας Ήχου, αποτελεί η μείξη του πραγματικού περιβάλλοντος με το αντίστοιχο τρισδιάστατο εικονικό ηχητικό χώρο. Στόχος της μείξης, είναι η ανάμειξη του πραγματικού ακουστικού περιβάλλοντος με το εικονικό περιβάλλον, βασιζόμενη σε χωρικές και χρονικές παραμέτρους. Στο παραδοσιακό μοντέλο μείξης [7], η μείξη παραμένει στατική, χωρίς να μεταβάλλεται και να λαμβάνει υπόψιν ακουστικά φαινόμενα όπως είναι το ηχητικό μασκάρισμα μεταξύ των ακουστικών περιβαλλόντων. Οι συνεχείς ηχητικές μεταβολές των περιβαλλόντων σε συνδυασμό με την στατικότητα της μείξης, μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στην κατανόηση του εκάστοτε σεναρίου από τον ακροατή. Οι λύσεις φαίνεται να είναι δύο, είτε ο επανακαθορισμός στις στάθμες του ήχου από τον ακροατή, είτε η μεταβολή της μείξης με δυναμικό τρόπο.

Η κύρια συνεισφορά της παρούσας εργασίας, είναι η παρουσίαση για πρώτη φορά ενός ολοκληρωμένου πλαισίου μείξης για ηχητικά επαυξημένα περιβάλλοντα με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής αντίληψης του ακροατή σε πολυσύνθετα ηχητικά σενάρια επαυξημένης πραγματικότητας. Για να επιτευχθεί αυτό, υλοποιήθηκε ένα μοντέλο δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης η οποία τροφοδοτείται με δεδομένα ακουστικής αντίληψης που προέρχονται από έναν μηχανισμό πρόβλεψης αμφιωτικής ακουστότητας. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε περιβάλλον εργαστηρίου ποιοτικά και ποσοτικά, και συγκρίθηκε με το παραδοσιακό μοντέλο ARA μείξης. Παράλληλα έγινε δοκιμή και σε περιβάλλον ηχητικού παιχνιδιού τύπου ARA η οποία φαίνεται μέσω ποσοτικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με την παραδοσιακή μείξη, να επαληθεύει την βελτίωση της ακουστικής αντίληψης του ακροατή.

## **1. Προτεινόμενη μέθοδος δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης**

### *1.1 Αρχιτεκτονική Μοντέλου*

Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου μοντέλου δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης, περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά, το μοντέλο δέχεται ως είσοδο το

αμφιωτικό ηχητικό σήμα του πραγματικού περιβάλλοντος και το ηχητικό σήμα της εικονικής πηγής ήχου. Στο αμφιωτικό σήμα του πραγματικού περιβάλλοντος, εφαρμόζεται κατάλληλο φιλτράρισμα με το οποίο εξασθενεί η επίδραση του ακουστικού το οποίο φράζει τον ακουστικό πόρο και μεταβάλλει την ακουστική του [5]. Όλα τα σήματα βαθμονομούνται πριν αναλυθούν, και εφαρμόζονται σε αυτά οι κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν ληφθεί στο πραγματικό περιβάλλον [6].

Για την εξόρυξη των χαρακτηριστικών ακουστότητας των σημάτων εισόδου, αναπτύχθηκε μια τεχνική η οποία σε πραγματικό χρόνο προβλέπει την αμφιωτική ακουστότητά τους. Το πρώτο στάδιο αυτής της μεθόδου, είναι η ανάλυση του ηχητικού σήματος με τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT). Ακολούθως, γίνεται ο υπολογισμός της ενέργειας διέγερσης του ακουστικού πόρου. Για το συγκεκριμένο στάδιο, επιλέχθηκαν επτά κρίσιμες ζώνες σε κλίμακα οκτάβας με κεντρικές συχνότητες τα 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, 16kHz. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής ενέργειας για τις προκαθορισμένες ακουστικές ζώνες φασματικής ανάλυσης για το εκάστοτε περιβάλλον, αποτελεί την ακουστική διέγερση της κάθε ζώνης. Ο συνδυασμός των ακουστικών διεγέρσεων κάθε ακουστικής ζώνης, συνθέτει τον πίνακα ακουστικής διέγερσης, ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί την καμπύλη ακουστικής διέγερσης, του εκάστοτε σήματος εισόδου.

Για την εκτίμηση της ακουστότητας, γίνεται χρήση μιας μήτρας προϋπολογισμένων τιμών αμφιωτικής ακουστότητας καθαρών τόνων με την οποία πραγματοποιείται η συσχέτιση συσχέτιση τριών μεγεθών: Συχνότητας (Hz), Στάθμης Ακουστικής Πίεσης (dB SPL), Αμφιωτικής Ακουστότητας (Phon). Για την δημιουργία της μήτρας, έχει προηγηθεί η δημιουργία καθαρών τόνων με συχνότητες σύμφωνα με τις επτά κρίσιμες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στην τεχνική υπολογισμού της ενέργειας της ακουστικής διέγερσης, με εναλλαγές στάθμης της τάξεων του 1dB SPL. Ακολούθως, για όλους τους τόνους, έχει γίνει ο υπολογισμός της αμφιωτικής ακουστότητας με την χρήση του μοντέλου πρόβλεψης αμφιωτικής ακουστότητας Glasberg & Moore (GM) [8,9]. Ο αλγόριθμος πρόβλεψης της αμφιωτικής ακουστότητας, δέχεται ως είσοδο τον πίνακα διέγερσης του εκάστοτε σήματος εισόδου, και με βάση την μήτρα προϋπολογισμένων τιμών αμφιωτικής ακουστότητας, εξάγει τον πίνακα αμφιωτικής ακουστότητας για τις επτά κρίσιμες ζώνες συχνότητων.

Η μέθοδος ανάλυσης του εικονικού ηχητικού σήματος στο πεδίο του χρόνου, γίνεται με τη χρήση ψηφιακών φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR). Τα παραπάνω φίλτρα αποτελούν την τράπεζα φίλτρων ανάλυσης-σύνθεσης. Το μέγεθος των φίλτρων δεν είναι ομοιόμορφο καθώς ακολουθείται η ακουστική κλίμακα οκτάβας για τον καταμερισμό των φίλτρων και υπάρχει επικάλυψη μεταξύ τους σε ποσοστό 50%. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου ζωνοπερατού, χαμηλοδιαβατού και υψηλοπερατού. Το χαμηλοπερατό φίλτρο χρησιμοποιείται για τη ζώνη φίλτρου με κεντρική συχνότητα 250 Hz, τα ζωνοπερατά φίλτρα για τις ενδιάμεσες ζώνες με κεντρικές συχνότητες από 500 Hz μέχρι 8 kHz και το υψηλοπερατό φίλτρο στη ζώνη φίλτρου με κεντρική συχνότητα τα 16 kHz.

Ο αλγόριθμος προσαρμογής λαμβάνει ως είσοδο τον πίνακα αμφιωτικής ακουστότητας του ψευδοακουστικού περιβάλλοντος και του εικονικού αντίστοιχα. Έπειτα, αναλαμβάνει να υπολογίσει την διαφορά της αμφιωτικής ακουστότητας μεταξύ των δύο περιβαλλόντων και ακολούθως να την εκφράσει ως συντελεστή

ρύθμισης της ενέργειας για κάθε συχνοτική ζώνη του εικονικού σήματος. Οι επτά συντελεστές που εξάγονται, εφαρμόζονται στο αντίστοιχο αναλυμένο σήμα της εικονικής πηγής από την τράπεζα φίλτρων ανάλυσης, και το σήμα επανασυνθέεται με την χρήση της τράπεζας φίλτρων σύνθεσης. Το τελικό παραγόμενο ηχητικό σήμα του εικονικού περιβάλλοντος, αναμιγνύεται με το ηχητικό σήμα του πραγματικού ακουστικού περιβάλλοντος.

### *1.2 Υλοποίηση Μοντέλου*

Το μοντέλο δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης, υλοποιήθηκε σε περιβάλλον εργαστηρίου. Για την αμφιωτική αναπαραγωγή του πραγματικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος ακουστικών με ενσωματωμένα μικρόφωνα τύπου Philips SHN2500 και μια εξωτερική μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας ήχου χαμηλής καθυστέρησης τύπου Analog Devices ADAU 1761, με την οποία υλοποιείται το φιλτράρισμα του σήματος εισόδου του πραγματικού περιβάλλοντος [5] καθώς και έναν προενισχυτή μικροφώνων.

Η υλοποίηση του μοντέλου για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο, πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παραθυροποίησης για την επεξεργασία των ηχητικών ροών. Το μέγεθος του παραθύρου καθορίστηκε στα 1024 δείγματα και ο ρυθμός δειγματοληψίας στα 48kHz. Το συγκεκριμένο μέγεθος παραθύρου επιλέχθηκε κατόπιν εμπειρικών δοκιμών, με τις οποίες φάνηκε να είναι επαρκές για την ανάλυση των ηχητικών ροών σύμφωνα με τις προεπιλεγμένες ζώνες συχνοτήτων επεξεργασίας.

## **2. Αξιολόγηση Μοντέλου**

### *2.1 Αντικειμενική αξιολόγηση Πρωτότυπου μοντέλου Πρόβλεψης Αμφιωτικής Ακουστότητας*

Για το προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης ακουστότητας, πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μετρήσεις με το μοντέλο GM. Η μεθοδολογία των μετρήσεων που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω. Για την μέτρηση του πρωτότυπου μοντέλου το οποίο έχει την ονομασία AR-ION, το ηχητικό δείγμα διέρχεται από το φίλτρο ακουστικού καναλιού, γίνεται η βαθμονόμηση του, ακολούθως υπολογίζεται η καμπύλη διέγερσης και γίνεται η εκτίμηση της ακουστότητας σε επτά προκαθορισμένες ζώνες (250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, 16kHz). Για την μέτρηση του μοντέλου GM, το ηχητικό δείγμα εισάγεται στο μοντέλο όπου πραγματοποιείται βαθμονόμησης του. Ακολούθως το σήμα αναλύεται μέσω μιας τράπεζας φίλτρων σε επτά συχνοτικές ζώνες και στη συνέχεια υπολογίζεται η ακουστότητα με το μοντέλο GM για κάθε μία ζώνη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις ήχων (Κίνηση πόλης, ψηφιακός ήχος Roboscream, Ομιλία, Βιομηχανία) παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1. Για την σύγκριση των μετρήσεων, έγινε ο υπολογισμός της συσχέτισής τους εμφανίζοντας υψηλά ποσοστά συσχέτισης μεταξύ των δύο μοντέλων από 87% μέχρι και 97%.

Πίνακας 1.1 Συγκριτικός Πίνακας Σύσχέτισης μοντέλων AR-ION και GM

	Κίνηση Πόλης 69 dB SPL			Roboscream 59 dB SPL			Ομιλία 70 dB SPL			Βιομηχανία 70 dB SPL		
	Διέγερση	AR-ION	GM	Διέγερση	AR-ION	GM	Διέγερση	AR-ION	GM	Διέγερση	AR-ION	GM
	dB SPL	Phons	Phons	dB SPL	Phons	Phons	dB SPL	Phons	Phons	dB SPL	Phons	Phons
250 Hz	56	50	60	43	36	52	46	66	36	29	60	
500 Hz	55	54	51	49	48	58	61	60	63	48	47	76
1 kHz	48	50	44	34	35	48	44	46	49	35	36	69
2 kHz	40	45	55	26	31	50	34	39	57	33	38	67
4 kHz	25	35	50	22	32	52	25	35	53	21	31	65
8 kHz	19	10	35	10	2	31	17	8	35	18	9	50
16 kHz	14	1	25	2	1	25	19	1	18	27	1	32
Συσχέτιση			87%			97%			91%			97%

## 2.2 Αντικειμενική Αξιολόγηση Δυναμικά Μεταβαλλόμενης Μείξης

Η αξιολόγηση του δυναμικού μοντέλου μείξης, πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον εξομοίωσης. Η αναπαραγωγή του πραγματικού περιβάλλοντος, γίνεται μέσα από την χρήση δύο ηχείων (Genelec 8040B) τα οποία είναι τοποθετημένα αριστερά και δεξιά από τον ακροατή σε απόσταση 1 μέτρου από τον ίδιο, έχοντας 2 μέτρα απόσταση μεταξύ τους. Η βαθμονόμηση του πραγματικού περιβάλλοντος έγινε με την χρήση ηχώμετρου στην θέση του κεφαλιού του υποκειμένου σύμφωνα με το οποίο καθορίστηκαν οι στάθμες του πραγματικού περιβάλλοντος.

Για την αντικειμενική αξιολόγηση, χρησιμοποιήθηκε ο ήχος βιομηχανίας ως το πραγματικό ακουστικό περιβάλλον, και ο συνθετικός ήχος τύπου «Roboscream» μικρής διάρκειας σε επανάληψη, ως την πηγή ήχου του εικονικού περιβάλλοντος. Για τους συγκεκριμένους ήχους, έγινε ο υπολογισμός της στάθμης σε dB SPL, καθώς και ο υπολογισμός της αμφιωτικής ακουστότητας με την χρήση του μοντέλου GM για αριθμό δειγμάτων ίσο με το παράθυρο επεξεργασίας (1024 δείγματα) του προτεινόμενου μοντέλου, για τις ίδιες χρονικές στιγμές. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων έδειξε πως όταν η αμφιωτική ακουστότητα του πραγματικού περιβάλλοντος ήταν 93 Phons και του εικονικού στα 80 Phons, το προσαρμοσμένο εικονικό περιβάλλον από την δυναμικά μεταβαλλόμενη μείξη, έφτανε στα 88 Phons. Κατά συνέπεια φαίνεται πως το προτεινόμενο μοντέλο προσπαθεί να μειώσει την ακουστική διαφορά μεταξύ του εικονικού με το πραγματικό περιβάλλον.

## 2.3 Υποκειμενική Αξιολόγηση

Η υποκειμενική αξιολόγηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον μέσα από την δημιουργία ενός ηλεκτρονικού ερωτηματολογίου. Το υποκείμενο συμπλήρωνε αρχικά κάποια δημογραφικά και τεχνογραφικά στοιχεία και κατόπιν εκτελούσε ένα σύνολο τριών ψυχοακουστικών τεστ για να γίνει η διάκρισή του σε κατηγορίες εμπειρίας (αφελής, αρχάριος, έμπειρος, ειδικός).

Στη διαδικασία πήραν μέρος συνολικά 78 υποκείμενα. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν διακριτές κατηγορίες υποκειμένων με βάση

συγκεκριμένα κριτήρια. Η πρώτη κατηγορία, αποτελεί το γενικό σύνολο των υποκειμένων όπου συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία χωρίς κάποια εξαίρεση. Ο συνολικός αριθμός σε αυτή την κατηγορία είναι τα 78 υποκείμενα. Η δεύτερη κατηγορία, δημιουργείται έχοντας κριτήριο το τεστ ακουστικής διάκρισης του υποκειμένου και τις σωστές απαντήσεις που έδωσε. Σε αυτή την κατηγορία, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, 3 υποκείμενα δεν απάντησαν σωστά σε καμία ερώτηση του τεστ διάκρισης εμπειρίας και κατατάσσονται στην κατηγορία των «Αφελών», 27 άτομα απάντησαν σωστά σε ένα από τα τρία τεστ διάκρισης και κατηγοριοποιούνται ως «Αρχάριοι», 26 υποκείμενα είχαν δύο σωστές απαντήσεις στο τεστ ακουστικής διάκρισης και ορίζονται ως «Εμπειροί» και τέλος στην κατηγορία «Ειδικοί», κατηγοριοποιήθηκαν 22 άτομα με σωστές το σύνολο των απαντήσεων του τεστ διάκρισης.

Στην περίπτωση του ηχητικού παιχνιδιού τύπου ARA, ο ακροατής αντιμετώπιζε ένα αόρατο ηχητικό ον το οποίο ακολουθούσε μια συγκεκριμένη τροχιά στον τρισδιάστατο εικονικό ακουστικό χώρο. Ως πραγματικός ακουστικός χώρος, είχε επιλεγεί ο ήχος από έναν δρόμο πόλης σε ώρα αιχμής, και αναπαράγονταν από τα ηχεία που ήταν τοποθετημένα ομοίως με την αντικειμενική αξιολόγηση όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.2. Με την χρήση ενός χειριστηρίου που απεικονιζόταν στην οθόνη του υπολογιστή, μετακινούσε μια εικονική σκανδάλη, και πυροβολούσε. Στην περίπτωση που επιτύγχανε ή αποτύγχανε να εξουδετερώσει το αόρατο ον, ακουγόταν η αντίστοιχη ηχητική ανάδραση. Το παιχνίδι ολοκληρωνόταν μέσα σε χρονικό διάστημα 100 δευτερολέπτων, και δεν είχε προηγηθεί εκπαίδευση. Ο κάθε παίκτης, έπαιξε ένα ηχητικό παιχνίδι με παραδοσιακή μείξη και ένα με δυναμικά μεταβαλλόμενη, με τυχαία σειρά.

*Πίνακας 1.2 Αποτελέσματα Παιχνιδιού - Επιτυχία Βολών και Ποσοστιαία Διαφορά για κατηγορίες Εμπειρίας*

Ηχητικό Παιχνίδι τύπου ARA	Γενικό Σύνολο		Αρχάριοι		Εμπειροί		Ειδικοί	
	Επιτυχία Βολών (Μ.Τ.)	Διαφορά	Επιτυχία Βολών (Μ.Τ.)	Διαφορά	Επιτυχία Βολών (Μ.Τ.)	Διαφορά	Επιτυχία Βολών (Μ.Τ.)	Διαφορά
Παιχνίδι χωρίς Προσαρμογή	8.68 %	+41%	5.22%	+49%	10.28%	+29%	11.86%	+38%
Παιχνίδι με Προσαρμογή	14.59 %		10.33%		14.52%		19.05%	

*Πίνακας 1.3 Αποτελέσματα t-Tests - Επιτυχία Βολών και Ποσοστιαία Διαφορά για κατηγορίες Εμπειρίας*

Ηχητικό Παιχνίδι	Γενικός Μ.Ο.		Αρχάριοι		Εμπειροί		Ειδικοί	
	Μ.Τ.	$p < .05$	Μ.Τ.	$p < .05$	Μ.Τ.	$p < .05$	Μ.Τ.	$p < .05$
Χωρίς Προσ/γή	8.68 %		5.22 %		10.28 %		11.86 %	
Με Προσ/γή	14.59 %	0.003	10.33 %	0.01	14.52 %	0.12	19.05 %	0.03

Τα αποτελέσματα του παιχνιδιού (βλπ Πίνακα 1.2) δείχνουν μια βελτίωση των επιτυχημένων βολών οι οποίες υπολογίζονται ως το ποσοστό επιτυχημένων βολών σε σχέση με το συνολικό αριθμό βολών που επιχειρήσε ο παίκτης για το κάθε παιχνίδι (με προσαρμοσμένη μείξη και με παραδοσιακή μείξη). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον πίνακα 1.2, το γενικό σύνολο παρουσιάζει μια βελτίωση 41% για την δυναμικά μεταβαλλόμενη μείξη. Αντίστοιχα, στις υποκατηγορίες σύμφωνα με την ταξινόμηση των παικτών με βάση το τεστ διάκρισης εμπειρίας, οι αρχάριοι



παρουσιάζουν μια σημαντική αύξηση σε ποσοστό 49% και ακολουθούν οι ειδικοί με 38% και οι έμπειροι με 29%. Στον πίνακα 1.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων με την χρήση t-Test τα οποία δείχνουν τη στατιστική σημαντικότητα ( $p < 0.05$ ) του θετικού αποτελέσματος ως προς την επιτυχία των βολών για την προσαρμοσμένη μείξη. Στην μόνη κατηγορία που παρατηρείτε μη στατιστική σημαντικότητα του θετικού αποτελέσματος, αποτελεί η κατηγορία των έμπειρων, γεγονός που χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση.

### 3. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία, παρουσίασε το πρωτότυπο μοντέλο δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης για περιβάλλοντα επανυξημένης πραγματικότητας Ήχου. Για το συγκεκριμένο μοντέλο, αναπτύχθηκε μια μέθοδος πρόβλεψης αμφιωτικής ακουστότητας σε λειτουργία πραγματικού χρόνου, και αξιολογήθηκε με συγκριτικά τεστ συσχέτισης με το μοντέλο εκτίμησης αμφιωτικής ακουστότητας του Glasberg & Moore.

Για την αντικειμενική αξιολόγηση του μοντέλου δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης, έγιναν συγκριτικά τεστ υπολογισμού ακουστότητας για να ποσοτικοποιηθεί η απόδοση του παραδοσιακού και του προτεινόμενου μοντέλου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το μοντέλο δυναμικά μεταβαλλόμενης μείξης, μειώνει τυχόν διαφορές ακουστότητας μεταξύ των περιβαλλόντων που αναμιγνύονται σε σύγκριση με το παραδοσιακό μοντέλο μείξης. Η υποκειμενική αξιολόγηση στο εργαστηριακό πεδίο, μέσα από το τεστ σύγκρισης ηχητικού παιχνιδιού τύπου ARA, φάνηκε πως η δυναμική μείξη επηρέασε την ακουστική αντίληψη των ακροατών θετικά, παρατηρώντας σημαντική βελτίωση των αποτελεσμάτων τους με την χρήση της δυναμικής μείξης, και ειδικότερα στην περίπτωση των αρχάριων αυτό το ποσοστό βελτίωσης έφτασε το 49%.

Μελλοντικό στόχο αποτελεί η ένταξη ενός μηχανισμού αναγνώρισης ηχητικών γεγονότων στο μοντέλο, με στόχο την μεταβολή της ισορροπίας μεταξύ των ακουστικών περιβαλλόντων, και η υλοποίηση του μοντέλου σε κινητές συσκευές.

### 3. Αναφορές

[1] Aki Harma, Julia Jakka, Miiikka Tikander, Matti Karjalainen, Tapio Lokki και Heli Nironen «Techniques and applications of wearable augmented reality audio» στο *Audio Engineering Society Convention 114*. Audio Engineering Society, 2003.

[2] Kaghat, F. Z., Azough, A., Fakhour, M., & Meknassi, M. «A new audio augmented reality interaction and adaptation model for museum visits» *Computers & Electrical Engineering*, 84, 106606, 2020.

[3] Emmanouel Rovithis, Nikolaos Moustakas, Andreas Floros και Kostas Vogklis «Audio legends: Investigating sonic interaction in an augmented reality audio game» *Multimodal Technologies and Interaction*, 3(4):73, 2019.

[4] Rishabh Gupta, Rishabh Ranjan, Jianjun He και Woon Seng Gan «Parametric hear through equalization for augmented reality audio» στο *ICASSP 2019-2019*

*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, σελίδες 1587–1591. IEEE, 2019.

[5] Jussi Ramo και Vesa Valimäki «Digital augmented reality audio headset» στο *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2012.

[6] Joseph Timoney, Thomas Lysaght και Marc Schoenwiesner «Implementing loudness models in matlab» *DAFX*, 2004.

[7] Matti Karjalainen, Ville Riikonen και Miikka Tikander «An augmented reality audio mixer and equalizer» στο *Audio Engineering Society Convention 124*, Audio Engineering Society, 2008.

[8] SA Genesis, Loudness toolbox για Matlab, 2009.

[9] Glasberg, Brian R., and Brian CJ Moore «A model of loudness applicable to time-varying sounds» στο *Journal of the Audio Engineering Society* 50.5, σελίδες 331-342, 2002.

## ***Οι θερινοί κινηματογράφοι της Θεσσαλονίκης (περίοδος 1950 - 2018)***

Ευθυμία Παπαδάκη      Ρίκα Δεληγιαννίδου      Νίκος Μπάρκας  
efirapadaki2208@gmail.com      rika\_del5@yahoo.gr      nbarkas@arch.duth.gr  
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η προτεινόμενη ανακοίνωση αναφέρεται στη διαχρονική ανάπτυξη (από το 1950 έως το 2018) και στη χωρική διασπορά θερινών κινηματογραφικών αιθουσών στη Θεσσαλονίκη. Αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης πανεπιστημιακής έρευνας όπου καταγράφονται τα κοινωνικά, οικονομικά και πολεοδομικά αίτια που διαμόρφωσαν το «κινηματογραφικό τοπίο» της πόλης.

Η έρευνα περιλάμβανε επεξεργασία αρχαικού υλικού και συνεντεύξεων. Καταγράφηκαν οι τοποθεσίες, η κατανομή και η πυκνότητα των θερινών σινεμά στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης που, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές εξελίξεις συνετέλεσαν στην άνοδο και πτώση των κινηματογράφων, από την πρώτη προβολή μέχρι την εξάπλωση και τελικά τη συρρίκνωση αυτής της υπαίθριας ψυχαγωγίας.

### ***The summer cinemas of Thessaloniki (period 1950 - 2018)***

#### **ABSTRACT**

The proposed announcement refers to the diachronic development (from 1950 to 2018) and the spatial distribution of summer cinemas in Thessaloniki. It is part of a wider university research, where the social, economic and urban planning data that shaped the "cinematic landscape" of the city are recorded.

The announcement was based on the processing of archival material and interviews. The location, distribution and density of the cinemas in the wider area of Thessaloniki along with the technological developments contributed to the rise and fall of cinemas, from the first screening to the spread and eventually the shrinking of this outdoor entertainment.

#### **Εισαγωγή**

Το μοντέλο της κινηματογραφικής αίθουσας εμποτίστηκε από τις δομικές παραμέτρους της θεατρικής τέχνης και την αρχιτεκτονική διαρρύθμιση της μονοαξονικής θεατρικής αίθουσας τύπου μπαρόκ. Στον κινηματογράφο το μήνυμα επηρεάζεται από το χώρο της προβολής, που είναι ταυτόχρονα φορέας και πομπός. [1]

Μετά από μια σύντομη περίοδο φιλοξενίας σε χώρους άλλων χρήσεων, η δημοτικότητα του κινηματογραφικού θεάματος επέτρεψε την αυτονόμηση της κινημα-

τογραφικής αίθουσας, δημιουργώντας ιδιαίτερες σχεδιαστικές απαιτήσεις και προδιαγραφές. Διαχρονικά αμετάβλητη παραμένει η μετωπική αντιπαράθεση της οθόνης, της οποίας το μέγεθος καθορίζει την οπτική άνεση των θεατών, με τα καθίσματα και το θάλαμο προβολής, σχέση που με αυστηρότητα υποδεικνύει στο θεατή τη διάταξη του θεάματος. [2]

Στην Ελλάδα, από τη δεκαετία του '50, ξεκίνησε μια πρωτοφανής αύξηση των θερινών αιθουσών. Η μορφολογική διάταξη των παραδοσιακών εγκαταστάσεων ήταν σχετικά απλή : θάλαμος προβολής και φορητά, πτυσσόμενα καθίσματα απέναντι στην οθόνη, ένα εκδοτήριο εισιτηρίων, WC και αναψυκτήριο. Ιστορικά, ο τυπικός θερινός κινηματογράφος (ιδίως κατά τις δεκαετίες '50 & '60) έφερε στην πρόσοψη τεράστιες επιζωγραφισμένες αφίσες ταινιών και φώτα νέον. Η εγκατάσταση διαμορφωνόταν σε άχτιστους υπαίθριους χώρους, ακόμη και σε ταράτσες κτιρίων, οι γύρω τοίχοι καλύπτονταν με αναρριχώμενα φυτά και το δάπεδο με χαλίκι. Η επιλογή ενός δημόσιου ή κοινόχρηστου χώρου ενείχε απώλειες στην ποιότητα της θέασης, οι οποίες αντισταθμιζόνταν με τη διάχυση ενός ιδιαίτερου κινηματογραφικού συναισθήματος, καθώς το οπτικό-ακουστικό υλικό αναμειγνυόταν με το χωρικό και ηχητικό περιβάλλον της πόλης. [3]

Μετά την εμφάνιση των multiplex cinema (στα τέλη της δεκαετίας του '90 στη Θεσσαλονίκη) οι ιδιοκτήτες αυτών των επιχειρήσεων κατενόησαν την αίγλη του θερινού σινεμά και πρόσθεσαν μια υπαίθρια αίθουσα μέσα στο οικοδομικό συγκρότημα τους, σε μορφή που παραπέμπει στις παραδοσιακές θερινές αίθουσες (από το χαλίκι στο έδαφος μέχρι τα αναρριχώμενα φυτά). [4]

## 1. Το κοινωνικό και πολιτιστικό πλαίσιο

Οι πρώτες κινηματογραφικές λήψεις στον ελλαδικό χώρο έγιναν από τους αδελφούς Μανάκια, αποθανατίζοντας γλέντια, εκδρομές και άλλα περιστατικά της καθημερινής ζωής, στην Αβδέλλα των Γρεβενών, λίγο πριν από τις αρχές του 20ου αιώνα. Την ίδια περίοδο έγιναν και οι πρώτες προβολές κινούμενων εικόνων, από έναν ανώνυμο, πλανόδιο Γάλλο. Οι προβολατζήδες άρχισαν να περιδιαβαίνουν την ελληνική επαρχία (ακολουθώντας τις διαδρομές των καραγκιοζοπαικτών) κάνοντας προβολές σε πλατείες και καφενεία, αλλά ταλαιπωρήθηκαν την περίοδο των πολέμων, στην κατοχή και στον εμφύλιο, κατά το πρώτο μισό του 20ου αιώνα. Μετά το '50, ο πλανόδιος κινηματογράφος αποτέλεσε αποκλειστικό μέσο διασκέδασης, αλλά και πηγή πληροφόρησης για τους κατοίκους της υπαίθρου. Ο πλανόδιος κινηματογράφος έφερε το όνομα του διαβατικού προβολατζή, που σταδιακά απέκτησε αυτοκίνητο και σταθερό ρυθμό περιοδείας. Συχνά το αντίτιμο του εισιτηρίου δεν ήταν χρηματικό, αλλά σε είδος. Ο χώρος δεν είχε κάποια συγκεκριμένη μορφολογική διάταξη, αλλά προσαρμόζονταν στα εκάστοτε διαθέσιμα. Οι χιλιοπαιγμένες κόπιες κόβονταν κι έπρεπε τάχιστα να επιδιορθωθούν, ενώ δεν ήταν σπάνια η λαθραία διακίνηση ταινιών, χωρίς την απόδοση δικαιωμάτων στις εταιρείες διανομής. [3]

Στη Θεσσαλονίκη, ο κινηματογράφος εμφανίστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα με απογευματινές προβολές στο Καφέ «Η Τουρκία». Μέχρι τη μεγάλη πυρκαγιά του '17 γινόταν προβολές στα Θέατρα Ποικιλιών της παραλίας του Λ. Πύργου και πύκνωσαν νέες ή διασκευασμένες αίθουσες στο κέντρο, στην παραλία και στο Βαρδάρη. Με την ανοικοδόμηση της πόλης, ο κινηματογράφος έγινε η αγαπημένη, φτηνή

διασκέδαση των εργαζόμενων, όπως το Θέατρο Σκιών. Σταδιακά οι λαϊκές αίθουσες προσαρμόστηκαν στις κινηματογραφικές συνθήκες εγκαταλείποντας το θέατρο, λόγω της μεγάλης φορολόγησης του θεάτρου και τη μη φορολόγηση του κινηματογράφου εκείνη την εποχή. Προβολές σε πλατείες κι αλάνες συναγωνιζόταν τις παραστάσεις των υπαίθριων θεάτρων. [5]

Με τον ερχομό των προσφύγων και τον διπλασιασμό του πληθυσμού της πόλης, ένα πλήθος θερινών κινηματογράφων εγκαταστάθηκε στο κέντρο και τις συνοικίες, όπως στον δρόμο των Εξοχών, στη λεωφόρο Στρατού, στην παραλία, στην πλατεία Αριστοτέλους (όπου υπήρχαν αντικρυστά δύο σειρές εγκαταστάσεων), στο Βαρδάρη, στο Χαριλάου, στην Τούμπα. Χαρακτηριστική επιχείρηση ήταν το εβραϊκό «Κουρσάλ», σε παροπλισμένο ιστιοφόρο στην προκουμαία, αλλά και η θερινή «Αίγλη», στην αυλή των δημοσίων λουτρών της οδού Κασσάνδρου, που είχαν μετατραπεί νωρίτερα σε χειμερινό σινεμά. Κατά τη δεκαετία `30 η Θεσσαλονίκη είχε πάνω από 50 θερινά σινεμά. [6]

Στη διάρκεια της γερμανικής κατοχής και του εμφυλίου διακόπηκε η παραγωγή ταινιών και η ανέγερση νέων αιθουσών. Κατά τη δεκαετία που ακολούθησε, παράλληλα με την ευρύτερη οικονομική βελτίωση, εμφανίστηκε μια τάση καταναλωτισμού και αναζήτησης τρόπων διασκέδασης. Οι ταβέρνες, τα μπουζουξίδικα και οι κινηματογραφικές αίθουσες σημείωσαν κατακόρυφη άνοδο. Εταιρείες παραγωγής ταινιών άρχισαν να δραστηριοποιούνται στη διαχείριση αιθουσών και στη λειτουργία θερινών κινηματογράφων. Γύρω από την πλατεία Αριστοτέλους λειτούργησαν 5 θερινά σινεμά. [4]

## 2. Η μεθοδολογία της έρευνας

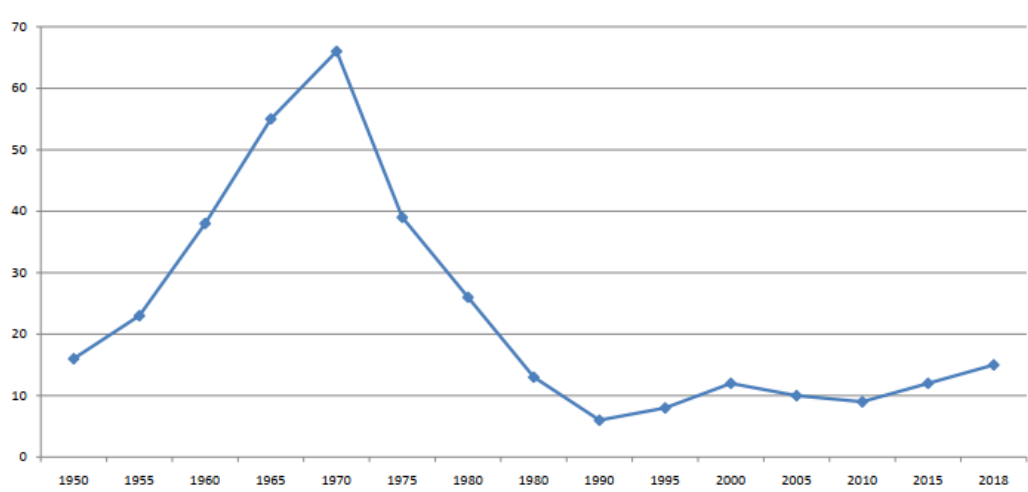
Για τη συλλογή των στοιχείων της έρευνας μελετήθηκε αρχειακό υλικό από τις εφημερίδες «Μακεδονία», «Θεσσαλονίκη» και την Ένωση Συντακτών Ημερησίων Εφημερίδων Μακεδονίας Θράκης (Ε.Σ.Η.Ε.Μ.-Θ). Τα δεδομένα καταγράφηκαν ανά 5ετία από το 1950 έως και το 2018, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα

*Πίνακας 2.1 το πλήθος των θερινών σινεμά ανά 5ετία [2]*

<b>Έτος</b>	1950	1955	1960	1960	1970	1975	1980	
<b>Πλήθος</b>	16	23	38	54	65	39	26	
<b>Έτος</b>	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
<b>Πλήθος</b>	13	6	8	12	10	9	12	16

Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία συγκροτήθηκαν κατάλογοι ονομάτων και τοποθεσιών, πίνακες, χάρτες διασποράς, καθώς και ιστόγραμμα μεταβολής του πλήθους των θερινών σινεμά κατά την περίοδο της έρευνας. Για την επαλήθευση των δεδομένων διασταυρώθηκαν ψηφιακές και βιβλιογραφικές πηγές. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στα υφιστάμενα θερινά της πόλης και συνεντεύξεις με ορισμένους ιδιοκτήτες κινηματογράφων.

Για την οικονομία του χώρου, τα αναλυτικά στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα και το διάγραμμα ανά πενταετία, ενώ στους χάρτες διασπορά ανά εικοσαετία. [3]



Σχήμα 2.1 Η διακύμανση του πλήθους των θερινών σινεμά ανά 5ετία [3]

### 3. Η διασπορά των θερινών σινεμά (1950 - 2018)

Το 1950 οι θερινοί κινηματογράφοι στη Θεσσαλονίκη ήταν μόλις 16. Στη διάρκεια της επόμενης δεκαετίας τα θερινά σινεμά άρχισαν να διαχωρίζονται με βάση τις ταινίες και τη χωροθέτησή τους, ως εξής :

- θερινοί Α΄ προβολής, κυρίως στο ιστορικό κέντρο της πόλης (με κόκκινο στίγμα),
- θερινοί Β΄ προβολής, σε γειτονιές του κέντρου με επαναλήψεις κυρίως ελληνικών (αλλά και τουρκικών) ταινιών (με γαλάζιο στίγμα),
- θερινοί Συνοικιών (Καλαμαριά, Πολίχνη, Κρήνη, Σταυρούπολη), με δυο ταινίες σε Β΄ προβολή (με πράσινο στίγμα).

Την περίοδο 1950 - 1970 παρατηρείται μια συνεχής αύξηση του αριθμού των θερινών αιθουσών ανάλογη με την γενικότερη πορεία του κινηματογράφου σε όλη την χώρα. Οι περισσότεροι κινηματογράφοι τοποθετήθηκαν σε νευραλγικές θέσεις, πάνω σε οδικούς άξονες, στην παραλία και το ιστορικό κέντρο. Καθώς σταδιακά η πόλη εξαπλώθηκε ανατολικά με μεσοαστικό πληθυσμό, εκεί εγκαταστάθηκαν πολλοί κινηματογράφοι, στεγασμένοι και υπαίθριοι (με κινητή οροφή ή σε δώμα). [7]

Οι αίθουσες Β΄ προβολής και οι Συνοικιακοί αποτελούσαν το μεγαλύτερο ποσοστό των θερινών (για παράδειγμα, το 1970, ποσοστό 50% των αιθουσών είναι Συνοικιακές και μόνο ποσοστό 26% είναι Α΄ προβολής). Γενικά, αυτή την εποχή ο κινηματογράφος αποτελούσε τη φτηνότερη μορφή διασκέδασης, αλλά και μια χαμηλή επιχειρηματική επένδυση (ευτελείς κατασκευές σε ανεκμετάλλευστα οικοπέδα και αλάνες). Την 20ετία '50 - '70, ενώ ο πληθυσμός της Θεσσαλονίκης διπλασιάστηκε, ο αριθμός των θερινών αιθουσών τετραπλασιάστηκε. [3]

Κατά τις δεκαετίες του '60 και του '70', σε συνδυασμό με την εμφάνιση της τηλεόρασης, οι θερινοί κινηματογράφοι γνώρισαν σταδιακή πτώση σε εγκαταστάσεις και εισιτήρια. Με νόμο της Δικτατορίας αυξάνονται οι συντελεστές δόμησης οπότε και πυκνώνουν οι κατασκευές οικοδομών με το σύστημα της αντιπαροχής. Ως επακόλουθο, τα θερινά σινεμά εξοβελίζονται από τα ανεκμετάλλευτα οικόπεδα και τις αλάνες και τη θέση τους καταλαμβάνουν πολυώροφες οικοδομές. [4]

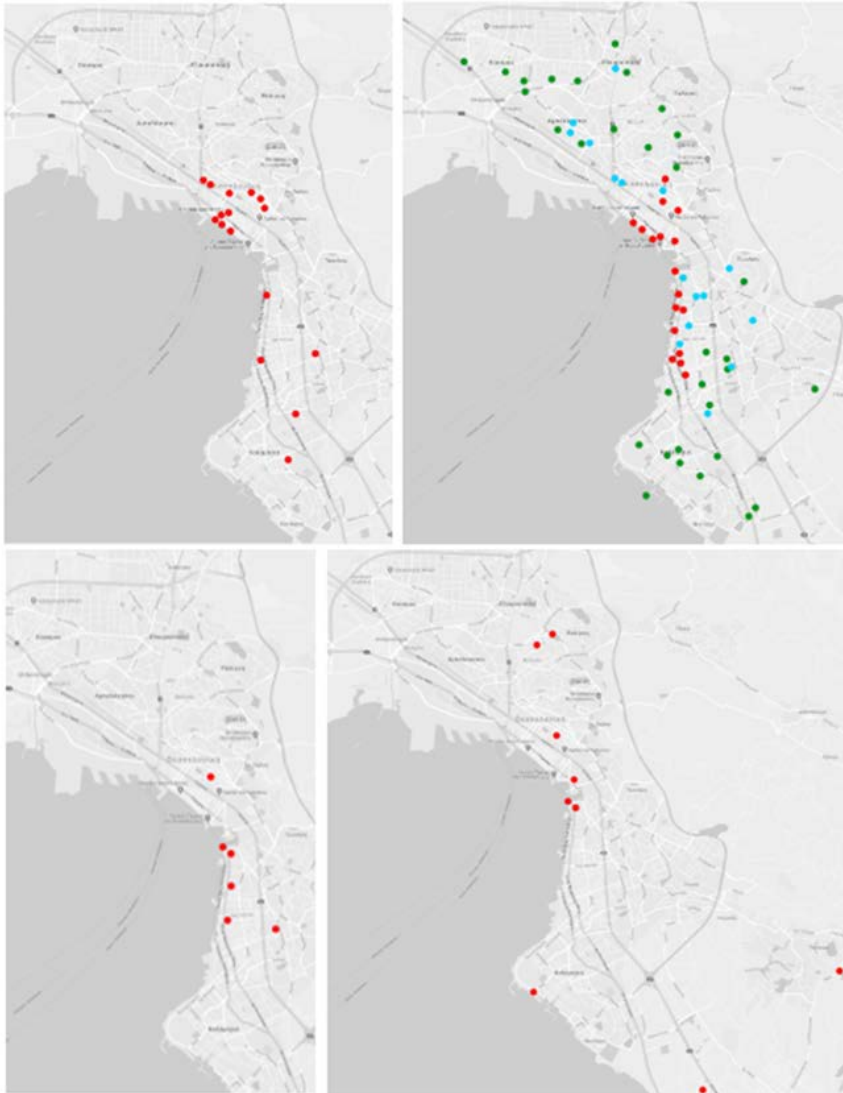
Στα τέλη του 1970 η τηλεόραση, με 2 δημόσια δίκτυα και πλήρες πρόγραμμα, απέσπασε μεγάλη μερίδα του κινηματογραφόφιλου κοινού. Επιπλέον, οι εταιρίες διανομής ταινιών κοστολογούσαν τις ταινίες σε ποσοστά από 30% ως 50% των εισπράξεων (ανάλογα την κατηγορία της αίθουσας), ενώ το κράτος διατήρησε υψηλή τη φορολογία επί των κερδών. Ήταν μια εξαιρετικά δύσκολη περίοδος, καθώς μερίδιο των εισιτηρίων απέκτησαν και οι κινηματογράφοι αυτοκινήτων (drive-in). [8] Στις αρχές της δεκαετίας του '80 άρχισε η διάδοση των ταινιών σε video, αλλά και η μετακίνηση εύπορων στρωμάτων στις ΒΑ συνοικίες της πόλης, μακριά από τις πιάτσες των θερινών. Οι αθροιστικές επιπτώσεις των παραπάνω εξελίξεων μείωσαν δραματικά τον αριθμό των αιθουσών (1975, 39 εγκαταστάσεις), πτώση που συνεχίστηκε και την δεκαετία του '80 (1985 : 13 αίθουσες, 1990 : μόλις 6, δηλαδή λιγότερες από την περίοδο έναρξης της έρευνας μας). [3]

Όπως φαίνεται στο χάρτη διασποράς του 1980, οι περισσότεροι συνοικιακοί θερινοί κινηματογράφοι έκλεισαν (διατηρήθηκε σχεδόν ένας ανά συνοικία) και απέμειναν να αντιστέκονται κάποιοι κοντά στην πλατεία Αριστοτέλους και στη λεωφόρο Β. Όλγας. Από το 1990 σταμάτησε ο διαχωρισμός των αιθουσών σε Α' και Β' προβολής. Η επέκταση της νέας παραλίας και η κατασκευή της περιφερειακής οδού βοήθησαν στην ταχύτερη εξάπλωση ΝΑ της πόλης, με συνέπεια την δημιουργία νέων ψυχαγωγικών κέντρων. Το 1990 ήταν η χειρότερη χρονιά των θερινών, με κλείσιμο ή αλλαγή χρήσης των εγκαταστάσεων.

Στα χρόνια που ακολούθησαν σημειώθηκε μια μικρή, αλλά σταθερή, αύξηση του πλήθους των θερινών. Στα τέλη της δεκαετίας του '90 ανοίγει το πρώτο multiplex στα Α της πόλης. Παρά το ελληνικό καλοκαίρι, έκοψε εισιτήρια ακόμη και από τα θερινά σινεμά, χάρη στις 8 κλιματιζόμενες αίθουσες του. [8] Στη συνέχεια, με πρωτοβουλίες της (τότε) υπουργού Πολιτισμού Μ. Μερκούρη, που συνοδεύτηκαν από την ιστορική απόφαση του Συμβουλίου της Επικρατείας (1999) για τη διάσωση των θερινών κινηματογράφων ως "ιστορικών τόπων", άρχισε η καταγραφή και κήρυξη τους, ενέργεια που συνδυάστηκε με ενισχύσεις από προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μετά το 2000, καθώς διάφοροι περιφερειακοί Δήμοι της Θεσσαλονίκης κατασκεύασαν νέες εγκαταστάσεις ή εξαγόρασαν παλιές, το 50% και πλέον του συνόλου των θερινών αιθουσών ανήκε σε δημοτικές επιχειρήσεις. Παρά την κατασκευή νέων πολύ-κινηματογράφων (στο κέντρο, ανατολικά και δυτικά), η κατανομή των εισιτηρίων δεν άλλαξε ριζικά, οπότε τα πολύ-σινεμά αναγκάστηκαν να δημιουργήσουν υπαίθριους χώρους, που μιμούνται τη μορφή και την ατμόσφαιρα της παραδοσιακής θερινής αίθουσας.[7]

Η ακτίνα θερινής επιρροής του κέντρου σε επίπεδο ψυχαγωγίας συρρικνώθηκε, κυρίως, εξαιτίας των δυσκολιών μετακίνησης και στάθμευσης. Την ίδια περίπου εποχή άρχισε να πυκνώνει η χρήση του διαδικτύου (από 1% του συνόλου των κατοίκων στα μεγάλα αστικά κέντρα το 1995, σε 31% το 2004), καθώς και η σταδιακή εξοικείωση των κοινού με το «κατέβασμα» ταινιών. Η εδραίωση της χρήσης του διαδικτύου στη διάρκεια της οικονομικής κρίσης επηρέασε σημαντικά τον αριθμό των θερινών κινηματογράφων.

θμό των εισιτηρίων σε χειμερινές και θερινές κινηματογραφικές αίθουσες, χάρη στην εύκολη και ανέξοδη ψυχαγωγία στο σπίτι. [8]



*Σχήμα 3.1 Η διασπορά των θερινών σινεμά στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης ανά εικοσαετία. Πάνω αριστερά 1950, πάνω δεξιά 1970, κάτω αριστερά 1990, κάτω δεξιά 2010 [3]*

Το μαζικό κλείσιμο των video clubs και η περαιτέρω συρρίκνωση του αριθμού των εισιτηρίων προβολής οδήγησε στη διακοπή της παραγωγής ταινιών, αλλά και στην απόφαση περί «πνευματικής ιδιοκτησίας» (2018), εξέλιξη που επηρέασε το καθεστώς παροχής διαδικτυακών προβολών στη χώρα. Απόρροια αυτής της κατάστασης είναι η πρόσφατη κυκλοφορία τηλεοπτικών πακέτων που ενοικιάζουν οι δι-



εθνείς διαδικτυακές πλατφόρμες, με χαμηλό αντίτιμο πρόσβασης. Αυτή η τελευταία εξέλιξη θα έχει δυσμενείς συνέπειες, μολονότι την περίοδο της πανδημίας τα θερινά σινεμά ξαναγέμισαν, ως σχετικά ασφαλείς χώροι συνάθροισης. [8]

## 5. Επίλογος

Η Θεσσαλονίκη, πόλη με μακρά παράδοση, κινηματογραφική και κινηματογραφημένη, σε πείσμα της απαισιοδοξίας της γνώσης, θέλει να διακατέχεται από την αισιοδοξία της επιθυμίας. Το 2018, έξι (6) ανεξάρτητα θερινά σινεμά, επτά (7) δημοτικές επιχειρήσεις, δύο (2) θερινά σε multi-plex, ένα θερινό με ευκαιριακές προβολές συν ποικίλες σποραδικές προβολές σε δημόσιους χώρους μεταλαμπαδεύουν το θεσμό του θερινού κινηματογράφου σε νέες γενιές θεατών και καλλιεργούσαν ένα πλαίσιο προβολής ταινιών, κυρίως ανεξάρτητης παραγωγής από όλο τον κόσμο.

Παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις εμφανείς αλλαγές των καταναλωτικών συνηθειών του κοινού, οι αιθουσάρχες των ανεξάρτητων κινηματογράφων θεωρούν ότι, η βασική αιτία της πτώσης των εισιτηρίων στα θερινά σινεμά οφείλεται στην διαχρονική και σωρευτική άνοδο του βιοτικού επιπέδου των μεσαίων στρωμάτων, δηλαδή στην απόκτηση αυτοκινήτου και εξοχικής κατοικίας, με αποτέλεσμα τη μαζική παραθεριστική έξοδο από την πόλη ή τις συχνές αποδράσεις στη θάλασσα. Η οικονομική κρίση της τελευταίας δεκαετίας, κατά παράδοξο τρόπο, επέφερε την αύξηση του αριθμού των εισιτηρίων στα θερινά σινεμά, διότι μείωσε τις ημέρες ή / και κατάργησε τις διακοπές μεγάλης μερίδας του αστικού πληθυσμού. [8]

Ο θερινός κινηματογράφος αποτέλεσε μια επιχείρηση της οποίας η βιωσιμότητα προσαρμόστηκε στις διαχρονικές οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες. Ο αμειλικτος ανταγωνισμός των παραδοσιακών εγκαταστάσεων με τα τεχνολογικά σύγχρονα, πολύ-εθνικά multiplex συνεχίζεται την τρέχουσα περίοδο, σε μια σύγκρουση την οποία, δυστυχώς, η ελληνική πολιτεία παρακολουθεί αμέτοχη κι αμήχανη, όταν δεν αποδεικνύεται εμφανώς μεροληπτική. Το ενδιαφέρον του κόσμου για κοινωνικότητα, αλλά και η οικονομική πρόσβαση σε νόμιμο υλικό μπορούν να διατηρήσουν ζωντανό το θεσμό του θερινού κινηματογράφου. Το παρελθόν έδειξε ότι σε πείσμα των δύσκολων καιρών το θερινό σινεμά ανέκαμπτε, επιβεβαιώνοντας την ανθεκτικότητά του.

## 6. Βιβλιογραφικές πηγές

[1] Δαλαβούρας, Π. - Ζευκίλη, Ν. : *Χώροι και όροι του θεάματος*. Ερευνητική εργασία, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΑΠΘ, 2008

[2] Ιωσηφίδου, Α. - Κολλιού, Μ.- Μπάρκας, Ν. : «Η εξέλιξη των αιθουσών κινηματογραφικής προβολής : παράμετροι σχεδιασμού και οπτικής άνεσης» ψηφιακά πρακτικά συνεδρίου Ιστορία Δομικών Κατασκευών 2, Ξάνθη 2015

[3] Παπαδάκη, Ευ. : *Η διασπορά των θερινών κινηματογράφων στην πόλη της Θεσσαλονίκης (περίοδος 1950 - 2018)*, Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, Τμήμα Αρχιτεκτόνων ΔΠΘ, 2019

[4] Ορφανουδάκης, Δ. : *Ο κινηματογράφος στην Ελλάδα. Ένας αιώνας αρχιτεκτονική του κινηματογράφου*. Πειραιάς, 1998.

- [5] Τομανάς, Κ. : *Οι κινηματογράφοι της παλιάς Θεσσαλονίκης*. εκδόσεις Νησίδες, Θεσσαλονίκη 1993
- [6] Αναστασιάδης, Γ. : *Σινεμά ο Παράδεισος. Οι κινηματογράφοι της Θεσσαλονίκης που άφησαν εποχή*. εκδόσεις Ιανός, Θεσσαλονίκη 2000
- [7] Δημητριάδου, Ε.Α. - Κωστόπουλος, Ε. : *Η διασπορά των κινηματογραφικών αιθουσών στην πόλη της Θεσσαλονίκης από το 1960 έως σήμερα*. Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, 2008
- [8] Συνεντεύξεις των ιδιοκτητών θερινών κινηματογράφων κ. Γαβριήλ Ράππου («Ναταλί» - «Απόλλων») και κας Ντίνας Σιδέρη («Άλεξ») στην Ευ. Παπαδάκη (Αύγουστος 2018)

## ***Ghostly Presence: Ο Ήχος των Στοιχειωμένων Σπιτιών στον Κινηματογράφο***

Αναστάσιος Πετρέλλης  
Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα  
Κινηματογράφου, ΣΚΤ, ΑΠΘ /  
Οδυσσιτών 4, 54250, Θεσσαλονίκη  
[anastasis\\_pet@hotmail.com](mailto:anastasis_pet@hotmail.com)  
+306942949838

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το στοιχειωμένο σπίτι κατέχει εξέχουσα θέση στις ιστορίες τρόμου, από τις λαϊκές παραδόσεις και την λογοτεχνία μέχρι και τον κινηματογράφο. Ο ηχητικός σχεδιασμός αποτελεί καταλύτη για την δημιουργία της επιθυμητής ατμόσφαιρας στον κινηματογράφο και έτσι χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο ώστε να αναδειχθεί το στοιχειωμένο σπίτι στις ταινίες που διαδραματίζονται σε αυτό. Αναφέρονται παραδείγματα χρήσης του ήχου σε ταινίες με στοιχειωμένα σπίτια καθώς επίσης και ομοιότητες και διαφορές των διαφορετικών προσεγγίσεων ηχητικού σχεδιασμού αυτών. Γίνεται επίσης λαογραφική αναφορά σε ήχους που έχουν αναφερθεί σε στοιχειωμένα μέρη ανά τον κόσμο*

## ***Ghostly Presence: The Sound of the Haunted House in Cinema***

### **ABSTRACT**

*The haunted house story arc is prominent in horror stories, from the folklore and literature to cinema. A film's sound design in general is critical in creating the desired mood and is thus used as a tool to highlight the haunted house in the films that take place in that. In this paper, some examples of haunted house films and their sound design are presented and analyzed according to their similarities and differences. There is also mention on reports from the folklore around the world regarding haunted houses and their sounds.*

### **Εισαγωγή**

Θρύλοι για στοιχειωμένους χώρους και σπίτια απαντώνται από την αρχαιότητα ακόμα σε όλα τα μήκη και πλάτη της γης. Οι λαϊκές αυτές παραδόσεις σιγά σιγά μετατράπηκαν σε ιστορίες και το στοιχειωμένο σπίτι βρήκε την θέση του στην λογοτεχνία, τον κινηματογράφο, τα video games αλλά και άλλες μορφές τέχνης. Το σπίτι αρχικά εξυπηρετούσε κυρίως το ρόλο του σκηνικού στο οποίο εμφανίζονται

τα φαντάσματα χωρίς να παίζει τόσο ενεργό ρόλο στην αφήγηση, όπως στον *Macbeth* του William Shakespeare και το *A Christmas Carol* του Charles Dickens, ενώ αργότερα με την γοτθική λογοτεχνία και το *The Castle of Otranto* του Horace Walpole δημιουργήθηκε το μοτίβο του στοιχειωμένου σπιτιού που απαντάται μέχρι και σήμερα με τις σκάλες που τρίζουν και τις αλυσίδες που σέρνονται [1].

Ο ήχος και η υπαινικτική μερικές φορές φύση του μπορούν να δημιουργήσουν πολλές φορές μία αίσθηση ασάφειας ως προς την πηγή του, κάτι που μπορεί να συντελέσει στην δημιουργία τρόμου. Κατά τον Stephen King το αρχέτυπο του στοιχειωμένου σπιτιού μπορεί να εντοπιστεί στον πρώτο «άνθρωπο των σπυλαίων που αναγκάστηκε να φύγει από την τρύπα του επειδή άκουσε ήχους που μοιάζανε με φωνές να έρχονται από τις σκιές» [2].

Ο ήχος, με τις δημιουργικές δυνατότητες του ηχητικού σχεδιασμού, λειτουργεί καταλυτικά στον κινηματογράφο του τρόμου και συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη του είδους. Κατά τον Robert Spandoni χρειαζόταν να έρθει ο ήχος στον κινηματογράφο πριν ακούσουμε τα θύματα να τσιρίζουν [3]. Με την χρήση του ηχητικού σχεδιασμού μπορούμε να δώσουμε, ή και να αποκρύψουμε, πληροφορίες για τον εκάστοτε χώρο στον οποίο πραγματοποιείται η δράση της ταινίας, καθώς επίσης και να αποδώσουμε δράσεις που συμβαίνουν εκτός οθόνης (off screen), σε κάποιον άλλο χώρο, αλλά επηρεάζουν άμεσα την εξέλιξη της αφήγησης. Οι κινηματογραφιστές έχουν την δύναμη να ελέγξουν και να περιορίσουν τις γεωγραφικές πληροφορίες που θα λάβει ο θεατής, κατά βούληση, διατηρώντας έτσι τον απαραίτητο βαθμό αποπροσανατολισμού και αφηγηματικής αστάθειας έτσι ώστε να παρέχουν το (αναμενόμενο) σοκ [4].

Στις ταινίες με στοιχειωμένα σπίτια ο ήχος παίζει καίριο ρόλο στην δημιουργία της επιθυμητής ατμόσφαιρας και, πολλές φορές, στην ανάδειξη του ίδιου του σπιτιού ως την κύρια πηγή του κακού, μετατρέποντας το στον βασικό ανταγωνιστή της ταινίας.

## 1. Ο Ήχος των Στοιχειωμένων Σπιτιών στον Κινηματογράφο

Στις ταινίες που εξετάστηκαν αναγνωρίστηκαν κάποιοι ήχοι που χρησιμοποιούνται περισσότερο και κάποια μοτίβα. Παρακάτω αναλύονται οι ήχοι αυτοί χωρισμένοι σε κατηγορίες και αναλύεται η χρήση τους μέσα στις ταινίες στις οποίες τους συναντάμε.

### 1.1 Χτυπήματα / Σφυροκοπήματα

Οι ήχοι από δυνατά χτυπήματα / σφυροκοπήματα στους οποίους η πηγή του ήχου δεν αποκαλύπτεται οπτικά βρέθηκαν σε πέντε από τις ταινίες. Χαρακτηριστικό σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι η επαναληψιμότητα των ήχων αυτών σε όλες τις ταινίες.

Στο *The Changeling* (1980, Peter Medak) ο πρωταγωνιστής John ξυπνάει κάθε μέρα από τα δυνατά χτυπήματα που ακούει μέσα στο σπίτι τα οποία αποδίδει στην αρχή σε χαλασμένα υδραυλικά. Στο *The Haunting* (1963, Robert Wise) αλλά και στο remake του, *The Haunting* (1999, Jan de Bont) η Eleanor και η Theodora ακούνε για δύο βράδια ήχους χτυπημάτων από όλο το σπίτι οι οποίοι πλησιάζουν και καταλήγουν να χτυπάνε στην πόρτα του δωματίου τους. Στα δύο *The Woman in*

*Black* (1989, Herbert Wise) και *The Woman in Black* (2012, James Watkins), ο πρωταγωνιστής ακούει χτυπήματα από το κλειδωμένο βρεφικό δωμάτιο.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην προκειμένη περίπτωση προξενεί το γεγονός ότι τέσσερις από τις πέντε ταινίες αποτελούν διασκευές βιβλίων, το *The Haunting of Hill House* της Shirley Jackson και το *The Woman in Black* του ομότιτλου βιβλίου της Susan Hill, ενώ οι δύο αποτελούν remake της παλαιότερης ταινίας. Οι ήχοι αυτοί από τα χτυπήματα περιγράφονται αυτούσιοι και μέσα στα αντίστοιχα βιβλία με μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση του *The Woman in Black* η πηγή τους αποκαλύπτεται να είναι διαφορετική με την εκδοχή του 2012 να είναι η ίδια με αυτή του βιβλίου.

### 1.2 Φωνές

Σε έντεκα από τις ταινίες απαντώνται ήχοι από φωνές, με διάφορες μορφές, των οποίων η πηγή επίσης δεν αποκαλύπτεται. Οι φωνές στις ταινίες αυτές γίνονται ακουστές με διαφορετικούς τρόπους κάθε φορά.

Στο *The Innocents* (1961, Jack Clayton) η Mrs. Giddens ακούει συνεχώς φωνές μέσα στο σπίτι ήδη από την στιγμή που καταφτάνει στην αυλή του σπιτιού και μία φωνή καλεί την μικρή κόρη που είναι υπό την προστασία της. Στα δύο *The Haunting* η Eleanor ακούει γυναικεία γέλια, ψαλμωδίες, ψιθύρους, κλάματα και κραυγές μωρών ενώ στο remake του 1999 ακούει και φωνές παιδιών που την καλούν. Στο *The Amityville Horror* (1979, Stuart Rosenberg) όταν ο ιερέας πηγαίνει να ευλογήσει το σπίτι της νέας οικογένειας που μόλις μετακόμισε και μία φωνή του φωνάζει και του λέει να βγει έξω. Στο *The Shining* (1980, Stanley Kubrick) ο Jack ακούει φωνές και μουσική να έρχονται από το άδειο μπαρ του ξενοδοχείου, πράγμα που τον κάνει να πάει εκεί.

Στο *The Changeling* ο πρωταγωνιστής ακούει την φωνή του πνεύματος που στοιχειώνει το σπίτι μέσα από μια ηχογράφηση στο μαγνητόφωνο του και στο *Poltergeist* (1982, Tobe Hooper) η κόρη της οικογένειας τους μιλάει μέσα από την τηλεόραση όταν αυτή παίζει χιόνια. Στο *Insidious* (2010, James Wan) από την άλλη ακούγεται μία φωνή μέσα από το baby monitor που υπάρχει στο παιδικό δωμάτιο. Στο *Stir of Echoes* (1999, David Koepf) ο γιός της οικογένειας ακούει την φωνή του κοριτσιού που πέθανε μέσα στο σπίτι καθώς έχει μία σχετική ευαισθησία σε τέτοια φαινόμενα. Όταν η οικογένεια τελικά μετακομίζει από το σπίτι και ενώ είναι μέσα στο αυτοκίνητο ο γιός ακούει παρόμοιες φωνές από όλα τα σπίτια στην διαδρομή, δίνοντάς μας να καταλάβουμε ότι όλα τα σπίτια έχουν κατά κάποιον τρόπο τα φαντάσματα τους είτε κυριολεκτικά είτε μεταφορικά. Στο *The Others* (2001, Alejandro Amenábar) η οικογένεια ακούει φωνές από όλο το σπίτι ενώ στο *The Conjuring* (2013, James Wan) περιστασιακά ακούγεται μία αναπνοή με πολύ reverb.

### 1.3 Πολυελαίοι και σπίτι που τρίζει

Οι ήχοι από το σπίτι να τρίζει ή/και του πολυελαίου που τρέμει απαντώνται αρκετά συχνά. Πιο συγκεκριμένα σε τέσσερις ταινίες ακούμε τον πολυελαίο του σπιτιού να τρέμει. Στα *The Haunting* του 1963, *The Amityville Horror*, *The Others* και *Ju-On: The Grudge* (2002, Takashi Shimizu). Σε καμία από τις ταινίες δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος λόγος για τον οποίο ο πολυελαίος αρχίζει να τρέμει

πέρα από το *The Amityville Horror* που το φαινόμενο και ο ήχος αρχίζουν όταν μπαίνει μέσα η καλόγρια θεία της πρωταγωνίστριας.

Σε τρεις ταινίες, τα δύο *The Haunting* και το *Insidious* ακούγονται τριξίματα, στις μεν πρώτες τρίζει ολόκληρο το οικοδόμημα ενώ στο *Insidious* ακούγονται σανίδες που τρίζουν από το δωμάτιο του γιού της οικογένειας που βρίσκεται σε κώμα.

#### 1.4 Εξωτερικοί ήχοι

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση των εξωτερικών του σπιτιού ήχων σε πολλές από τις ταινίες με στοιχειωμένα σπίτια που εξετάστηκαν. Ένα κοινό μοτίβο που παρατηρείται είναι ότι στην αρχή των ταινιών το σπίτι είναι αρκετά ήσυχο και δεν ακούμε εξωτερικούς ήχους όπως για παράδειγμα τα καιρικά φαινόμενα, ή τα ακούμε αρκετά χαμηλά στην μίξη, ενώ στην πορεία της ταινίας αυτοί οι ήχοι αρχίζουν να δυναμώνουν.

Η χρήση αυτή των εξωτερικών ατμοσφαιρών δίνει την αίσθηση ότι στην αρχή και πριν αρχίσουν τα όποια παραφυσικά φαινόμενα συμβαίνουν στο σπίτι ότι αυτό είναι ένα ασφαλές περιβάλλον για την οικογένεια που κατοικεί μέσα ενώ στην πορεία της ταινίας αρχίζει να φαντάζει πιο εύλωτο. Συνήθως αυτή η αύξηση της στάθμης των εξωτερικών ήχων συνοδεύεται και από πιο έντονα καιρικά φαινόμενα εκτός του σπιτιού, τα οποία στις περιπτώσεις που υπήρχαν και νωρίτερα δεν ακουγότουσαν τόσο δυνατά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το *Poltergeist* όπου νωρίς στην ταινία έξω από το σπίτι πλησιάζει η καταιγίδα η οποία όμως δεν ακούγεται τόσο πολύ όσο περιμένει κάποιος από τα πλάνα ενώ αργότερα στην πορεία της ταινίας η επόμενη καταιγίδα ακούγεται πολύ πιο μπροστά στην μίξη.

Στο *The Conjuring* οι εξωτερικοί ήχοι και δη τα καιρικά φαινόμενα ακούγονται πάρα πολύ έντονα μέσα στο σπίτι από την αρχή κιόλας της ταινίας. Αυτό σε συνδυασμό ότι τα παραφυσικά φαινόμενα ξεκινάνε από το πρώτο βράδυ κιόλας της οικογένειας στο σπίτι δίνει την αίσθηση ότι είναι συνεχώς εκτεθειμένοι.

#### 1.5 Ειδικοί ήχοι

Πέρα από τους ήχους που απαντώνται σε αρκετές ταινίες πολλές από τις ταινίες που εξετάστηκαν χρησιμοποιούν και διάφορους άλλους ήχους που είναι μερικές φορές πάρα πολύ σημαντικοί για την εξέλιξη της ιστορίας.

Χαρακτηριστικότερο τέτοιο παράδειγμα αποτελούν τα δύο *The Woman in Black* όπου ο πρωταγωνιστής ακούει τον ήχο από ένα άλογο και μία άμαξα που ακολουθείται από τις κραυγές μίας γυναίκας και ενός παιδιού από τον ανυψωμένο δρόμο έξω από το σπίτι. Ο ήχος αυτός περιγράφεται λεπτομερώς αρκετές φορές και στο βιβλίο του οποίου οι ταινίες αποτελούν διασκευή και έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς μέσα στην άμαξα αυτήν πέθανε το πνεύμα της γυναίκας που στοιχειώνει το σπίτι μαζί με τον γιό της στο παρελθόν. Στην ταινία του 1989 μάλιστα ο πρωταγωνιστής παρομοιάζει τον ήχο στις ηχητικές σημειώσεις που κρατάει σε έναν φωνογράφο με τον ίδιο τον φωνογράφο λόγο της αυτούσιας επαναληψιμότητας του.

Στο *The Amityville Horror* περιστασιακά ακούγονται οι ήχοι από μύγες που πετάνε, πιο έντονα στην σκηνή με τον ιερέα καθώς επίσης και μία κουνιστή καρέκλα που κουνιέται μόνη της. Στο *Poltergeist* σημαντικό ρόλο παίζει από την αρχή κιόλας της ταινίας ο ήχος από τα χιόνια της τηλεόρασης. Στο *The Others*

ακούγονται αρκετές φορές ήχοι από συρσίματα στον πάνω όροφο του σπιτιού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει επίσης στον ήχο του *Lake Mungo* (2008, Joel Anderson) το οποίο ανήκει στο είδος του mockumentary/found footage. Έτσι ποτέ δεν ακούμε τους ήχους από το σπίτι ή από τα παραφυσικά φαινόμενα, αλλά μόνο τις περιγραφές τους από τους συνεντευξιαζόμενους.

### 1.6 Η περίπτωση του *The Others*

Ειδική περίπτωση τόσο στην χρήση του ήχου όσο και στην ανατροπή του τέλους σχετικά με τα φαντάσματα του σπιτιού αποτελεί το *The Others*. Στο τέλος της ταινίας αποκαλύπτεται ότι οι πρωταγωνιστές της ταινίας στην πραγματικότητα έχουν πεθάνει και ότι όλα τα φαινόμενα που εκλαμβάνονται ως παραφυσικά φαινόμενα έχουν την πηγή τους στους ζωντανούς νέους ενοίκους του σπιτιού.

Καθ' όλη την διάρκεια της ταινίας δεν ακούμε ποτέ ατμόσφαιρες, ακόμα και όταν οι πρωταγωνιστές βρίσκονται έξω από το σπίτι στην φύση. Η ίδια η πρωταγωνίστρια κάποια στιγμή αναφέρει ότι πέρασε μία βδομάδα από την τελευταία φορά που άκουσε πουλιά να κελαηδάνε.

Αυτή η χρήση, ή ορθότερα μη χρήση, των ήχων ατμόσφαιρας σε συνδυασμό με την αποκάλυψη ότι οι ήχοι που ακούει η οικογένεια και αποδίδει σε φαντάσματα είναι στην πραγματικότητα οι ήχοι που παράγουν οι πραγματικοί ζωντανοί κάτοικοι του σπιτιού ενώ οι ήχοι που παράγουν αυτοί είναι στην πραγματικότητα οι ήχοι των παραφυσικών φαινομένων δημιουργεί μία αίσθηση «αντιστροφής» των ήχων παρόμοια με αυτή ενός φωτογραφικού αρνητικού.

## 2. Το reverb στα κινηματογραφικά στοιχειωμένα σπίτια

Σε όλες τις ταινίες γίνεται εκτεταμένη χρήση της αντήχησης, με τον τρόπο που αυτό χρησιμοποιείται δημιουργικά να διαφέρει λίγο ή πολύ ανάλογα με την ταινία. Σχεδόν σε όλες τις ταινίες υπάρχει πολύ reverb στις φωνές που προέρχονται από τα φαντάσματα καθώς επίσης και στις ανάσες τους. Τα βήματα συνοδεύονται επίσης πάντα με έντονο reverb με τα *The Innocents* και *The Woman in Black* (2012) να ξεχωρίζουν.

Στο *The Haunting* του 1999 όταν η Eleanor φτάνει στο σπίτι και χτυπάει την εξώπορτα το χτύπημα ακούγεται με πολύ έντονη αντήχηση. Στην ίδια ταινία όταν στο δωμάτιο που μένουν οι δύο βασικές πρωταγωνίστριες πέφτει η θερμοκρασία παρατηρείται και αύξηση του reverb. Καθ' όλη την διάρκεια της ταινίας επίσης η ένταση του είναι αυξανόμενη.

Στο *The Haunting* του 1963 από την άλλη υπάρχει ελάχιστο reverb σε όλη την ταινία με εξαίρεση την δεύτερη φορά που οι ήρωες μπαίνουν μέσα στην βιβλιοθήκη του σπιτιού όπου υπάρχει πάρα πολύ έντονο reverb στις φωνές των άλλων που τις μιλάνε. Αυτό που παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον είναι ότι στην προηγούμενη επίσκεψή τους στο δωμάτιο δεν υπήρχε καθόλου αντήχηση.

Στο *The Shining* υπάρχει καθ' όλη την διάρκεια της ταινίας πάρα πολύ reverb στο ξενοδοχείο, ήδη από την αρχή που φτάνει η οικογένεια και ενώ το ξενοδοχείο ακόμα δεν είναι άδειο, το οποίο αυξάνεται όμως συνεχώς κατά την διάρκειά της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η σκηνή στην οποία ο Jack μόνος τους δαχτυλογραφεί στην γραφομηχανή στο μεγάλο σαλόνι και τα πλήκτρα της

γραφομηχανής αντηχούν, σχεδόν αφύσικα, σε όλο το ξενοδοχείο. Μοναδική εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το διαμέρισμα στο οποίο κατοικεί η οικογένεια στο οποίο δεν υπάρχει καθόλου.

Στο *The Others* στην αρχή της ταινίας το reverb είναι πολύ έντονο στα βήματα ενώ μειώνεται κατά την διάρκεια της ταινίας, Λίγο πριν το τέλος της ταινίας όμως, όταν οι υπηρέτες τους αποκαλύπτουν ότι όλοι τους είναι νεκροί ξαφνικά οι φωνές των υπηρέτων αποκτούν πολύ αντήχηση.

### 3. Τα στοιχειωμένα μέρη ανά τον κόσμο

Για τις ανάγκες τις εργασίας έγινε επίσης και μία μελέτη σε λογογραφικές αναφορές για τους ήχους που έχουν υποστηρίξει ότι έχουν ακούσει άνθρωποι σε διάφορα, σύμφωνα με τον κόσμο, στοιχειωμένα μέρη ανά τον κόσμο. Μελετήθηκαν αναφορές από 153 μέρη σε 31 χώρες στα οποία βρέθηκαν 284 αναφορές σε 96 μοναδικούς ήχους. Από αυτούς τους ήχους οι 97, δηλαδή το 34,15% συνδεόταν με την ιστορία του μέρους αυτού ή με την παλαιότερη χρήση του, ενώ οι υπόλοιποι όχι. Οι ήχοι που αναφέρθηκαν να έχουν ακουστεί περισσότερες φορές ήταν τα βήματα (11% με 33 αναφορές), φωνές (9% με 25 αναφορές), μουσική (7% με 21 αναφορές), κλάματα και ψίθυροι (με 4% και 13 αναφορές ο κάθε ήχος). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε καμία διαφορά στις αναφορές στους ήχους ανά τον κόσμο, πράγμα που μας δίνει να καταλάβουμε ότι υπάρχει μία οικουμενικότητα στο τι τρομάζει τους ανθρώπους.

### 4. Συμπεράσματα

Από την έρευνα προκύπτει ότι υπάρχουν κάποιο ήχοι που χρησιμοποιούνται περισσότερο από τους υπόλοιπους, όπως για παράδειγμα οι ήχοι από φωνές, τα χτυπήματα και τα τριξίματα, κυριότερο όμως ρόλο παίζει η πιο υπαινικτική χρήση του ήχου και η ασάφεια αναφορικά με την πηγή του. Αρκετά συχνά παρατηρείται επίσης η αύξηση σε ένταση των εξωτερικών του σπιτιού ήχων, πράγμα που συντελεί στο να δίνεται η αίσθηση ότι οι κάτοικοι του σπιτιού είναι ευάλωτοι και εκτεθειμένοι. Συχνή επίσης είναι η έντονη, και αρκετά δημιουργική πολλές φορές, χρήση της αντήχησης, που καταφέρνει να δώσει στους χώρους, αναδεικνύοντας τους έτσι σε βασικούς ανταγωνιστές της ταινίας.

### 5. Αναφορές

[1] Grider, Sylvia “The Haunted House in Literature, Popular Culture, and Tradition: A Consistent Image” *Contemporary Legend*, 2 σελίδες 174-204. (1999)

[2] King, Stephen *Danse Macabre London: Futura* (1981)

[3] Spandoni, *Robert Uncanny Bodies: The Coming of Sound Film and the Origins of the Horror Genre*, University of California Press, Berkeley CA (2007)

[4] Grøn, Nis. “The Sound of Horror: Silence & Sound Contrasts in Sci-Fi Horror Movies.” *Tidsskrift For Medier, Erkendelse og Formidling*, Vol. 01, No. 01 σελ. 97-109 (2013)



## **Αυτοματοποιημένη Επιλογή Ήχων για τον Ηχητικό Σχεδιασμό στις Οπτικοακουστικές Αφηγήσεις: Ο Ήχος της Εικόνας**

Λάζαρος Βρύσης  
Διδάκτορας  
lvrysis@auth.gr

Χρήστος Γούσιος  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
cgoussios@film.auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια πρωτότυπη εφαρμογή λογισμικού με το όνομα *Sound Design Assistant*, η οποία σχεδιάστηκε για να παρέχει δυνατότητες αναζήτησης ηχητικών καταγραφών και να διευκολύνει την εύρεση ήχων κατά τη διαδικασία του ηχητικού σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, γίνεται μια πρώτη ανάλυση των αναγκών του *sound designer*, παράλληλα με τον αρχικό σχεδιασμό μιας διαδικτυακής εφαρμογής, η οποία μπορεί εξάγει λεκτικές περιγραφές από εικόνες, έπειτα να τις προσαρμόζει κατάλληλα, ώστε να επιτυγχάνεται μια εύστοχη συσχέτιση μεταξύ εικόνων και ηχητικών εφέ, και, τέλος, να παρουσιάζει τα αποτελέσματα με τρόπο που να προάγει την εμπειρία χρήσης του επαγγελματία. Αυτή η αρχική εφαρμογή υποστηρίζει στατικές εικόνες και ενσωματώνει μια ενδεικτική βιβλιοθήκη ήχων, με μελλοντικό στόχο να υποστηρίζει ροές βίντεο και να αντλεί δεδομένα από μεγάλα διαδικτυακά αποθετήρια ήχων.

### ***Automated Audio Selection for Sound Design***

#### **ABSTRACT**

*This paper presents a prototype software application, which is designed to automatically find audio recordings that match a given image. The application facilitates the ordinary workflow of sound design. In this direction, the work includes an initial analysis of the users' requirements, along with the design of a prototype application, which extracts captions from images, and performs natural language processing to maximise the match between images and sound recommendations. The application aspires to provide a user-friendly graphical interface, maximising the user experience. The current version processes images only and features a small audio library, but later versions will support video and data exchange with large online audio repositories.*

## 1 Εισαγωγή

Ο ηχητικός σχεδιασμός (sound design) στις οπτικοακουστικές αφηγήσεις (ταινίες, σειρές, τηλεοπτικά σίριαλ, video games, VR & AR κ.ά.) αποτελεί τη διαδικασία της σύνθεσης, που οδηγεί στον συνολικό τελικό ήχο της κάθε παραγωγής και σχετίζεται από μια σειρά επιλογών -πρακτικών, τεχνικών κι αισθητικών- που μερικώς καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα. Ένα πρώτο στάδιο της ηχητικής κατασκευής, αποτελεί η επιλογή των ήχων που σχετίζονται με την εικόνα κι αυτοί είναι ήχοι οι οποίοι πρέπει -στις συμβατικές αφηγήσεις- να υπάρχουν στην τελική σύνθεση. Η εικόνα είναι απαραίτητο να συνοδεύεται από τους ήχους της, εκτός αν θέλουμε να δημιουργήσουμε κάποια άλλη αίσθηση πέρα από την κανονικότητα [1].

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε ένα εργαλείο το οποίο εξάγει λέξεις-κλειδιά από την εικόνα, εν συνεχεία συγκεντρώνει ήχους που σχετίζονται με τις λέξεις αυτές άμεσα αλλά και έμμεσα (θάλασσα αλλά και κύμα), και τους παρέχει συγκεντρωτικά στον σχεδιαστή ήχου (sound designer) για να γίνει η τελική επιλογή και η τοποθέτησή τους στο εκάστοτε έργο οπτικοακουστικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, γίνεται μια πρώτη ανάλυση και καταγραφή των αναγκών του χρήστη, μαζί με τον σχεδιασμό μιας πρωτότυπη εφαρμογής λογισμικού, η οποία θα εξυπηρετεί προς την κατεύθυνση αυτή, με απώτερο στόχο την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Όλα τα παραπάνω διερευνώνται στη βάση του πρωτότυπου λογισμικού που αρχικά θα λειτουργεί με στατικές εικόνες και μια ενδεικτική βιβλιοθήκη ήχων, με μελλοντικό στόχο να υποστηρίξει ροές βίντεο και να αντλεί δεδομένα από μεγάλα διαδικτυακά - και μη- αποθετήρια ήχων.

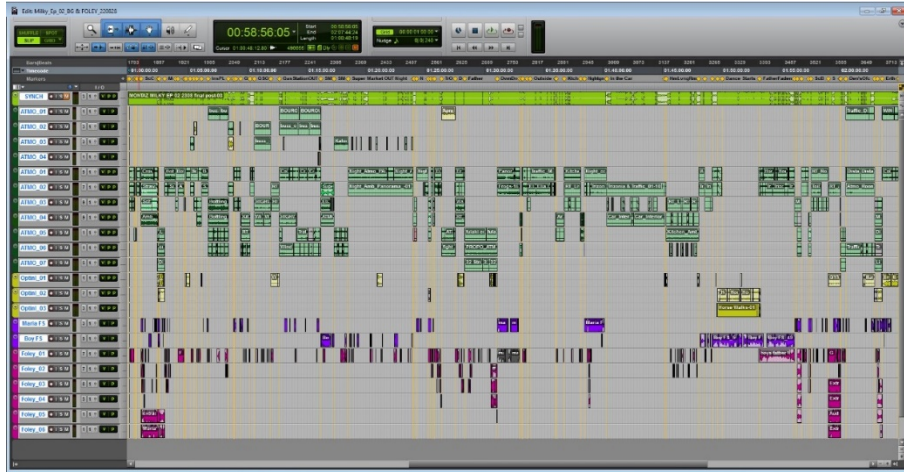
## 2 Μεθοδολογία Ηχητικού Σχεδιασμού

Το ηχητικό σύμπαν κάθε συμβατικής ταινίας ή σειράς μυθοπλασίας -αλλά και γενικότερα των περισσότερων οπτικοακουστικών παραγωγών- αποτελείται από διαλόγους, ήχους και μουσική [2]. Οι ήχοι για μια ταινία ή σειρά μυθοπλασίας, στους οποίους άλλωστε εστιάζει και η παρούσα εργασία, αποτελούν ένα ψηφιδωτό το οποίο συνίσταται από ηχητικά εφέ και ατμόσφαιρες, δηλαδή ήχους χώρου και περιβάλλοντος (ambiances, atmospheres, backgrounds).

Οι ήχοι αυτοί, σε κάποιο ποσοστό, έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια της παραγωγής, δηλαδή των γυρισμάτων. Για παράδειγμα, σε μια σκηνή όπου δύο άνθρωποι παίζουν μπάσκετ, κατά το γύρισμα γίνεται προσπάθεια για τη βέλτιστη καταγραφή των διαλόγων κι εν συνεχεία για το σύνολο των υπόλοιπων ήχων που δικαιολογούνται, υπάρχουν ή επιθυμούμε να υπάρξουν στη σκηνή. Οι ήχοι της μπάλας, των βημάτων, της μπασκέτας (ταμπλό, διχτάκι), των σωμάτων, αλλά και του περιβάλλοντα χώρου, είναι ήχοι που θα καταγραφούν σύγχρονα με το γύρισμα και αποτελούν τα PFX (production effects), αλλά επιπρόσθετα ο ηχολήπτης θα φροντίσει να τους καταγράψει και μετά το τέλος του γυρίσματος. Αυτή η ασύγχρονη καταγραφή των ήχων, που ονομάζονται ήχοι OFF ή wild tracks, προορίζεται για τη μεταπαραγωγή (post production) του ήχου, όπου θα γίνει προσπάθεια με τα ηχητικά αυτά υλικά να ανασυσταθεί το ηχητικό περιβάλλον της σκηνής [3]-[5]. Οι καταγραφές του ήχου από το γύρισμα συγχρονίζονται με την εικόνα και πηγαίνουν στο μοντάζ (editing). Εκεί η ταινία ή το επεισόδιο θα πάρουν την τελική μορφή τους βάσει του αρχικού σεναρίου, και θα εκκινήσουν όλες οι διαδικασίες της μεταπαραγωγής του ήχου.

Αρχικά πραγματοποιείται το dialogue editing, κατά το οποίο θα δοθεί στους διαλόγους της ταινίας, η τελική μορφή τους. Η διαδικασία αυτή δεν εμπίπτει στο ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Όμως κατά τη διαδικασία αυτή, ξεχωρίζουν τα PFX από το διάλογο και μπορούμε να κρίνουμε αν μέρος των σύγχρονων ηχητικών εφέ είναι χρήσιμο για την τελική παραγωγή ή όχι (λ.χ. τα βήματα των ανθρώπων, η μπάλα κ.ο.κ.) [6]. Συνήθως απαιτείται ο επανασχεδιασμός και η επανηχογράφηση των περισσότερων ήχων που υπάρχουν σε μια ταινία/σειρά, καθώς -πέρα από το ζήτημα της απαιτούμενης υψηλής ποιότητας των ήχων- υπάρχει και το ενδεχόμενο της μεταγλώττισης, το οποίο απαιτεί ακέραιη την ύπαρξη ολόκληρου του ηχητικού σύμπαντος της παραγωγής, όταν αφαιρεθούν οι διάλογοι.

Ο ηχητικός σχεδιασμός εκκινεί με την ολοκλήρωση του dialogue editing. Κατά τον ηχητικό σχεδιασμό τοποθετούνται αρχικά οι ατμόσφαιρες (ήχοι περιβάλλοντος) σε κάθε σκηνή. Για παράδειγμα, ένας επαρχιακός σταθμός αυτοκινήτων στην ύπαιθρο μια καλοκαιρινή νύχτα, συνοδεύεται από: (i) μακρινό ήχο αυτοκινήτων από τις εθνικές οδούς (distant traffic), αλλά και (ii) κάποια αυτοκίνητα που διέρχονται από τον δρόμο μπροστά από αυτό (car pass bys), επίσης από (iii) τον ήχο της νύχτας, που μπορεί να έχει τριζόνια (crickets/insects) κι (iv) ένα απαλό αεράκι (night ambience/summer night breeze/light wind), (v) από τον ήχο των φώτων του δρόμου, αλλά και του σταθμού (electric buzz) και όποιον άλλον συνεχή ήχο φόντου μπορεί να σκεφτεί ο sound designer. Για την εύρεση των ήχων αυτών, ανατρέχουμε σε βιβλιοθήκες ήχων ή εντοπίζουμε και ηχογραφούμε τους ήχους που χρειαζόμαστε. Το σύνολο των ήχων ατμόσφαιρας διανέμεται στα κανάλια του περιφερειακού ήχου (surround sound) και δημιουργεί ένα συνεκτικό υπόστρωμα, πάνω στο οποίο μπορούν να συνυπάρξουν όλοι οι άλλοι ήχοι της ταινίας. Πέρα από τα φόντα, σε μια οπτικοακουστική παραγωγή τοποθετείται ένα πλήθος επιπλέον ηχητικών εφέ, τα οποία είτε θα βρεθούν από βιβλιοθήκες ήχων, είτε θα ηχογραφηθούν, είτε θα συντεθούν και θα υποστούν πολλαπλά επίπεδα επεξεργασίας στο χρόνο και τη συχνότητα. Ανάμεσα σε αυτούς είναι και τα foley (βήματα, ρούχα, κινήσεις, αντικείμενα), τα οποία συνδέονται με τις δράσεις που βλέπουμε, αλλά και αντικείμενα που βρίσκονται στην εικόνα. Στην εικόνα που ακολουθεί, είναι εμφανές το ψηφιδωτό όλων αυτών των ήχων, όπως αποτυπώνεται μέσω ενός λογισμικού DAW (digital audio workstation).



Εικόνα 1 Ένα session ηχητικού σχεδιασμού (περιέχει μόνον ατμόσφαιρες & βήματα)

Το εργαλείο το οποίο παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, έρχεται να λειτουργήσει ως βοηθός του sound designer, για τον εντοπισμό και την εξεύρεση από βιβλιοθήκες, των ήχων που θεωρούνται κατάλληλοι βάσει της εικόνας, για την εκάστοτε σκηνή μιας οπτικοακουστικής παραγωγής.

### 3 Αυτοματοποιημένη Επιλογή Ήχων

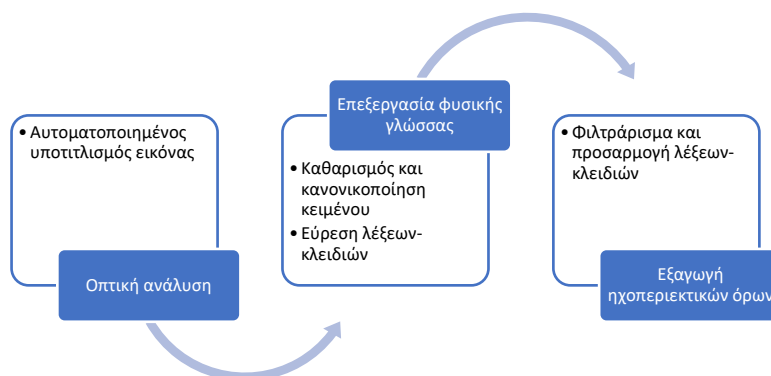
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε, και προκειμένου η απαιτούμενη ροή εργασιών να υποστηρίζεται από ένα υπολογιστικό σύστημα, απαιτείται η υλοποίηση σε επίπεδο λογισμικού τριών επιμέρους εργασιών: της αυτόματης περιγραφής εικόνων με λεζάντες (image captioning), της προσαρμογής αυτών των ετικετών ώστε να επιτυγχάνεται εύστοχη συσχέτιση μεταξύ λεκτικών περιγραφών εικόνων και ήχων, και της παρουσίαση των σχετικών αποτελεσμάτων με τρόπο που να προάγει την εμπειρία χρήσης για τον επαγγελματία.

Όπως είναι γνωστό, η ανάπτυξη των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning) υπήρξε ραγδαία τα τελευταία χρόνια [7]. Οι μέθοδοι επεξεργασίας στο πεδίο της μηχανικής όρασης (computer vision) προσφέρουν αξιοσημείωτες δυνατότητες, όπως αυτή της δημιουργίας λεκτικών περιγραφών από εικόνες ή βίντεο [8]. Σε αυτό το πλαίσιο, η επιλογή, η διαμόρφωση και η ενσωμάτωση μιας υπολογιστικής διεργασίας για την αυτόματη δημιουργία ετικετών σε μια διαδικτυακή εφαρμογή είναι πλέον εφικτή. Παράλληλα, η ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας φυσικής γλώσσας για την ανάλυση δεδομένων κειμένου κρίνεται ακόμα πιο βατή εργασία [9]. Τέλος, η διαθεσιμότητα προγραμματιστικών εργαλείων και βιβλιοθηκών για τη δημιουργία διαδικτυακών γραφικών διεπαφών είναι κάτι παραπάνω από υψηλή, διευκολύνοντας την ανάπτυξη διαδικτυακών εφαρμογών.

### 4 Ανάπτυξη πιλοτικής διαδικτυακής εφαρμογής

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε μια πιλοτική εφαρμογή με το όνομα *Sound Design Assistant*, βάσει των προδιαγραφών που ορίστηκαν στην προηγούμενη

ενότητα. Η εφαρμογή σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει δυνατότητες αναζήτησης ηχητικών καταγραφών για να διευκολύνει την εύρεση ήχων κατά τη διαδικασία του ηχητικού σχεδιασμού αλλά και να επικουρήσει οποιαδήποτε άλλη εργασία απαιτεί την εύρεση ήχων. Η εφαρμογή είναι διαθέσιμη στη διεύθυνση <https://research.playcompass.com/sound-design-assistant/> και μπορεί να εκτελεστεί μέσω οποιουδήποτε σύγχρονου περιηγητή διαδικτύου. Η ανάπτυξη της διεπαφής της έχει γίνει με χρήση τεχνολογιών HTML και CSS, ενώ η διάδραση που προσφέρει, υποστηρίζεται από ρουτίνες που αναπτύχθηκαν στις γλώσσες προγραμματισμού JavaScript και PHP. Αν και πρόκειται για πιλοτική εφαρμογή η οποία βρίσκεται στα αρχικά στάδια ανάπτυξής της και δεν ακολουθείται πιστά κάποιο γνωστό μοντέλο ανάπτυξης λογισμικού, η μεθοδολογία εξέλιξης βασίστηκε σε μια επαναληπτική διαδικασία ανάλυσης, σχεδιασμού, ανάπτυξης, εκσφαλμάτωσης και αξιολόγησης. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η ροή ενεργειών που λαμβάνει χώρα κατά τη χρήση της εφαρμογής και ακολουθούν πιο αναλυτικές περιγραφές για κάθε βήμα.



Σχήμα 1 Ροή ενεργειών της εφαρμογής

#### 4.1 Μονάδα οπτικής ανάλυσης

Ένας αλγόριθμος βαθιάς μάθησης (deep learning) συνιστά το πρώτο στάδιο επεξεργασίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο δεν βρίσκεται στο επίκεντρο της τρέχουσας εργασίας και ότι εξαιρετικά μοντέλα μηχανικής μάθησης για image captioning διατίθενται ελεύθερα προς αξιοποίηση, δε γίνεται εκ νέου ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου αλλά χρήση κάποιου προ-εκπαιδευμένου. Συγκεκριμένα, στη διεπαφή της εφαρμογής ενσωματώνεται το διαδικτυακό εργαλείο “Generating image caption demo” που υποστηρίζεται από το μοντέλο βαθιάς μάθησης “WebDNN” για την εξαγωγή λεζαντών από εικόνες. Το εν λόγω λογισμικό έχει αναπτυχθεί από τους Masatoshi Hidaka και Daiki Sanno, ενώ ο πηγαίος κώδικας διατίθεται μέσω αποθετηρίου στο GitHub [11]. Σε επόμενο στάδιο, το προαναφερθέν εργαλείο δημιουργίας υποτίτλων θα αντικατασταθεί από ειδικά διαμορφωμένη γραφική διεπαφή που θα προσφέρει αναβαθμισμένη λειτουργικότητα και θα υποστηρίζεται από μια πρωτότυπη διαδικτυακή υπηρεσία λογισμικού (web service). Αυτή η υπηρεσία αναπτύσσεται από την ερευνητική ομάδα Multidisciplinary Media & Mediated Communication Research Group (M3C) [12], στο πλαίσιο

του ερευνητικού έργου “Φορητοί αισθητήρες και συστήματα τετραπτέρων για αστική κοινωνική και περιβαλλοντική παρατήρηση και αλλαγή συμπεριφοράς” [13].

#### 4.2 Μονάδα επεξεργασίας φυσικής γλώσσας

Σε επόμενο στάδιο, οι λεζάντες που προκύπτουν πρέπει να οδηγούν σε ήχους που πλαισιώνουν ιδανικά την εικόνα. Η ηχητική ανάγνωση των εικόνων αναβαθμίζεται μέσω της αξιοποίησης ποικίλων τεχνικών επεξεργασίας φυσικής γλώσσας (natural language processing - NLP), όπως καθαρισμού και κανονικοποίησης των δεδομένων (data standardization and normalisation - lower casing, stop-words removal) και τεχνικών όπως term frequency-inverse document frequency (TF-IDF), named entity recognition.

#### 4.3 Μονάδα εξαγωγής ηχοπεριεκτικών όρων

Μετά από αυτά τα «τυπικά» στάδια εξαγωγής λέξεων-κλειδιών από κείμενο, πρέπει, με κάποιον τρόπο, η «μηχανή» να αποκτήσει την εμπειρία και την αισθητική ενός sound designer. Εδώ εντοπίζεται και η κύρια συνεισφορά της εργασίας. Έτσι, ακολουθείται μια διαδικασία εύρεσης σχετικών λέξεων (και εννοιών) βάσει των αναγκών ενός sound designer. Για παράδειγμα, αν αρχικά εξαχθεί η λέξη-κλειδί «σκύλος», αυτή θα εμπλουτιστεί με τις λέξεις «γαύγισμα», «γρύλισμα», «σάλια», «λαχάνιασμα», «βήματα», «περπάτημα». Ουσιαστικά, πρόκειται για μια διαδικασία εύρεσης «συνώνυμων» -όχι σε γλωσσικό επίπεδο- και επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ειδικά σχεδιασμένου λεξικού (lexicon), το οποίο παρέχει αυτές τις «συνώνυμες» λέξεις.

Πίνακας 1 Ομάδες «συνώνυμων» λέξεων από την σκοπιά του sound design

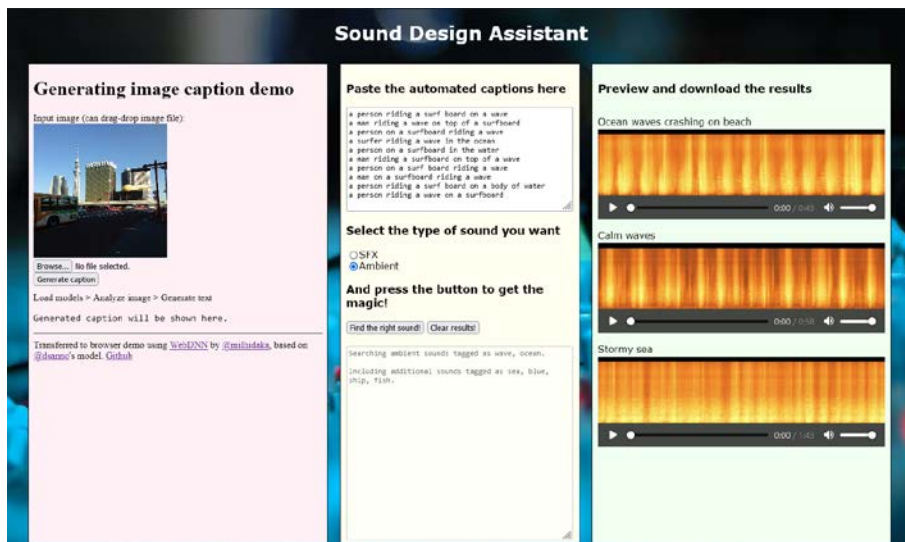
Ομάδα 1	Ομάδα 2	...	Ομάδα N
sea	grass		table
ocean	field		bed
wave	tree		couch
ship	flower		house
			indoors

Μετά από μια πρώτη αξιολόγηση της λειτουργίας της εφαρμογής σε αλγοριθμικό επίπεδο, αποφασίστηκε η προσθήκη μιας επιπλέον επιλογής για την εύρεση ηχητικών εφέ για μια ζητούμενη εικόνα. Η μονάδα εξαγωγής λεκτικών περιγραφών παράγει λεζάντες όπως «ένας μαύρος σκύλος σε ένα δωμάτιο» ή «ένα αυτοκίνητο στο συνεργείο». Όπως προκύπτει από τα παραδείγματα, οι λεκτικές περιγραφές είναι πιθανό να επικεντρώνονται κάποιο υποκείμενο (σκύλος, αυτοκίνητο) και παράλληλα να δίνεται ένας προσδιορισμός του χώρου στον οποίο εντοπίζεται το υποκείμενο. Λαμβάνοντας υπόψη πως σχεδόν σε όλες τις εργασίες ηχητικού σχεδιασμού εξυπηρετεί η διάκριση του περιεχομένου σε ομιλία, ηχητικά εφέ και μουσική, ενώ τα ηχητικά εφέ πολλές φορές διακρίνονται μεταξύ αυτών που αφορούν ενέργειες στο προσκήνιο και αυτών που αφορούν το παρασκήνιο (ατμόσφαιρες), και ότι η

προτεινόμενη εφαρμογή προτείνει ηχητικές επιλογές που αφορούν αποκλειστικά τα εφέ, αποφασίστηκε η προσθήκη ενός επιλογέα για τη διάκριση των ατμοσφαιρών από την ευρύτερη κατηγορία των ηχητικών εφέ. Έτσι, για παράδειγμα, αν ο χρήστης επιλέξει την παρουσίαση αποτελεσμάτων που αφορούν ατμόσφαιρες, στην περίπτωση του «ένας μαύρος σκύλος σε ένα δωμάτιο» τα αποτελέσματα περιέχουν ήχους που σχετίζονται με εσωτερικούς χώρους, οικιακές εργασίες, δωμάτια κ.ο.κ. Διαφορετικά, τα αποτελέσματα σχετίζονται με ήχους που έχουν χαρακτηριστεί με τις λέξεις «γαύγισμα», «γρύλισμα», «σάλια», «λαχάνιασμα», «βήματα», «περπάτημα». Και αυτή η αλγοριθμική εργασία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός δεύτερου, ειδικά διαμορφωμένου, λεξικού.

#### 4.4 Γραφική διεπαφή χρήστη

Τέλος, γίνεται προσπάθεια για την βελτίωση της εμπειρίας χρήσης και μέσω της παρεχόμενης γραφικής διεπαφής της εφαρμογής (UX design), με την ενσωμάτωση κατάλληλων οπτικοποιήσεων, ώστε να διευκολύνεται και να επιταχύνεται η εργασία του επαγγελματία. Η κύρια οθόνη της εφαρμογής (Σχήμα 2) παρέχει την κατάλληλη λειτουργικότητα για την εύρεση, προεπισκόπηση και μεταφόρτωση ηχητικών εφέ. Χωρίζεται σε τρεις τομείς, τον αριστερό, τον μεσαίο και αυτόν στα δεξιά. Ο χρήστης ξεκινά από τον αριστερό τομέα, μεταφορτώνοντας μια εικόνα για την οποία επιθυμεί ηχητική επένδυση. Εφόσον η διαδικασία εξαγωγής υποτίτλων ολοκληρωθεί, μπορεί να κάνει επισκόπηση και επεξεργασία αυτών των λεκτικών περιγραφών μέσω ενός πλαισίου κειμένου στο πάνω μέρος του μεσαίου πάνελ. Σε επόμενο βήμα γίνεται η επιλογή για ηχητικά εφέ ή ατμόσφαιρες και κάτω μέρος παρουσιάζονται οι λέξεις-κλειδιά που προκύπτουν από την ολοκλήρωση όλων των σταδίων επεξεργασίας. Τέλος, στο δεξί πάνελ παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα και αφορούν ήχους. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει προεπισκόπηση κάθε ήχου, να τον μεταφορτώσει στον Η/Υ του, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται μικρογραφίες σπεκτρογραμμάτων για μια γρήγορη οπτική επιθεώρηση του κάθε αντικειμένου ήχου.



Εικόνα 2 Στιγμιότυπο από την οθόνη της εφαρμογής

## 5 Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις

Τα πρώτα αποτελέσματα της διαμορφωτικής αξιολόγησης της εφαρμογής είναι ενθαρρυντικά. Το γεγονός μάλιστα ότι το *Sound Design Assistant* αποτελεί προϊόν λογισμικού, διευκολύνει την εύκολη και γρήγορη ανάπτυξη και τροποποίησή του. Όπως προαναφέρθηκε, η πρώτη βελτίωση που θα πραγματοποιηθεί, αφορά την in-house υλοποίηση του εργαλείου για image captioning ως web service και τη διαμόρφωση μιας νέας γραφικής διεπαφής για το αριστερό πάνελ της εφαρμογής. Αυτό θα βελτιώσει την εφαρμογή αισθητικά ενώ θα αναβαθμίσει σημαντικά την εμπειρία χρήσης, καθώς ο χρήστης δε θα χρειάζεται χειροκίνητα να μεταφέρει τις λεκτικές περιγραφές από το αριστερό πάνελ στο μεσαίο. Η δεύτερη βελτίωση αφορά τα λεξικά που χρησιμοποιούνται για την εύρεση συνώνυμων (ηχητικά) λέξεων και την διάκριση μεταξύ ατμοσφαιρών και λοιπών ηχητικών εφέ. Τέλος, η διεύρυνση της βιβλιοθήκης ήχων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στόχο. Πέρα από την αύξηση των ήχων που φιλοξενούνται στη βάση δεδομένων της εφαρμογής, εξετάζεται το ενδεχόμενο ενσωμάτωσης αποτελεσμάτων από ήδη εδραιωμένες online βιβλιοθήκες οπτικοακουστικού περιεχομένου, όπως το Freesound<sup>1</sup> ή το YouTube<sup>2</sup>.

## 6 Αναφορές

- [1] Gousios C. (2018). *Sound & Music in Cinema*. Slides, School of Film, AUTH.
- [2] Chion M., *Audio-Vision*, Columbia University Press, NY, 1990.
- [3] Yewdall D-L., *Practical Art of Motion Picture Sound*, Focal Press, MA, 2003.

<sup>1</sup> <https://freesound.org/>

<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/>



- [4] Whittington W., *Sound Design & Science Fiction*, University of Texas Press, TX, 2007.
- [5] Sonnenschein D., *Sound Design: The Expressive Power of Music, Voice and Sound Effects in Cinema*, Michael Wiese Productions, San Francisco, 2001.
- [6] Purcell J., *Dialogue Editing for Motion Pictures*, Focal Press, MA, 2007.
- [7] Vrysis, L., Hadjileontiadis, L., Thoidis, I., Dimoulas, C., Papanikolaou, G. (2021). Enhanced Temporal Feature Integration in Audio Semantics via Alpha-Stable Modeling. *Journal of the Audio Engineering Society*, 69(4), 227-237.
- [8] Hossain, M., Sohel, F., Shiratuddin, M., Laga, H. (2019). A comprehensive survey of deep learning for image captioning. *ACM Computing Surveys*, 51(6), 1-36.
- [9] Vrysis, L., Vryzas, N., Kotsakis, R., Saridou, T., Matsiola, M., Veglis, A., ... & Dimoulas, C. (2021). A web interface for analysing hate speech. *Future Internet*, 13(3), 80.
- [10] Gousios C., Vrysis L. (2021), An automated framework for supervising and managing field recordings for filmmaking. 6th Conference on Acoustic Ecology, Thessaloniki.
- [11] GitHub - milhidaka/chainer-image-caption, <http://github.com/milhidaka/chainer-image-caption>, (last access 10/9/2022).
- [12] M3C - People, <http://m3c.web.auth.gr/people/>, (last access 10/9/2022).
- [13] Stamatiadou, M., Vryzas, N., Vrysis, L., Saridou, T., Dimoulas, C. (2022). A citizen science approach to support joint air quality and noise monitoring in urban areas. In *Audio Engineering Society Convention* 152.

## **Εφαρμογές φωνητικών Chatbot στην δημοσιογραφία**

Ε. Κοτενίδης<sup>1</sup>  
Υπ.Δρ.  
efthimisko@gmail.com

Ν. Βρύζας<sup>1</sup>  
Μεταδρ. Έρευν.  
nvryzas@jour.auth.gr

Ρ. Κωτσάκης<sup>2</sup>  
Επικ. Καθηγητής  
rkotsakis@gmail.com

Α. Βέγλης<sup>1</sup>  
Καθηγητής  
veglis@jour.auth.gr

<sup>1</sup>Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

<sup>2</sup>Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα μελέτη εξετάζει την πιθανότητα ενσωμάτωσης φωνητικών τεχνολογιών στις παραδοσιακές δημοσιογραφικές διεργασίες και συγκεκριμένα την χρήση φωνητικών διαλογικών βοηθών (voicebot) τόσο για τον διαμοιρασμό ειδήσεων, όσο και για την συλλογή πληροφοριών εντός του επαγγέλματος. Η δημιουργία ενός προτεινόμενου αρθρωτού μοντέλου δίνει την δυνατότητα προσαρμογής της υλοποίησης ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο χρήσης και τις ανάγκες του δημοσιογράφου. Τεχνολογίες όπως η μοντελοποίηση θέματος και η ανάλυση συναισθήματος δύναται να αξιοποιηθούν για να υποστηρίξουν τις ήδη υπάρχουσες δημοσιογραφικές εργασίες, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η αυτοματοποίηση με αυτά μιας πλήρως ακουστικής διεπαφής.*

### **Voice Chatbot applications in journalism**

#### **ABSTRACT**

*The present study examines the possibility of integrating voice technologies into traditional journalistic processes, specifically the use of voice dialog assistants (voicebots) both for the processes of sharing news and for gathering information within the journalistic profession. The creation of a proposed modular model gives the possibility to adapt the implementation depending on the usage scenario and the needs of the journalist. Technologies such as topic modeling and sentiment analysis can be leveraged to support existing journalistic tasks, while combining the advantages of automation with those of a fully auditory interface.*

## Εισαγωγή

Οι διαλογικοί βοηθοί (chatbots) αποτελούν μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες καινοτομίες στον χώρο της δημοσιογραφίας την τελευταία δεκαετία. Οποιοδήποτε λογισμικό έχει δυνατότητα συνομιλίας με τον άνθρωπο υπό μορφή συζήτησης μπορεί να οριστεί ως chatbot, ωστόσο η συγκεκριμένη ορολογία απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν την ηλεκτρολόγηση για την είσοδο δεδομένων. Στην παρούσα έρευνα εξετάζεται ο ρόλος της ακουστικής διεπαφής σε αυτή την διαδικασία, με την αξιοποίηση φωνητικών διαλογικών βοηθών (voicebots). Τεχνολογίες αναγνώρισης φυσικής γλώσσας και παραγωγής ομιλίας αξιοποιούνται για την ενίσχυση της διαδραστικότητας του διαμοιρασμού ειδησεογραφικού περιεχομένου, διατηρώντας παράλληλα και πολλά από τα πλεονεκτήματα των συμβατικών chatbot.

### 1. Chatbot και Δημοσιογραφία

Η φύση του δημοσιογραφικού επαγγέλματος, δομημένη πάνω στον πυλώνα της επικοινωνίας, αποτέλεσε πολύ πρόσφορο έδαφος για την αξιοποίηση των chatbot κατά την τελευταία δεκαετία. Πολλοί δημοσιογραφικοί οργανισμοί στράφηκαν στην χρήση αυτοματοποιημένων προγραμμάτων με σκοπό την διατέλεση εργασιών οι οποίες στο παρελθόν πραγματοποιούνταν αποκλειστικά από ανθρώπινο δυναμικό [1], καθώς η λειτουργία των αλγοριθμικών αυτών διεργασιών έχει γίνει πολύ πιο αποτελεσματική [2]. Σχετικοί αυτοματισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί για μία πληθώρα επιμέρους εργασιών του επαγγέλματος (π.χ. ανίχνευση και η συλλογή πληροφοριών, αυτοματοποιημένη δημιουργία δημοσιογραφικού περιεχομένου [3]) Οι εφαρμογές που άπτονται της στόχευσης της παρούσας έρευνας σχετίζονται περισσότερο με την επικοινωνία και συγκεκριμένα με την μεταφορά πληροφοριών μεταξύ του κοινού και του δημοσιογράφου ή του ειδησεογραφικού οργανισμού.

Μία εκ των πιο διαδεδομένων χρήσεων προγραμμάτων chatbot στη σφαίρα των μέσων μαζικής επικοινωνίας αποτελεί ο διαμοιρασμός ειδησεογραφικού περιεχομένου στο διαδίκτυο [4]. Τα λεγόμενα News Bots αποτελούν διαδραστικά μέσα διαμοιρασμού ειδήσεων και δρουν κατά κύριο λόγο σε ιστοσελίδες κοινωνικής δικτύωσης όπως το Facebook και το Twitter [5]. Μέσω των συγκεκριμένων chatbot εγκαθιδρύθηκε η δυνατότητα συστηματικής, αυτοματοποιημένης και διαδραστικής επικοινωνίας με το κοινό [6], με τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου να γίνονται γρήγορα αντιληπτά από τους παρόχους των ειδήσεων οι οποίοι δεν άργησαν να τα ενσωματώσουν στη διαδικασία διαμοιρασμού περιεχομένου, καθιστώντας σαφές πως η αυτοματοποίηση θα αποτελέσει κείμενο τμήμα της επικοινωνιακής στρατηγικής των μέσων μαζικής ενημέρωσης στο άμεσο μέλλον [7].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτέλεσε η αξιοποίηση chatbot από ορισμένους εκ των μεγαλύτερων ειδησεογραφικών οργανισμών παγκοσμίως. Το 2016, που χαρακτηρίστηκε ως «η χρονιά των chatbot» [8], αποτέλεσε σημείο-κλειδί για την εισροή τους στο δημοσιογραφικό επάγγελμα και συγκεκριμένα στον αυτοματοποιημένο διαμοιρασμό περιεχομένου. Σημαντικός παράγοντας ήταν η απόφαση του Facebook να «ανοίξει» το οικοσύστημά του, υποστηρίζοντας πλέον εγγενώς τα chatbot, σηματοδοτώντας μία καμπή στην ενσωμάτωσή τους στα κοινωνικά δίκτυα. Η βρετανική εφημερίδα The Guardian, πριν το τέλος του έτους είχε

ήδη θέσει σε λειτουργία chatbot, βασισμένο στην αρχή της επικοινωνίας με το αναγνωστικό της κοινό, μέσω της αποστολής άρθρων, ενημερώσεων και ειδήσεων ανά κατηγορία, αναλόγως με τα ενδιαφέροντα του εκάστοτε χρήστη [9]. Η συγκεκριμένη προσπάθεια ήρθε σε συνέχεια προηγούμενης απόπειρας το 2014, όπου η εφημερίδα είχε πειραματιστεί με ένα πρότυπο chatbot με σκοπό την σύνταξη μικρών κειμένων με αυτόματο τρόπο [10]. Παρότι η ενσωμάτωση των chatbot στην διαδικασία διαμοιρασμού ειδήσεων βρισκόταν ακόμα σε βρεφικά στάδια, παρόμοια παραδείγματα προερχόμενα από άλλους κολοσσούς της βιομηχανίας των ειδήσεων δεν άργησαν να κάνουν την εμφάνισή τους, με το CNN και την The Washington Post να θέτουν σε λειτουργία τις δικές τους εκδόσεις αντίστοιχων διαδραστικών chatbot για διαμοιρασμό ειδήσεων μέσω της πλατφόρμας του Facebook Messenger [11].

## **2. Πλεονεκτήματα Φωνητικής Διεπαφής**

Στη συντριπτική πλειονότητά τους, τα chatbot που επιστρατεύονται για εμπορικούς σκοπούς χρησιμοποιούν το γραπτό κείμενο ως μέθοδο αλληλεπίδρασης με τον χρήστη [12]. Το ίδιο παρατηρείται και στον τομέα της δημοσιογραφίας. Η χρήση του πληκτρολογίου αποτελεί την επικρατέστερη μέθοδο ανταλλαγής πληροφοριών με ψηφιακές εφαρμογές, καθότι το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται δοκιμασμένο και προσβάσιμο. Ωστόσο, η ραγδαία βελτίωση τεχνικών αυτοματοποιημένης αναγνώρισης ομιλίας τα τελευταία χρόνια (speech-to-text), έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση ολοένα και περισσότερων διαφορετικών μεθόδων εισαγωγής βασισμένων στις φωνητικές εντολές, οι οποίες θεωρούνται η πιο φυσική και αποτελεσματική μέθοδος επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων [13].

Η φωνητική διεπαφή προσφέρει μια σειρά πλεονεκτημάτων έναντι των παραδοσιακών τρόπων αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής, σε διάφορα πεδία εφαρμογής [14,15]. Η ενσωμάτωσή της ωστόσο στον τομέα των chatbot παραμένει ακόμα σε πρώιμα στάδια, με εξαίρεση την ειδική κατηγορία των ψηφιακών βοηθών,. Η χρήση φωνητικών εντολών στα chatbot φαίνεται να κερδίζει έδαφος σταδιακά τα τελευταία χρόνια [16,17], ενώ ευρήματα προηγούμενων ερευνών έχουν καταδείξει πως παρουσιάζει πλεονεκτήματα τόσο στην απόδοση, όσο και στην αντίληψη των χρηστών έναντι της πληκτρολόγησης, ιδιαίτερα όσον αφορά άτομα μεγαλύτερης ηλικίας [18]. Έρευνες σχετικά με τα κίνητρα των χρηστών παρουσιάζουν διαφορετικές αντιδράσεις έναντι διαφορετικών μεθόδων εισαγωγής, ανάλογα με τους παράγοντες που περιβάλλουν την εκάστοτε αλληλεπίδραση [19]. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις αποτελούν κίνητρα για την πιθανή αξιοποίηση φωνητικών chatbot και στο δημοσιογραφικό επάγγελμα, καθότι ο τομέας των σύγχρονων μέσων μαζική ενημέρωσης βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην αρχή της διαδραστικότητας και της διατήρησης της προσοχής του κοινού [20], δύο πτυχές οι οποίες αξίζει να μελετηθούν υπό το πρίσμα μίας πλήρως ακουστικής διεπαφής.

## **3. Προτεινόμενος Τρόπος Υλοποίησης**

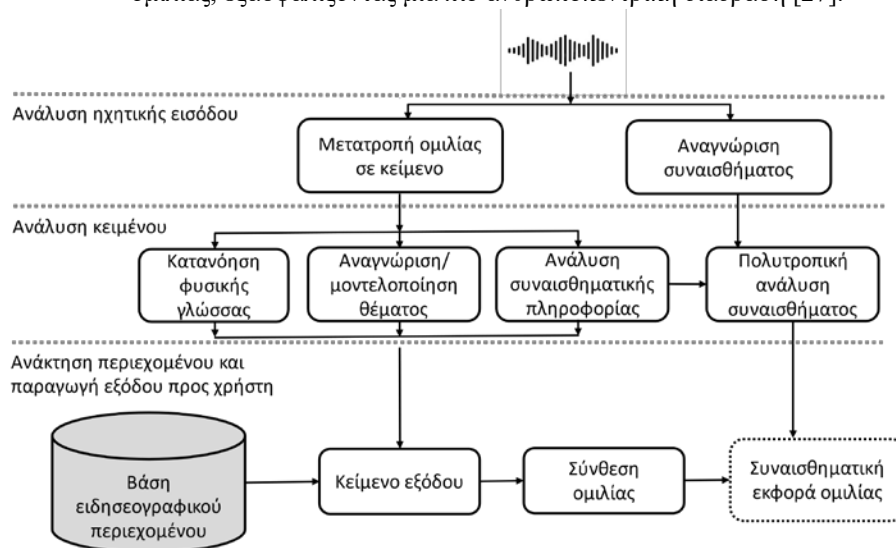
Για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας αναγνωρίζονται τα διακριτά στάδια ανάλυσης της εισόδου από τον χρήστη για την εξαγωγή αξιοποιήσιμης πληροφορίας, η προσπέλαση του διαθέσιμου περιεχομένου με βάση αυτή την πληροφορία και τελικά η παραγωγή περιεχομένου ως έξοδο προς τον χρήστη. Στην απλούστερη

περίπτωση τα chatbot παρέχουν έναν αριθμό πεπερασμένων και προκαθορισμένων επιλογών. Η ηχητική είσοδος του χρήστη αναλύεται για να αντιστοιχηθεί σε κάποια από τις πιθανές επιλογές του μέσω ενός συστήματος μετατροπής ομιλίας σε κείμενο και αντιστοίχισης του κειμένου με τα αντίστοιχα κείμενα των διαθέσιμων επιλογών. Σε πιο σύνθετες αρχιτεκτονικές, το chatbot μπορεί να εξάγει σημασιολογική πληροφορία από την είσοδο, μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης, την οποία να χρησιμοποιήσει για τη σύνθεση πρωτότυπου περιεχομένου, με βάση το διαθέσιμο ειδησεογραφικό περιεχόμενο. Τα στάδια της διάδρασης βασίζονται σε επιμέρους διαθέσιμες τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να παρέχονται ως υπηρεσίες (services) υλοποιώντας μία αρθρωτή (modular) αρχιτεκτονική (Σχήμα 3.1).

1. Ανάλυση ηχητικής εισόδου χρήστη
  - a. Μετατροπή ομιλίας σε κείμενο (Speech-to-text). Αφορά τη δημιουργία κειμένου από την ηχητική είσοδο του χρήστη. Μπορεί να περιέχει τμήμα ανίχνευσης φωνητικής δραστηριότητας (Voice Activity Detection) για τον εντοπισμό των σημείων όπου θα εφαρμοστεί η αυτόματη αναγνώριση ομιλίας [21].
  - b. Αναγνώριση συναισθήματος ομιλίας (Speech Emotion Recognition). Μέρος της πληροφορίας του λόγου δεν μπορεί να αποδοθεί μέσω της καταγραφής των λεγόμενων. Η επιπλέον πληροφορία αφορά τα εξωγλωσσικά χαρακτηριστικά εκφοράς του λόγου και μπορεί να αναφέρεται στη συναισθηματική κατάσταση του χρήστη, τη χρήση σαρκασμού ή ειρωνίας κλπ. Μοντέλα βαθιάς μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή αυτής της πληροφορίας [22].
2. Ανάλυση πληροφορίας κειμένου
  - a. Κατανόηση φυσικής γλώσσας (Natural Language Understanding). Όταν η ομιλία του χρήστη δεν αντιστοιχείται σε κάποια επιλογή κλειστού συνόλου, είναι απαραίτητη η εξαγωγή γνώσης με βάση την ανάλυση της κειμενικής πληροφορία [23].
  - b. Μοντελοποίηση και αναγνώριση θέματος (topic modeling, topic recognition). Αναφέρεται στη μη επιτηρούμενη εξαγωγή του θέματος ενός κειμένου [24].
  - c. Ανάλυση συναισθήματος κειμένου. Πρόκειται για την εξαγωγή συναισθηματικής πληροφορίας, συχνά του βαθμού πόλωσης (θετική, αρνητική, ουδέτερη) [24].
3. Ανάκτηση πληροφορίας από τη βάση δεδομένων ειδησεογραφικού περιεχομένου. Εφαρμόζοντας τεχνικές ανάλυσης πληροφορίας κειμένου στην είσοδο του χρήστη, αλλά και στο διαθέσιμο περιεχόμενο, είναι δυνατό να γίνει μια αντιστοιχία κειμένων που μπορεί να ενδιαφέρουν τον χρήστη. Παράλληλα, η ανάλυση της συναισθηματικής πληροφορίας του κειμένου μπορεί να συνδυαστεί με την ανακτημένη πληροφορία συναισθηματικής εκφοράς ομιλίας για ένα πιο εύρωστο σύστημα πολυτροπικής αναγνώρισης της συναισθηματικής κατάστασης του χρήστη.

#### 4. Παραγωγή ηχητικής εξόδου

- a. Παραγωγή του κειμένου εξόδου. Αφού έχει προηγηθεί η ανάλυση της εισόδου και η ανάκτηση του σχετικού περιεχομένου, πρέπει να παραχθεί η έξοδος του συστήματος. Στην έξοδο μπορεί να παρατίθενται τα προτεινόμενα άρθρα, βίντεο κλπ, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές παραγωγής πρωτότυπου κειμένου, δίνοντας μία αίσθηση πιο ανθρωποκεντρικής διάδρασης, ή παρέχοντας πληροφορίες όπως εξαγωγής περίληψης (summarization) για την πιο αποδοτική ενημέρωση του χρήστη [25].
- b. Σύνθεση ομιλίας. Για ένα σύστημα αμφίδρομης ηχητικής διάδρασης, το chatbot πρέπει να μπορεί να συνθέσει την έξοδο που παράχθηκε ως κείμενο σε ομιλία. Αυτό θα γίνει με βάση κάποιο μοντέλο σύνθεσης ομιλίας (speech synthesis) που θα παράξει την ηχητική έξοδο [26].
- c. Σύνθεση ομιλίας με συναισθηματική επίγνωση. Σε ένα σύστημα που εμπεριέχει τεχνολογίες αναγνώρισης συναισθήματος όπως περιγράφηκε, αυτή η πληροφορία μπορεί να είναι κομμάτι του συστήματος σύνθεσης ομιλίας, εξασφαλίζοντας μια πιο ανθρωποκεντρική διάδραση [27].



Σχήμα 3.1 Προτεινόμενη αρθρωτή υλοποίηση μοντέλου

#### 4. Επιμέρους Δημοσιογραφικές Εφαρμογές

Είναι εμφανές πως ο τομέας της δημοσιογραφίας μπορεί να επωφεληθεί από την αφομοίωση τέτοιων τεχνολογιών, τόσο στις διαδικασίες διαμοιρασμού ειδήσεων, όσο και συλλογής πληροφοριών. Η αρθρωτή υλοποίηση ενός ειδικού φωνητικού συστήματος για δημοσιογραφικές εφαρμογές όπως περιγράφεται, είναι ικανή να προσδώσει χαρακτηριστικά όπως η αμεσότητα και η διαδραστικότητα στις προαναφερθείσες διαδικασίες, ενώ παράλληλα να ενισχύσει και την προσβασιμότητά

τους, καθιστώντας τες προσπελάσιμες από ορισμένες κατηγορίες του αναγνωστικού κοινού οι οποίες αντιμετωπίζουν προβλήματα με τις τυπικές μορφές αλληλεπίδρασης, όπως η πληκτρολόγηση [18].

Βασικότερο σενάριο χρήσης για ένα δημοσιογραφικό voicebot αποτελεί ο διαμοιρασμός ειδήσεων υπό μορφή «συζήτησης» με το αναγνωστικό κοινό. Συγκεκριμένα η υπηρεσία μπορεί να παρέχεται είτε μέσω τηλεφωνικής κλήσης, είτε μέσω κάποιου ειδησεογραφικού portal. Η εξαγωγή πληροφορίας από φυσικό λόγο απομονώνει δεδομένα από την είσοδο του ομιλητή και κατόπιν επεξεργασίας δύναται να επιστρέψει προσαρμοσμένα αποτελέσματα, βασισμένα είτε σε λέξεις-κλειδιά, είτε στο επιμέρους νόημα των λεγόμενων του ομιλητή. Το voicebot αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο επικοινωνίας μεταξύ κοινού και δημοσιογραφικού οργανισμού, μεταφέροντας πληροφορίες από τη διεπαφή (front-end) στην πλατφόρμα όπου μπορούν να αξιοποιηθούν (back-end) αντιστοιχώντας τα λεγόμενα του χρήστη σε ειδησεογραφικό περιεχόμενο που ταιριάζει περισσότερο στο αίτημά του, από το διαθέσιμο αποθετήριο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη σύνθεση ομιλίας και την παραγωγή ηχητικής εξόδου βασισμένης στο συγκεκριμένο περιεχόμενο. Μία επαρκώς εξοπλισμένη αλγοριθμική λύση θα είναι ικανή όχι μόνο να μετατρέψει το κείμενο εξόδου σε ομιλία, αλλά παράλληλα να παρέχει και την δυνατότητα σύμπτυξης και μετάδοσης των σημαντικότερων πληροφοριών (summarization) με σκοπό την επίτευξη μιας πιο ανθρωποκεντρικής αλληλεπίδρασης.

Μια σημαντική πιθανή εφαρμογή είναι η διεργασία συλλογής πληροφοριών, που μπορεί να επεκταθεί ακόμα και σε ανάλυση συναισθήματος με σκοπό την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Η χρήση chatbot και παρόμοιων τεχνολογιών για συλλογή πληροφοριών στο δημοσιογραφικό επάγγελμα είναι ένα εγχείρημα το οποίο έχει μελετηθεί [11], ωστόσο η ενσωμάτωση φωνητικής αλληλεπίδρασης σε αυτή την διαδικασία - εκτός από τα οφέλη στον τομέα της προσβασιμότητας που αναλύθηκαν παραπάνω - αναμένεται επίσης να αυξήσει την ταχύτητα ολοκλήρωσης σχετικών αλληλεπιδράσεων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό όταν οι μεταδιδόμενες πληροφορίες σχετίζονται με καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, ή με περιβάλλοντα στα οποία υφίστανται χρονικοί περιορισμοί. Παράλληλα, η διευκόλυνση της διαδικασίας αποτελεί επίσης και ένα σημαντικό κίνητρο για οποιονδήποτε ιδιώτη επιθυμεί να μοιραστεί πληροφορίες με έναν δημοσιογραφικό οργανισμό.

Η χρήση ενός δημοσιογραφικού voicebot ικανού να επικοινωνήσει με φυσικό τρόπο με το κοινό και να συλλέξει πληροφορίες, παρουσιάζει πλεονεκτήματα και στον τρόπο αξιοποίησης των συλλεγόμενων δεδομένων. Συγκεκριμένα, ένα φωνητικό μοντέλο ικανό να μετατρέψει την είσοδο του χρήστη σε κείμενο μέσω διαδικασίας speech-to-text δύναται στην συνέχεια να αποθηκεύσει και να κατηγοριοποιήσει τα στοιχεία αυτά ως δομημένα δεδομένα για μελλοντική χρήση από τον αποδέκτη-δημοσιογράφο. Η τεχνολογία αναγνώρισης θέματος (topic recognition) μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάθεση των συλλεγόμενων δεδομένων σε ξεχωριστές κατηγορίες ανάλογα με το ζήτημα που αυτές πραγματεύονται, τον βαθμό στον οποίο επείγουν και φυσικά με διάφορες επιμέρους καταταμίσεις οι οποίες πηγάζουν από τις εκάστοτε ανάγκες του δημοσιογράφου, όπως για παράδειγμα η ώρα συλλογής τους. Η μετατροπή φυσικού διαλόγου σε γραπτή πληροφορία συνοδεύεται από διττή χρησιμότητα. Αφενός τα δεδομένα αυτά είναι κατηγοριοποιημένα ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα από τον αποδέκτη τους και αφετέρου η αποθήκευσή τους ως δομημένα δεδομένα προσφέρεται για την μετέπειτα αξιοποίησή τους ως είσοδος σε άλλα τμήματα μίας αρθρωτής υλοποίησης, όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω.

## 5. Συμπεράσματα

Το δημοσιογραφικό επάγγελμα βρίσκεται αναμφίβολα σε μία διαδικασία αναπροσαρμογής, ένεκα των αυτοματοποιημένων στοιχείων που έχουν εισχωρήσει σε αυτό κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτό το μοτίβο, η παρούσα εργασία εξετάζει την πιθανή αφομοίωση φωνητικών διεργασιών στις παραδοσιακές λειτουργίες του δημοσιογραφικού επαγγέλματος και συγκεκριμένα την ενσωμάτωση έξυπνων διαλογικών βοηθών με την δυνατότητα φωνητικής αλληλεπίδρασης. Τα πιθανά πλεονεκτήματα μιας τέτοιας καινοτομίας είναι πολλά και διαφέρουν ανάλογα με τα επιμέρους κομμάτια της υλοποίησης, αλλά μπορούν να συνοψιστούν κυρίως στους τομείς της διαδραστικότητας, της ευχρηστίας και της προσβασιμότητας. Με βάση τα παραπάνω, ένα voicebot με δυνατότητες αναγνώρισης και μοντελοποίησης θέματος είναι ικανό να διαμοιράσει ειδήσεις με έναν πολύ πιο φυσικό και ανθρωποκεντρικό τρόπο συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους επικοινωνίας. Αντιστοίχως, οι δυνατότητες αυτές μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν και για την συλλογή πληροφοριών, με ακόμα πιο εξατομικευμένα αποτελέσματα, κατόπιν ενσωμάτωσης ανάλυσης συναισθήματος. Σε κάθε περίπτωση, οι προεκτάσεις της ενσωμάτωσης φωνητικών chatbot στην δημοσιογραφία αξίζει να μελετηθούν, τόσο υπό το πρίσμα της διατήρησης της προσοχής του κοινού, όσο και σχετικά με την πιθανότητα βελτίωσης της πρόσβασης συγκεκριμένων κοινωνικών ομάδων σε ορισμένες υπηρεσίες, καθώς συνδυάζουν όλα τα οφέλη που παρέχονται από την αυτοματοποίηση με τα πλεονεκτήματα μιας πλήρους φωνητικής διεπαφής.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Clerwall C. Enter the robot journalist: Users' perceptions of automated content. *Journalism practice*, **8**, 519–31 (2014).
- [2] Valtolina S, Barricelli BR. Chatbots and Conversational Interfaces: Three Domains of Use. 9 (2018).
- [3] Kotenidis E, Veglis A. Algorithmic Journalism—Current Applications and Future Perspectives. *Journalism and Media*, **2**, 244–57 (2021).
- [4] Jones B, Jones R. Public service chatbots: Automating conversation with BBC News. *Digital Journalism*, **7**, 1032–53 (2019).
- [5] Lokot T, Diakopoulos N. News Bots: Automating news and information dissemination on Twitter. *Digital Journalism*, **4**, 682–99 (2016).
- [6] Veglis A, Maniou TA. Chatbots on the Rise: A New Narrative in Journalism. *SMC*, **7**, 1 (2019).
- [7] Lindén C-G, Tuulonen H, Bäck A, Diakopoulos N, Granroth-Wilding M, Haapanen L, Leppänen L, Melin M, Moring T, Munezero M. News automation: The rewards, risks and realities of 'machine journalism', WAN-IFRA, 2019.
- [8] Dale R. The return of the chatbots. *Nat. Lang. Eng.*, **22**, 811–7 (2016).
- [9] Good N, Wilk C. Introducing the Guardian Chatbot, 2016.
- [10] Gani A, Haddou L. Could robots be the journalists of the future?, 2014.
- [11] Veglis A, Kotenidis E. Employing chatbots for data collection in participatory journalism and crisis situations. *Journal of Applied Journalism & Media Studies*, (2020).



- [12] Agushinta R. D, Rindani F, Kurniawan A, Anggari E, Akbar R. TOWARDS ADVANCED DEVELOPMENT OF CYBORG INTELLIGENCE. *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer*, **23**, 201–11 (2018).
- [13] Furui S, Kikuchi T, Shinnaka Y, Hori C. Speech-to-Text and Speech-to-Speech Summarization of Spontaneous Speech. *IEEE Trans. Speech Audio Process.*, **12**, 401–8 (2004).
- [14] Maskeliunas R, Ratkevicius K, Rudzionis V. Voice-based Human-Machine Interaction Modeling for Automated Information Services. *Elektronika ir Elektrotechnika*, **110**, 109–12 (2011).
- [15] Reimer B, Mehler B. The Effects of a Production Level “Voice-Command” Interface on Driver Behavior: Summary Findings on Reported Workload, Physiology, Visual Attention, and Driving Performance. 19 (2013).
- [16] Abdul-Kader SA, Woods JC. Survey on chatbot design techniques in speech conversation systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, **6**, (2015).
- [17] Goel P, Ganatra A. A Survey on Chatbot: Futuristic Conversational Agent for User Interaction, 2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication (ICPSC), 2021, IEEE, pp.736–40.
- [18] Smith AL, Chaparro BS. Smartphone Text Input Method Performance, Usability, and Preference With Younger and Older Adults. *Hum Factors*, **57**, 1015–28 (2015).
- [19] Weber P, Ludwig T. (Non-)Interacting with conversational agents: perceptions and motivations of using chatbots and voice assistants, Proceedings of the Conference on Mensch und Computer, New York, NY, USA, 6 September, 2020, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp.321–31.
- [20] Boczkowski PJ. *Digitizing the news: Innovation in online newspapers*. mit Press, (2005).
- [21] Nassif AB, Shahin I, Attili I, Azzeh M, Shaalan K. Speech recognition using deep neural networks: A systematic review. *IEEE access*, **7**, 19143-19165, (2019).
- [22] Vryzas N, Vrysis L, Matsiola M, Kotsakis R, Dimoulas C., Kalliris G. Continuous speech emotion recognition with convolutional neural networks. *Journal of the Audio Engineering Society*, **68**(1/2), 14-24, (2020).
- [23] Qiu X, Sun T, Xu Y, Shao Y, Dai N, Huang X. Pre-trained models for natural language processing: A survey. *Science China Technological Sciences*, **63**(10), 1872-1897, (2020).
- [24] Vrysis L, Vryzas N, Kotsakis R, Saridou T, Matsiola M, Veglis A, ... Dimoulas C. A web interface for analyzing hate speech. *Future Internet*, **13**(3), (2021).
- [25] El-Kassas WS, Salama CR, Rafea AA, Mohamed HK. Automatic text summarization: A comprehensive survey. *Expert Systems with Applications*, **165**, 113679, (2021).
- [26] Ning Y, He S, Wu Z, Xing C, Zhang LJ. A review of deep learning based speech synthesis. *Applied Sciences*, **9**(19), 4050, (2019).
- [27] James J, Balamurali BT, Watson CI, MacDonald B. Empathetic speech synthesis and testing for healthcare robots. *International Journal of Social Robotics*, 1-19, (2020).

## **Ακουστική Μελέτη Διαμόρφωσης Υφιστάμενου Κτιρίου σε Έναν Ολοκληρωμένο Πολυχώρο Μουσικής Εξάσκησης και Ηχογραφήσεων**

Καπετανάς Δ.,  
Διπλ Μηχ/ΜΔΕ ΕΑΠ  
[kapetanasdimitris@gmail.com](mailto:kapetanasdimitris@gmail.com)

Δημούλας Χ.,  
Αναπλ. Καθηγητής ΑΠΘ,  
[babis@eng.auth.gr](mailto:babis@eng.auth.gr)

Μουρτζόπουλος Ι.,  
Καθ. Παν. Πατρών,  
[mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή και προτυποποίηση των εργασιών μετατροπής ενός υφιστάμενου κτιρίου σε πολυχώρο μουσικής εξάσκησης - ηχογραφήσεων. Συγκεκριμένα εξετάζεται και ανακατασκευάζεται υφιστάμενο ισόγειο κτίριο, εμβαδού 290 m<sup>2</sup> και ύψους 4,70 m, εντός αστικού ιστού. Αρχικά λαμβάνει χώρα βιβλιογραφική επισκόπηση θεμάτων κτιριακής ακουστικής αλλά και διερεύνηση σύγχρονων μεθόδων σχεδιασμού, μέσω λογισμικού μοντελοποίησης και αξιολόγησης κατασκευαστικών λεπτομερειών. Στη συνέχεια, αποτιμάται η υφιστάμενη κατάσταση και προσδιορίζονται οι προς διερεύνηση περιορισμοί σχεδιασμού. Έτσι, καθορίζεται η εσωτερική διαρρύθμιση του κτιρίου σε σχέση με τις αρχές κυματικής θεωρίας, τις προδιαγραφές αναλογίας διαστάσεων, τις απαιτήσεις λειτουργίας και τον λειτουργικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, ενώ πραγματοποιούνται και προσομοιώσεις ακουστικής ανάλυσης των χώρων. Τέλος εξετάζεται η απαιτούμενη ηχομονωτική ικανότητα του κτιρίου (εσωτερικά και εξωτερικά), επιλέγοντας τις κατάλληλες διατάξεις ηχομόνωσης σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Απώτερος σκοπός είναι η εξαγωγή-αποτίμηση βέλτιστων πρακτικών που θα μπορούν να εφαρμοστούν σε αντίστοιχες περιπτώσεις*

### **Acoustical Design for the Conversion of an Existing Building to an Integrated Area for Music Rehearsal and Sound Recordings**

#### **ABSTRACT**

*This paper aims at recording and prototyping the dedicated procedures for the conversion of an existing building shell into an integrated area for music rehearsal and sound recordings. Specifically, an existing urban ground floor building, with total area of 290 m<sup>2</sup> and height of 4.70 m, is being analyzed and redesigned. Initially, a review of the literature on building acoustics, computer based modern design methods and construction detailing is carried out. In the next step the existing layout of the building is being imprinted and reviewed, to identify constraints to be considered during the design phase. Internal layout alternatives are then analyzed and compared, according to wave theory, proportional dimensions of rooms, parallel activities and functional architectural design. The acoustic performance of the interior is being carried out through room simulation models. The required sound insulation capacity of all rooms and the building shell is next calculated. The outmost target is to extract and test best practices that can be used in similar cases.*

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια Διπλωματικής Εργασίας που έλαβε χώρα στο πλαίσιο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Ακουστικός Σχεδιασμός & Ψηφιακός Ήχος» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-20. Η εργασία επιχειρεί να συνδυάσει τα επιτεύγματα της Ακουστικής επιστήμης με σύγχρονα εργαλεία υπολογισμών, μοντελοποιήσεων/προσομοιώσεων και ακουστικών μετρήσεων, με σκοπό την ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών ολιστικής αντιμετώπισης κατά την εκπόνηση αντίστοιχων ακουστικών μελετών.

Ο σχεδιασμός χώρων με υψηλές ακουστικές απαιτήσεις προϋποθέτει την αναλυτική διερεύνηση των φυσικών φαινομένων σε σχέση με τις ιδιότητες του ήχου, και κατά συνέπεια την εκπόνηση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού βάσει αυτών. Αυτός ο τρόπος ανάλυσης αποκλίνει ουσιαστικά από το συμβατικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και συχνά οδηγεί σε αντικρουόμενα επιθυμητά αποτελέσματα με αυτόν. Κατά συνέπεια η ορθή μεθοδολογία καθίσταται καταρχάς πολύπλοκη για το μελετητή μηχανικό, ιδιαιτέρως δε στην περίπτωση σχεδιασμού χώρων υψηλών ακουστικών απαιτήσεων σε υφιστάμενες κατασκευές.

Πυρήνας της μελέτης είναι οι αρχές της επιστήμης της Ακουστικής, ο σχεδιασμός μέσω σύγχρονων πρακτικών και η λεπτομερής ανάλυση που μπορεί να προσφέρει η εκμετάλλευση εξειδικευμένων λογισμικών ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ανάπτυγμα της είναι η εφαρμογή των κείμενων προδιαγραφών, σε συνάρτηση με τους περιορισμούς που προκύπτουν σε μία υφιστάμενη κατασκευή. Ενδεικτικά αναφέρονται οι χωρικοί περιορισμοί του κτιρίου, η εξασφάλιση επαρκούς ηχομόνωσης σε σχέση με τις όμορες κατοικίες, οι πολεοδομικοί κανονισμοί κλπ.

Δεδομένης της πληθώρας των μεταβλητών αυτών, την αλληλοεξάρτησή τους, αλλά και τη δυσκολία διόρθωσης σχεδιαστικών λαθών και παραλείψεων εκ των υστέρων, η εξειδίκευση του μελετητή μηχανικού σε θέματα ακουστικής και η γενικότερη τριβή του με κατασκευαστικά θέματα κτιριακών έργων κρίνεται καθοριστική.

### 1. Σκοπός της έρευνας

Ο σκοπός της εργασίας είναι η εκπόνηση μίας ολοκληρωμένης ακουστικής μελέτης σε υφιστάμενο κτίριο, με στόχο τη δυνατότητα χρήσης της ως κατευθυντήρια γραμμή καλής πρακτικής στην ανάλυση παρόμοιων περιπτώσεων σε συνθήκες «πραγματικού δομημένου περιβάλλοντος». Η μετατροπή ενός κτιρίου, αρχικά κατασκευασμένου για την κάλυψη άλλων δραστηριοτήτων, σε έναν ολοκληρωμένο πολυχώρο μουσικής εξάσκησης και ηχογραφήσεων αποτελεί ένα πολύ καλό υπόδειγμα για το σκοπό της έρευνας, καθώς θα πρέπει να συνδυαστούν οι αρχές της κτιριακής ακουστικής, οι απαιτήσεις λειτουργικότητας και οι επιθυμητές απαιτήσεις λειτουργίας του χώρου εντός ενός κτιριακού κελύφους μη τροποποιήσιμου.

### 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

Αρχικά αναλύεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο για το σχεδιασμό χώρων υψηλών ακουστικών προδιαγραφών, συμπεριλαμβανομένης και της επίτευξης ακουστικής

άνεσης μέσω της ηχητικής μόνωσής τους. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι παραδοσιακές αρχές της κυματικής και στατιστικής ανάλυσης και θεωρίας, αλλά και η γεωμετρική προσέγγιση, η οποία έχει επικρατήσει στις σύγχρονες μελέτες μέσω των δυνατοτήτων χρήσης λογισμικού (μέθοδος των ειδώλων, μέθοδος ανίχνευσης πορείας των ακτινών κλπ.).

Στη συνέχεια παρατίθενται οι αρχές της ανάλυσης σημάτων στο πεδίο του χρόνου και το πεδίο της συχνότητας, σύμφωνα με τις οποίες εξετάζεται η αλληλουχία εκπομπής πηγών – επίδρασης του δωματίου – τελικής αντίληψης από το δέκτη. Σύμφωνα με την ανάλυση ο εσωτερικός χώρος θεωρείται ενιαίο σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας, όπου ο ήχος σε κάθε σημείο λήψης συμπεριφέρεται ως άθροισμα του απευθείας «καθαρού» σήματος εκπομπής και των ανακλάσεων του. Βάσει της ανάλυσης σημάτων υπολογίζεται η κρουστική ενός χώρου και εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα ως προς την ποιότητα ακουστικής του. Δηλαδή η μέτρηση των παραμέτρων που περιγράφουν την ακουστική των κλειστών χώρων ανάγεται στην μέτρηση της κρουστικής απόκρισης του χώρου [1]. Με τον τρόπο αυτό εξετάζονται και μαθηματικά συναρτήσεις ακουστικών παραμέτρων, ορισμένες ως προς τη σημασία τους στο ηχητικό αποτέλεσμα.

Ως προς την ηχομονωτική ικανότητα παρουσιάζονται οι τρόποι μετάδοσης του ήχου σε κλειστούς χώρους, καθώς και οι κατηγορίες μετάδοσης του (αερόφερτος, κτυπογενής). Παρατίθενται τα διεθνή πρότυπα (DIN 4109, Κριτήρια NR και NC), καθώς και η Κείμενη Ελληνική Νομοθεσία (Κτιριοδομικός Κανονισμός, Άρθρο 12). Αναλύονται κατόπιν οι μέθοδοι υπολογισμού δείκτη ηχομείωσης αλλών και σύνθετων επιφανειών και η ηχομείωση αερόφερτου θορύβου, συνυπολογίζοντας τις πλευρικές μεταδόσεις. Παρουσιάζονται στη συνέχεια σύγχρονες πρακτικές (π.χ. δωμάτιο σε δωμάτιο), κατασκευαστικές μέθοδοι και καλές πρακτικές κατασκευής.

### 3. Μεθοδολογία εκπόνησης μελέτης

Ο ακουστικός σχεδιασμός εσωτερικών χώρων αποτελεί μία διαδικασία που βασίζεται άμεσα και έμμεσα σε διαφορετικούς τομείς και αρχές της επιστήμης και της τέχνης. Συνδέεται άμεσα με την ακουστική, την κυματική, την αρχιτεκτονική, την επιστήμη των υλικών και τη μουσική, αλλά είναι ουσιαστικά εξαρτώμενος και από άλλους αντικρουόμενους τομείς, όπως η μελέτη συστημάτων εξαιρισμού, η στατική επάρκεια της κατασκευής καθώς και οι κείμενες πολεοδομικές διατάξεις, οι διατάξεις πυροπροστασίας κλπ. [2]. Ορίζεται συνεπώς από την αρχή συγκεκριμένη και στρατηγική μεθοδολογία εκπόνησης της μελέτης, βάσει υφιστάμενων προτύπων και προδιαγραφών (EBU, ITU, Louden κλπ.), σε συνδυασμό με τους προς διερεύνηση περιορισμούς του εξεταζόμενου κτιρίου.

Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί τον κατακερματισμό της διερεύνησης σε φάσεις, οι οποίες θα πρέπει να συνδυαστούν ως προς την αλληλουχία τους, λαμβάνοντας υπόψη «αδιαπραγμάτευτα» τις αρχές του ακουστικού σχεδιασμού σε κάθε στάδιο. Ως γενικές αρχές αναφέρονται ενδεικτικά ο χρόνος αντήχησης, η πιστότητα, οι αναλογίες διαστάσεων, ο όγκος και το σχήμα των σχεδιαζόμενων χώρων και η επιθυμητή ηχομονωτική ικανότητα ως προς το εσωτερικό της κατασκευής και το εξωτερικό αστικό περιβάλλον.



Σχήμα 1 Συνοπτική πορεία αλληλουχίας ακουστικού σχεδιασμού κατά τη μελέτη

#### 4. Υφιστάμενη κατάσταση

Το ακίνητο είναι ισόγειο, έχει εμβαδόν κάλυψης  $290 \text{ m}^2$ , και ύψος  $4,70 \text{ m}$ . Αποτελείται από έναν κυρίως χώρο ορθογώνιας διάταξης, ιδιαίτερα μακρόστενο ( $34,24 \text{ m} \times 12,61 \text{ m}$ ), και έναν προθάλαμο ύψους  $2,90 \text{ m}$ . Ο φέρων οργανισμός είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ η περιμετρική τοιχοποιία αποτελείται από διπλή δρομική οπτοπλινθοδομή και λιθοδομή. Ιδιαίτερα η Νοτιοανατολική πλευρά του κτιρίου αποτελείται από τοιχεία σκυροδέματος, έως και το μισό του ύψους του κτιρίου, ενώ η λοιπή επιφάνεια καλύπτεται από ανοιγόμενους υαλοπίνακες, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους στα σημεία των υποστυλωμάτων. Η πλάκα της οροφής τόσο στον κυρίως χώρο, όσο και στον προθάλαμο είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το ακίνητο συνορεύει με τα όρια του οικοπέδου στις δύο πλευρές του, ενώ οι αποστάσεις του από τα όμορα κτίρια είναι μικρές ( $2,83 \text{ m}$  και  $4,21 \text{ m}$  στη Βορειοδυτική και Νοτιοανατολική πλευρά του αντίστοιχα). Ως προς τους πολεοδομικούς περιορισμούς της περιοχής, και για λόγους που ξεφεύγουν από την παρούσα εργασία, λαμβάνεται ως δεδομένο ότι επεκτάσεις πέρα από το εμβαδόν κάλυψης του οικοπέδου ( $290 \text{ m}^2$ ) είναι ανέφικτες.

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται ο χώρος χαρακτηρίζεται αμιγούς κατοικίας. Με την παραδοχή ότι ο πολυχώρος υπάγεται νομοθετικά στα κέντρα διασκέδασης και ότι για περιοχές όπου υπάρχουν μόνο κατοικίες, το όριο θορύβου στα όρια του οικοπέδου καθορίζεται στα  $30 \text{ dB[A]}$ .

## 5. Καθορισμός χρήσης και προσδιορισμός εναλλακτικών επιλογών

Βάσει του προηγούμενου σκέλους καθορίζονται οι χωρικοί και κατασκευαστικοί περιορισμοί που λαμβάνονται υπόψη κατά τον ακουστικό σχεδιασμό και εξετάζονται οι λειτουργικά εφαρμόσιμες εναλλακτικές διάταξης, βάσει των γενικών αρχών ακουστικού σχεδιασμού. Προσδιορίζονται κατά συνέπεια εξ' αρχής το σύνολο των χρήσεων, η ανάγκη παράλληλης κάλυψης διαφορετικών δραστηριοτήτων, η διασύνδεση των αιθουσών για την επίτευξη λειτουργικότητας, οι προσβάσεις, οι απαιτήσεις σε δευτερεύοντες/ βοηθητικούς χώρους κλπ.

Στο σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη κατά προτεραιότητα παράμετροι όπως το ελάχιστο όριο επιτρεπτού όγκου αίθουσας, η σωστή αναλογία διαστάσεων, η αποφυγή κατασκευής παράλληλων επιφανειών για την επίτευξη καλής ακουστικής απόκρισης, το ελάχιστο πάχος διάκενου μεταξύ των εσωτερικών διαχωριστικών, το ελάχιστο πάχος των εξωτερικών τοιχοποιιών και η κατασκευή προθαλάμων για την επίτευξη της απαιτούμενης ηχομονωτικής ικανότητας.

Εξερχόμενο του σκέλους αυτού είναι η προδιαστασιολόγηση του πολυχώρου, ο οποίος βέλτιστα εμπεριέχει δύο αίθουσες ηχογράφησης και μουσικής εξάσκησης, δύο αίθουσες ελέγχου, καθώς και όλους τους απαραίτητους χώρους λειτουργίας του (WC, διάδρομοι). Εν κατακλείδι στο βήμα αυτό προσδιορίζεται το τι είναι εφικτό να κατασκευαστεί και όχι απλά επιθυμητό. Η αρχική διάταξη της προδιαστασιολόγησης τροποποιείται και καθορίζεται στη συνέχεια, βάσει εκτενούς διερεύνησης των βέλτιστων επιθυμητών ακουστικών αποτελεσμάτων.

## 6. Κυματική ανάλυση και προσαρμογή διαστάσεων χώρων

Το φαινόμενο των συντονισμών επηρεάζει τη χροιά του παραγόμενου ήχου και συμβάλλει στην υποβάθμιση της ποιότητας της ακρόασης και καταγραφής των ηχητικών κυμάτων σε έναν κλειστό χώρο [3]. Κάθε χώρος αναλύεται βέλτιστα με την Κυματική Θεωρία στο φάσμα συχνοτήτων που το μήκος κύματος τους είναι ανάλογο των διαστάσεών του. Ο σχεδιασμός των επιλεγμένων αναλογιών για τον περιορισμό των συντονισμών κατά την προδιαστασιολόγηση συμπληρώνεται στο βήμα αυτό με τη διερεύνηση επένδυσης των περιμετρικών διαχωριστικών με κατάλληλες διατάξεις απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων.

Καθώς οι συντονισμοί εντός μίας αίθουσας παρουσιάζουν εξαιρετική χωρική ανομοιομορφία ο σχεδιασμός του παρόντος σκέλους γίνεται με ανάλυση χαρακτηριστικών σημείων ακρόασης σύμφωνα με τις προδιαγραφές, δηλαδή στις επικρατέστερες σταθερές θέσεις πηγών-δεκτών (control rooms). Πρόσθετα υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια απορρόφησης για τον περιορισμό αυτών των φαινομένων.

Για την ανάλυση γίνεται χρήση του amroc – the room mode calculator (<https://amcoustics.com>), καθώς και του Room Simulation του λογισμικού REW (<https://www.roomeqwizard.com>). Αρχικά υπολογίζεται το άνω όριο της Κυματικής Θεωρίας (συχνότητα Schröder), σύμφωνα με τον επιδιωκόμενο χρόνο αντήχησης και στη συνέχεια αναλύονται οι μέγιστες εμφανιζόμενες στάθμες. Τέλος υπολογίζεται το ποσοστό επιφάνειας απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων για τον αποδεκτό περιορισμό του πλάτους των συντονισμών.

Καθώς η ανάλυση βάσει της κυματικής θεωρίας δεν μπορεί να εφαρμοστεί απόλυτα στις αίθουσες μουσικής εξάσκησης, δεδομένης της μεταβλητής θέσης των δεκτών, γίνεται στη συνέχεια τροποποίηση των διατάξεων της προδιαστασιολόγησης για την αποφυγή δημιουργίας παράλληλων επιφανειών. Η ενέργεια αυτή συμβάλλει και στον περιορισμό άλλων φαινομένων στο ευρύτερο φάσμα των συχνοτήτων, όπως αυτό της πολλαπλής ηχούς ή της ακύρωσης φάσης.

Σκοπός του παρόντος σκέλους συνεπώς είναι η εκτροπή παράλληλων επιφανειών στο οριζόντιο και το κάθετο επίπεδο, με διατήρηση των επιθυμητών αναλογιών, του επιθυμητού πάχους διάκενων μεταξύ των αιθουσών, του πάχους των εξωτερικών διαχωριστικών, των ελαχίστων διαστάσεων προσβάσεων, καθώς και την κατασκευή προθαλάμων, διαδρόμων, βοηθητικών χώρων κλπ.

## **7. Μοντέλα προσομοίωσης αιθουσών**

Όταν διακόπτεται η λειτουργία μίας πηγής ηχητικών κυμάτων που βρίσκεται σε έναν κλειστό χώρο, η ηχητική ενέργεια αποσβένεται με εκθετικό ρυθμό, με το μηχανισμό ηχοαπορρόφησης των υλικών που καλύπτουν τις επιφάνειες, και μετατρέπεται σταδιακά σε θερμότητα. Ο χρόνος που απαιτεί αυτή η διαδικασία ονομάζεται χρόνος αντήχησης και αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο της ακουστικής των κλειστών χώρων [4]. Στο σκέλος αυτό γίνεται σχολαστική διερεύνηση των σύγχρονων απορροφητικών υλικών επένδυσης, έτσι ώστε ο συνδυασμός τους να επιτυγχάνει ομαλή απόκριση συχνότητας και επιθυμητό χρόνο αντήχησης εντός των εσωτερικών χώρων, ανάλογα με τις καθορισμένες διαστάσεις και χρήση τους.

Για τις ανάγκες της διερεύνησης και την επιλογή των υλικών δημιουργήθηκε λογιστικό φύλλο στο MS Excel, που προσαρμόστηκε καταλλήλως για τη σχολαστική σύγκριση των στοιχείων εκτεταμένης βάσης δεδομένων υλικών, η οποία δημιουργήθηκε κατόπιν διερεύνησης σε διάφορες πηγές (διαδίκτυο, τεχνικά φυλλάδια κλπ.).

Η επιλογή των υλικών και ο συνδυασμός τους διερευνήθηκε μέσω γεωμετρικής προσομοίωσης που έλαβε χώρα στο λογισμικό AFMG EASE 4.3, μετά τη δημιουργία τρισδιάστατων χωρικών προσομοιωμάτων. Καθώς στην ανάλυση καθοριστικό σημείο είναι η θέση, ο τύπος και ο τρόπος διάδοσης των ηχητικών πηγών, στην περίπτωση ηλεκτροακουστικών πηγών έγινε επιλογή ηχείων «συμβατικού» τρόπου λειτουργίας και χαρακτηριστικών, κατόπιν διερεύνησης. Στην περίπτωση ακουστικών πηγών έγινε εξέταση με παντοκατευθυντική πηγή σταθερής απόκρισης συχνότητας. Η θέση των πηγών εντός κάθε χώρου καθορίστηκε μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες, λαμβάνοντας υπόψη διεθνείς προδιαγραφές τοποθέτησης ηχείων και τις επικρατούσες θέσεις των δεκτών, που καθιστούν όμως παράλληλα τις αίθουσες λειτουργικές.

Σε κάθε εξεταζόμενη αίθουσα έγινε διερεύνηση της «αρχικής κατάστασης», εισάγοντας δηλαδή καταρχάς στις καθορισμένες περιμετρικές επιφάνειες συμβατικά υλικά (επίχρισμα, γυψοσανίδα κλπ.). Σκοπός αυτού ήταν η διασαφήνιση των «βασικών» σημείων προς αντιμετώπιση με απορροφητικά υλικά σε κάθε περίπτωση. Κατόπιν έγινε εισαγωγή διατάξεων για την απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων, δεδομένου ότι ο όγκος και η γεωμετρία τους συμβάλλουν στην

εκτροπή, τη διαφοροποίηση, αλλά και την εξασθένιση της πορείας των ακτινών, που επιλέχθηκε ως τρόπος ανάλυσης.

Ο καθορισμός του τύπου, της επιφάνειας και της θέσης των επιλεγμένων υλικών έγινε κατόπιν επαναληπτικών διαδικασιών, ελέγχοντας το χρόνο αντήχησης RT, τη χαρτογράφηση με τη μέθοδο πορείας των ακτινών και την κρουστική απόκριση κάθε αίθουσας σε σχέση με τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα έγινε έλεγχος επάρκειας του εμβαδού της διαθέσιμης επιφάνειας κάθε χώρου σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη δυνατότητα τοποθέτησης επαρκούς επιφάνειας απορροφητών χαμηλών συχνοτήτων. Ο έλεγχος έγινε στο λογισμικό REW.

## **8. Υπολογισμός ηχομονωτικής ικανότητας κτιρίου**

Ο υπολογισμός της ηχομονωτικής ικανότητας του κτιρίου έγινε κατόπιν της τελικής διαστασιολόγησης των αιθουσών, για τη δυνατότητα χρήσης των προσομοιωμάτων του προηγούμενου σκέλους στην πρόγνωση της στάθμης ακουστικής πίεσης στις αίθουσες εκπομπής.

Για τη μόνωση μίας κατασκευής, προκειμένου να είναι αποδοτική, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο ο τρόπος διάδοσης και παραγωγής του ήχου, αλλά η στάθμη και το φάσμα του [5]. Για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης στάθμης ηχητικής πίεσης εντός των αιθουσών μουσικής εξάσκησης δημιουργήθηκε μουσικό κομμάτι αναφοράς, του οποίου η απόκριση συχνότητας αναλύθηκε και εισήχθη στο προσομοίωμα. Η τελική στάθμη των πηγών ορίστηκε βαθμονομώντας τη στάθμη διακριτού κρουστικού οργάνου (ταμπούρου) στην κυματομορφή της μίξης με μετρημένες στάθμες του που ανακτήθηκαν από τη βιβλιογραφία. Για τις αίθουσες ελέγχου η απόκριση συχνότητας του κομματιού αναφοράς εισήχθη στα επιλεγμένα ηχεία, κατόπιν συνέλιξης με την απόκριση συχνότητας τους και λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη στάθμη αναπαραγωγής τους.

Τα εξερχόμενα της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς της ηχομονωτικής ικανότητας των εσωτερικών και εξωτερικών διαχωριστικών του κτιρίου βάσει του προτύπου DIN 4109, τις απαιτούμενες προδιαγραφές ακουστικής άνεσης κατά EBU, τα κριτήρια θορύβου NR και τις διατάξεις του Άρθρου 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού. Εξετάστηκαν όλες οι πιθανές οδεύσεις διάδοσης κάθε ηχητικής πηγής εντός του χώρου, αλλά και ως προς το εξωτερικό περιβάλλον. Ο όγκος των σύνθετης γεωμετρίας αιθουσών και ο χρόνος αντήχησης δεν υπολογίστηκαν μαθηματικά, αλλά προσδιορίστηκαν μέσω προσομοίωσης στο AFMG EASE 4.3.

Τέλος η επιλογή των υλικών και η διαστασιολόγηση των τελικών σύνθετων επιφανειών έγινε μέσω της δοκιμαστικής έκδοσης του λογισμικού SONArchitect ISO.

## **9. Αποτελέσματα και συμπεράσματα**

Από την ανάλυση συμπεραίνεται κυρίως η πολυπλοκότητα του ακουστικού σχεδιασμού, η αλληλεξάρτηση όλων των προς ανάλυση θεμάτων και η σημαντικότητα του εξαρχής ορισμού των κατά περίπτωση περιορισμών ενός υφιστάμενου κτιρίου, που θα πρέπει να εξετάζονται σε κάθε βήμα της έρευνας.



Προσδοκώμενο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας είναι, πέρα από την εξαγωγή ενός οδηγού καλής πρακτικής, η δυνατότητα επαναληψιμότητας της μεθοδολογίας της στο σχεδιασμό και την ανάλυση παρόμοιων κτιριακών εγκαταστάσεων, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις και τον όγκο τους. Πρόσθετη προσδοκία είναι η ανάδειξη των πραγματικών περιορισμών και προβλημάτων που δύναται να προκύψουν στην εκπόνηση μίας μελέτης παρόμοιας θεματολογίας σε συνθήκες «πραγματικού δομημένου περιβάλλοντος»

## 10. Αναφορές

- [1] Σκαρλάτος Δ. *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Πάτρα (2015).
- [2] Καπετανάς Δ. *Ακουστική Μελέτη Διαμόρφωσης Υφιστάμενου Κτιρίου σε Έναν Ολοκληρωμένο Πολυχώρο Μουσικής Εξάσκησης και Ηχογραφήσεων* Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα (2020).
- [3] Κοντομίχος, Φ., Ζαρούχας, Θ. & Χατζηαντωνίου, Π. *Ακουστική Χώρου - Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική* Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα (2013).
- [5] Everest, F.A. & Pohlmann, K.C. *Master Handbook of Acoustics (5th edition)* McGraw Hill, London (2009).
- [6] Μ.Α. Σκαρλάτος Δ. *Ηχομόνωση - Ηχοπροστασία Εισαγωγή στις Μεθόδους Ηχομόνωσης και Ηχοπροστασίας* Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα (2013).

## ***Εφαρμογή ενός καινοτόμου συστήματος δυναμικής ενίσχυσης (DDA) για την χαμηλόσυχνη ηχομόνωση κτιριακών στοιχείων***

Μωρίς Καλδερών<sup>1a</sup> Διπλ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΕΜΠ  
Αντώνης Μάντακας<sup>2</sup> Διπλ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΕΜΠ  
Δρ. Ιωάννης Αντωνιάδης<sup>1</sup>, Καθηγητής ΕΜΠ

<sup>1</sup> Εργ. Δυναμ. & Κατασκ., Σχ. Μηχαν. Μηχ., ΕΜΠ  
<sup>2</sup> Εργ. Στατ. & Αντισεισμ. Ερευν., Σχ. Πολ. Μηχ., ΕΜΠ  
<sup>a</sup> moriska@mail.ntua.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια καινοτόμα διάταξη δυναμικής ενίσχυσης (DDA) με ηχομονωτικές ιδιότητες σε χαμηλόσυχνους θορύβους, στόχος της οποίας είναι η αύξηση της αδράνειας του χωρίσματος και η μετακίνηση της ιδιοσυχνότητας σε χαμηλότερες τιμές. Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι απλός και βασίζεται στη μεταβολή των συνθηκών στήριξης του στοιχείου μέσω ενός συστήματος που αποτελείται από ελαστικές εδράσεις και άκαμπτα μέλη, ενώ ο σχεδιασμός γίνεται χωρίς την προσθήκη επιπρόσθετων μαζών και στοιχείων υψηλής απόσβεσης. Στην εργασία διατυπώνεται αρχικά το μαθηματικό μοντέλο του μηχανισμού το οποίο επαληθεύεται μέσω πειραματικών μετρήσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκριτικά αναλυτικά αποτελέσματα ηχομείωσης ενός χωρίσματος με και χωρίς τη διάταξη δυναμικής ενίσχυσης (DDA).

***Implementation of a novel Dynamic Directional amplification (DDA) mechanism for low frequency acoustic enhancement of building partitions***

### **ABSTRACT**

*This paper presents a novel dynamic directional amplification (DDA) mechanism suitable for low-frequency noise mitigation. The DDA mechanism increases the Inertia of the panel and shifts the resonance frequency to the very low frequency regime. The implementation of such a mechanism is very simple and is comprised of flexible supports and a rigid link, without the need of any additional masses or damping elements. Initially the mathematical model of the amplifier is described followed by its experimental validation. Next, an example of a panel with and without the DDA mechanism is presented through analytical analysis.*

## Εισαγωγή

Η αύξηση της δυναμικής απόκρισης των μηχανικών και δομικών συστημάτων είναι καθοριστικής σημασίας για την βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς τους και την αναβάθμιση των βασικών χαρακτηριστικών απόδοσης τους. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφοροι μηχανισμοί ενίσχυσης αδράνειας σε πολύαριθμα πεδία της μηχανικής.

Η απόδοση τέτοιων μηχανισμών έχει εξεταστεί από ερευνητές σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων μηχανισμών συλλογής ενέργειας [1,2], τεχνολογιών μείωσης κραδασμών [3] και ηχομόνωσης [4,5], ενώ ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ανάπτυξη αποτελεσματικών, απλών, προσιτών και εφαρμόσιμων συστημάτων. Οι εξελίξεις στον έλεγχο των κραδασμών επικεντρώνονται τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη προσεγγίσεων παθητικού, ημι-ενεργητικού και ενεργητικού ελέγχου κραδασμών. Μεταξύ άλλων, αυτές περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση πρόσθετων ταλαντευόμενων μαζών, που εισάγουν απόσβεση στο δυναμικό σύστημα (π.χ. αποσβεστήρες συντονισμένης μάζας- TMD), την εφαρμογή στοιχείων αρνητικής ακαμψίας (δηλ., συσκευές αρνητικής δυσκαμψίας - NS και οιονεί μηδενικοί ταλαντωτές δυσκαμψίας- QZS) [6-8].

Σε αυτή τη μελέτη, ένας νέος δυναμικός μηχανισμός ενίσχυσης, ο DDA [9-11], εισάγεται ως μέσο για την τεχνητή αύξηση της φαινόμενης μάζας ενός ταλαντωτή, χωρίς την απαίτηση περίπλοκων γεωμετριών και βαριών επιπρόσθετων μαζών. Η μάζα στερεώνεται σε έναν άκαμπτο βραχίονα με αποτέλεσμα την σύζευξη των βαθμών ελευθερίας κίνησης της, αναγκάζοντας τον ταλαντωτή να κινηθεί μέσω μιας προδιαγεγραμμένης διαδρομής και τέλος την αύξηση της αδράνειας προς την επιθυμητή κατεύθυνση κίνησης.

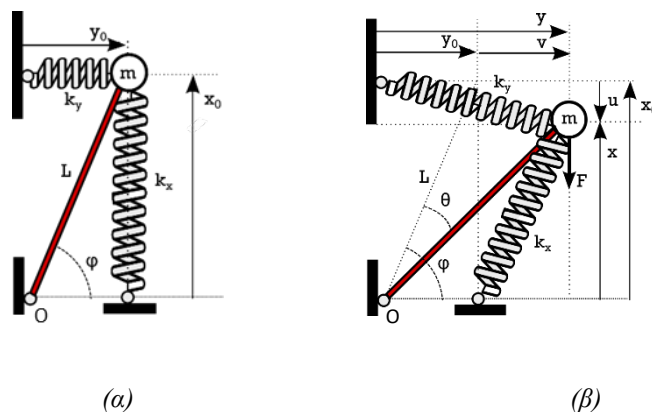
Η παρούσα εργασία περιγράφει τις βασικές δυναμικές ιδιότητες του μηχανισμού και αναδεικνύει την ευεργετική του επίδραση ως συσκευή αδρανειακής ενίσχυσης. Αποδεικνύεται, ότι μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση των δυναμικών κατασκευών διατηρώντας παράλληλα τις απαιτήσεις μάζας και τις πολύπλοκες διαμορφώσεις σε ένα ελάχιστο επίπεδο, καθώς η βασική καινοτομία του DDA έγκειται στην απλή γεωμετρία και την απλή δομή του που επιτρέπει την εφαρμογή του σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών και συγκεκριμένα σε κτιριακά στοιχεία όπως ηχομονωτικές πόρτες, παράθυρα, αντικραδασμικά πατώματα, ξηρά δόμηση κλπ.

### 1. Μαθηματική διατύπωση του συστήματος δυναμικής ενίσχυσης (DDA)

#### 1.1 Κινηματική ανάλυση DDA

Ο μηχανισμός δυναμικής ενίσχυσης (DDA) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Η μάζα  $m$  συνδέεται αρθρωτά με το σταθερό σημείο  $O$ , στην αρχή των αξόνων, μέσω του απεικονιζόμενου με κόκκινο χρώμα άκαμπτου μέλους. Συνεπώς, η σύνδεση αυτή δημιουργεί εξάρτηση των βαθμών ελευθερίας  $u$ ,  $v$ . Το απλοποιημένο μοντέλο περιγράφεται από τις συντεταγμένες της μάζας  $m$  στην τυχαία θέση  $B(x, y)=(x_0+u, y_0-v)$ , όπου  $x_0$ ,  $y_0$  οι αρχικές συντεταγμένες της μάζας, την αρχική γωνία

$\varphi = \arctan(x_0/y_0)$ , που σχηματίζεται μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και του μέλους και την γωνία  $\theta$  που δηλώνει την περιστροφή της μάζας στην τυχαία θέση B. Τέλος,  $k_x, k_y$  είναι οι δυσκαμψίες των ελατηρίων και  $F$  η δύναμη που διεγείρει τον μηχανισμό.



Σχήμα 1.1 Σχηματική απεικόνιση του συστήματος δυναμικής ενίσχυσης (DDA) όπου η κίνηση  $v$  ( $y$  κατεύθυνση) είναι εξαρτώμενη από την κίνηση  $u$  ( $x$  κατεύθυνση) (α) αρχική θέση μάζας, (β) θέση μάζας σε παραμορφωμένη κατάσταση.

Η εξίσωση κίνησης του DDA προκύπτει μέσω της γεωμετρίας του μηχανισμού και της ενεργειακής αρχής Lagrange ως εξής [9]:

$$m(1 + \rho^2)\ddot{u} + (k_x + k_y\rho^2)u = F \quad (1.1)$$

Όπου  $\rho = \tan\varphi$ .

Εκμεταλλευόμενοι την εξίσωση κίνησης και θεωρώντας ότι ο μηχανισμός έχει απόσβεση ίση με  $c_x, c_y$ , η συνάρτηση μεταφοράς του μηχανισμού ενίσχυσης στη διεύθυνση της διέγερσης περιγράφεται ως:

$$\tilde{T}_x = -\frac{(c_x + c_y\rho^2)j\omega + (k_x + k_y\rho^2)}{-m(1 + \rho^2)\omega^2 + (c_x + c_y\rho^2)j\omega + (k_x + k_y\rho^2)} \quad (1.2)$$

## 1.2 Προσέγγιση υπολογισμού απώλειας διάδοσης ήχου (STL)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση της διάδοσης του ήχου παρουσία εμποδίων για τον υπολογισμό του επαγόμενου STL [12,13]. Στην παρούσα εργασία ακολουθείτε η προσέγγιση βασισμένη στην ακουστική αντίσταση [14,15]. Κατά την προσέγγιση αυτή θεωρείται μονοδιάστατη ηχητική διάδοση διαμέσου μιας άκαμπτης, πεπερασμένης πλάκας η οποία εδράζεται σε έναν άπειρο ανακλαστήρα. Η υπόθεση κανονικών, επίπεδων, προσπίπτων

κυμάτων κατά την θετική κατεύθυνση οδηγεί στην μιγαδική έκφραση της ηχητικής πίεσης ως

$$p_i = \bar{p} e^{j(\omega t - \kappa_0 z)} = \bar{p} e^{j(t - z/c_0)} \quad (1.3)$$

Καθώς η πίεση και η ταχύτητα πρέπει να είναι συνεχείς στη διεπιφάνεια των δύο μέσων προκύπτει η ακόλουθη έκφραση του συντελεστή μεταδοτικότητας

$$\frac{\bar{p}_i}{\bar{p}_i} = \tau = \frac{\bar{Z}_f}{\bar{Z}_p + \bar{Z}_f} \quad (1.4)$$

Όπου

$$\bar{Z}_p = -\frac{1}{j\omega} \frac{T_{XF}^{-1}}{A} \quad (1.5)$$

η μηχανική ισοδύναμη αντίσταση  $Z_p$ , είναι συνάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς και της επιφάνειας  $A$  και  $Z_f = 2Z_0 = \rho_0 c_0$  η αντίσταση του αέρα και στις δύο διευθύνσεις [14], όπου  $\rho_0$  η πυκνότητα του αέρα και  $c_0$  η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος στον αέρα.

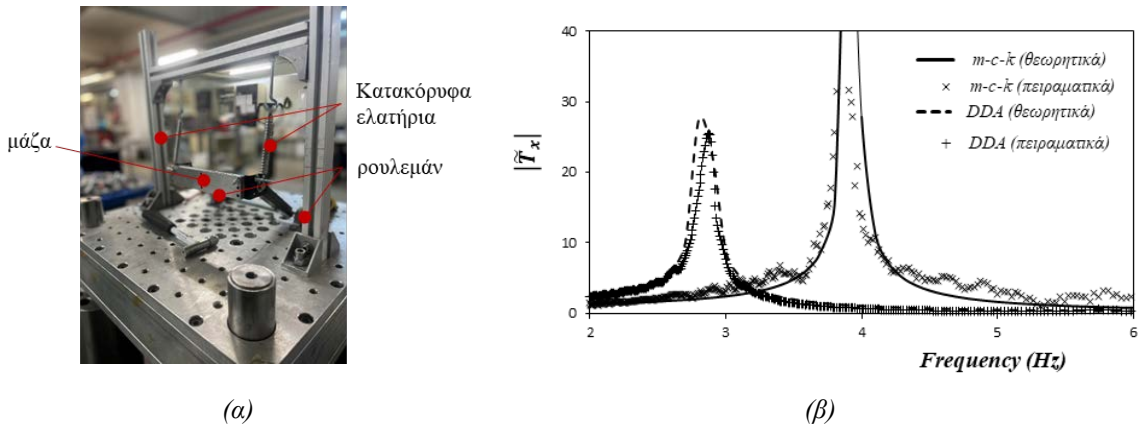
Εν τέλει, η απώλεια διάδοσης ήχου (STL) μπορεί να υπολογιστεί ως

$$STL = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{|\tau|^2} \right) \quad (1.6)$$

## 2. Πειραματική επαλήθευση συνάρτησης μεταφοράς

Η δυναμική απόκριση του προτεινόμενου μηχανισμού DDA επαληθεύθηκε πειραματικά διεγείροντας τη βάση του στη σεισμική τράπεζα του εργαστηρίου Δυναμικής & Κατασκευών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ [16]. Το υπό εξέταση πειραματικό πρωτότυπο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1α, όπου τα κατακόρυφα ελατήρια έλξεως είναι συνολικής δυσκαμψίας  $k_x = 500$  N/m, η μάζα της κατασκευής απαρτίζεται κυρίως από μεταλλικά ελάσματα και ισούται με  $m = 0.89$  kg, ενώ η άρθρωση στη βάση του μηχανισμού υλοποιείται με τη χρήση ρουλεμάν. Για την επίτευξη των σκοπών του πειράματος εφαρμοστήκαν διαδοχικά αρμονικές διεγέρσεις συχνοτήτων 2-10 Hz, ενώ οι μετρήσεις έγιναν με την χρήση επιταχυνσιόμετρων τριών διευθύνσεων.

Στο Σχήμα 2.1β συγκρίνεται η πειραματική με τη θεωρητική απόκριση του μηχανισμού DDA με γωνία  $\varphi = 40^\circ$  σε αντιστοιχία με έναν ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή (ίδια μάζα και δυσκαμψία ελατηρίων). Το θεωρητικώς υπολογιζόμενο φάσμα συμπίπτει με το πειραματικό επαληθεύοντας το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο. Από τη σύγκριση μεταξύ του απλού μονοβάθμιου ταλαντωτή και του μηχανισμού ενίσχυσης παρατηρείται η μείωση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος με την προσθήκη του μηχανισμού από 3.9 σε 2.8Hz με παράλληλη μείωση του μέγιστου πλάτους της επιτάχυνσης.



Σχήμα 2.2 (α) Απεικόνιση πειραματικής διάταξης. (β) Σύγκριση πειραματικών συναρτήσεων μεταφοράς με αναλυτικά αποτελέσματα για γωνία συστήματος δυναμικής ενίσχυσης (DDA)  $\varphi=40^\circ$ .

### 3. Παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος δυναμικής ενίσχυσης DDA σε ηχομονωτική πόρτα

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προτεινόμενο μηχανισμό ενίσχυσης σε πληθώρα εφαρμογών. Ενδεικτικά, ο μηχανισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε μετα-υλικά με σεισμικές και ακουστικές ιδιότητες [9,10], σε βάσεις μηχανών, αντικραδασμικά ψευδοπατώματα, ακουστικά πάνελ κ.α. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η εφαρμοσιμότητα του μηχανισμού σε ακουστικές πόρτες με σκοπό την αύξηση των χαμηλόσυχνων ακουστικών απορροφητικών δυνατοτήτων τους. Στο Σχήμα 3.1α απεικονίζεται μια ιδεατή υλοποίηση της διάταξης. Ο μηχανισμός τοποθετείται εσωτερικά της πόρτας και προσαρτάται σε ένα από τα δύο φύλλα. Την μάζα του μηχανισμού αποτελεί ένα τρίτο, άκαμπτο χώρισμα όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει θεωρηθεί χαλυβδόφυλλο οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 ενώ τα χαρακτηριστικά του DDA στον πίνακα 3.2. Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι οι διαστάσεις του πάνελ, οι δυσκαμψίες των ελατηρίων και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της εφαρμογής έχουν επιλεγεί με τρόπο ώστε να είναι σύμφωνα με υλικά του εμπορίου. Επίσης, στον μηχανισμό θεωρείται ότι εφαρμόζονται ελαστικές στηρίξεις μόνο στην διεύθυνση κάθετα στο μέτωπο της πόρτας.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά χαλυβδόφυλλου

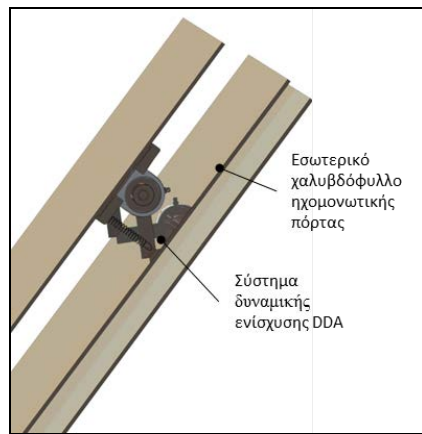
Πάνελ	
Διάσταση - $l_x$ (m)	0.9
Διάσταση - $L_y$ (m)	2.1
Πάχος - $t$ (mm)	3
Πυκνότητα μεταλλικού πάνελ ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
Μάζα (kg)	44.5

Πίνακας 3.2 Τιμές βασικών παραμέτρων DDA

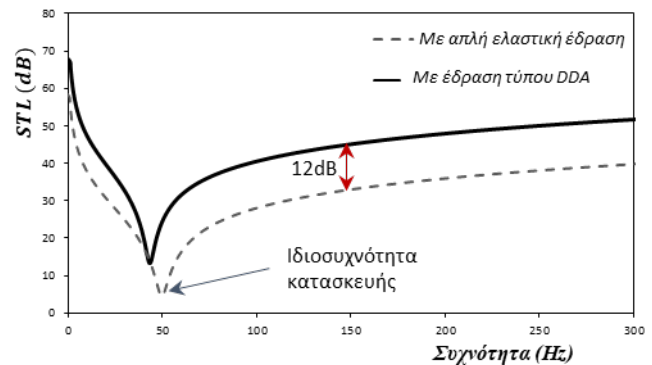
DDA	
Ιδιοσυχνότητα ελατηρίων $f_{0x}$ (Hz)	50
Γωνία $\varphi$ (°)	60

Στο Σχήμα 3.1β απεικονίζεται τα διαγράμματα STL για τις δύο περιπτώσεις στηρίξεις του πάνελ με τη χρήση των σχέσεων (1.2)-(1.6). Για την συγκεκριμένη ανάλυση δεν έχουν ληφθεί υπόψιν οι ηχομονωτικές ιδιότητες των υπόλοιπων στοιχείων της πόρτας παρά μόνο του επιπλέον χαλυβδόφυλλου και του μηχανισμού. Επιπροσθέτως ο τρόπος μοντελοποίησης του δείκτη ηχομείωσης (STL) είναι απλοποιητικός με την έννοια ότι η παραμορφωσιμότητα του χωρίσματος δεν λαμβάνεται υπόψιν. Το χωρίσμα λαμβάνεται ως μια απαραμόρφωτη μάζα, όπου η καμπτική στιβαρότητα του πραγματικού παραμορφώσιμου πλαισίου υπερτίθεται με την στιβαρότητα της έδρασης του μερίσματος. Αυτό σημαίνει επίσης ότι η σεισμική μάζα που έχει θεωρηθεί είναι ουσιαστικά η φαινόμενη μάζα της θεμελιώδους ιδιόμορφης ταλάντωσης του μερίσματος. Ωστόσο, η ακαμψία του χωρίσματος μπορεί να ενισχυθεί με τη χρήση συνδέσμων δυσκαμψίας.

Η χρήση του μηχανισμού ενίσχυσης στο εσωτερικό της πόρτας βελτίωσε την χαμηλόσυχη ηχοαπορροφητικότητα της πόρτας μετατοπίζοντας την καμπύλη του STL προς τα πάνω, ενώ παράλληλα μειώνοντας την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Η περαιτέρω αύξηση της γωνίας του ενισχυτή θα προσέφερε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του δείκτη ηχομείωσης.



(α)



(β)

Σχήμα 3.3 (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση προτεινόμενης διάταξης για ηχομονωτικές πόρτες. (β) Συγκριτική αναλυτική απόκριση συχνότητας του STL για χωρίσμα στηριζόμενο σε απλές ελαστικές εδράσεις και χωρίσμα στηριζόμενο σε εδράσεις τύπου DDA

#### 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα καινοτόμο σύστημα δυναμικής ενίσχυσης της φαινόμενης μάζας ταλαντωτών, η εφαρμογή του οποίου είναι απλή και οικονομική, ενώ μπορεί να εφαρμοσθεί σε διάφορες εφαρμογές ακουστικής και αντικραδασμικής τεχνολογίας. Η προκαταρκτική έρευνα υποδεικνύει ότι με τις κατάλληλες προσαρμογές είναι δυνατή η αύξηση του δείκτη ηχομείωσης στην περίπτωση χαμηλόσυχνων διεγέρσεων, όπου τα συμβατικά μέσα ακουστικής μόνωσης υστερούν, χωρίς την απαίτηση περίπλοκων γεωμετριών και ιδιαίτερων παρεμβάσεων στην δομή των στοιχείων του εμπορίου. Φυσικά, περαιτέρω έρευνα απαιτείται στο πεδίο, ενώ στην παρούσα φάση σχεδιάζεται η πειραματική μέτρηση της ηχοαπορροφητικότητας στοιχείων με συστήματα δυναμικής ενίσχυσης DDA στο εργαστήριο Δυναμικής & Κατασκευών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Παράλληλα, μελετάται η χρήση του μηχανισμού σε περιοδικές κατασκευές για την δημιουργία μετα-πάνελ με αυξημένες αντικραδασμικές και ηχομονωτικές δυνατότητες.

#### 5. Αναφορές

- [1] S. Adhikari, A. Banerjee, J. Intell. Mater. Syst. Struct. 33 (2022) 822–838.
- [2] I. Shahosseini, K. Najafi, J. Phys. Conf. Ser. 557 (2014).
- [3] R. Ma, K. Bi, H. Hao, Eng. Struct. 243 (2021) 112655.
- [4] N.M.M. Frandsen, O.R. Bilal, J.S. Jensen, M.I. Hussein, J. Appl. Phys. 119 (2016) 124902.
- [5] A. Bergamini, M. Miniaci, T. Delpero, D. Tallarico, B. Van Damme, G. Hannema, I. Leibacher, A. Zemp, Nat. Commun. 10 (2019) 4525.
- [6] M. Kalderon, A. Paradeisiotis, I. Antoniadis, in: Euronoise 2021, Madeira, Portugal, 2021, pp. 1333–1343.
- [7] A. Paradeisiotis, Applications of Oscillators in Energy Conversion, National Technical University of Athens, 2019.
- [8] K.A. Kapasakalis, A.E. Alvertos, A.G. Mantakas, I.A. Antoniadis, E.J. Sapountzakis, Proc. Int. Conf. Struct. Dyn. , EURODYN 2 (2020) 4160–4176.
- [9] M. Kalderon, A. Mantakas, A. Paradeisiotis, I. Antoniadis, E.J. Sapountzakis, Appl. Math. Model. 110 (2022) 1–16.
- [10] M. Kalderon, A. Paradeisiotis, I. Antoniadis, Materials (Basel). 14 (2021).
- [11] M. Kalderon, M. Kalogerakou, A. Paradeisiotis, I. Antoniadis, in: Lodz University of Technology, Lodz, 2021, pp. 216–217.
- [12] M. Kalderon, A. Paradeisiotis, I. Antoniadis, COMPDYN Proc. 2021-June (2021).
- [13] A. Paradeisiotis, M. Kalderon, I. Antoniadis, AIP Adv. 11 (2021) 65003.
- [14] Y.H. Kim, Sound Propagation: An Impedance Based Approach., John Wiley & Sons, 2010.
- [15] A. Paradeisiotis, M. Kalderon, I. Antoniadis, L. Fouriki, in: Proc. EURODYN 2020, EASD Procedia, Athens, Greece, 23–26 November, 2020, pp. 4093–4110.
- [16] M. Kalderon, A. Mantakas, I. Antoniadis, Available SSRN (2022).



**Ακουστικός σχεδιασμός, ακουστική προσομοίωση,  
πρότυπες μετρήσεις και ανάλυση της ακουστικής του  
νέου Αμφιθεάτρου “Μιλτιάδης Έβερτ” στην Τεχνόπολη  
Δήμου Αθηναίων.**

Γεώργιος Α. Χατζηγεωργίου B.Eng(Hons),  
MSc Civil Engineering, MSc Architectural Acoustics  
Πολιτικός Μηχανικός-Μηχανικός Σύμβουλος Ακουστικής  
Δωδώνης 1, Θεσσαλονίκη, ΤΚ 55 438  
Τηλ: 2315 150 157 Κινητό: 6937183131  
[info@acoustical.gr](mailto:info@acoustical.gr)

Ιουλιέττα Ζήνδρου M.Arch. Advanced Architecture  
Αρχιτέκτων Μηχανικός Ε.Μ.Π  
Υψηλάντου 7, Αθήνα, ΤΚ 10675  
[info@ahylo.com](mailto:info@ahylo.com)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την μεθοδολογία αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού, τα αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο αμφιθέατρο «Μιλτιάδης Έβερτ» σύμφωνα με το ISO 3382-2 καθώς και την σύγκριση με μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης CATT-Acoustic. Ο υπολογισμός διαφόρων ακουστικών παραμέτρων όπως Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 κτλ δίνει σημαντικά στοιχεία για την ακουστική συμπεριφορά και την αξιολόγηση του συγκεκριμένου χώρου. Η σχεδιαστική πολυπλοκότητα του χώρου, βασίστηκε σε μια μοναδική ακουστική οροφή, με διάταξη πρισματών η οποία αποτελείται από 564 κομμάτια, συνδυάζοντας διαχυτικές, ανακλαστικές αλλά και απορροφητικές ζώνες. Οι λεπτομερείς αναλύσεις των ακουστικών παραμέτρων με βάση τις σχετικές θέσεις πηγής και ακροατή, δίνουν επίσης σημαντικά στοιχεία για την κρουστική απόκριση του χώρου και την αλληλεπίδραση χρόνου και συχνότητας. Κατά την διαδικασία των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε και πηγή θορύβου «Talk Box» το οποίο βαθμονομήθηκε σύμφωνα με την συχνотική απόκριση ανθρώπινης φωνής ώστε να μετρηθούν και να αξιολογηθούν οι δείκτες STI & STIPA, ενώ μετρήθηκαν και οι δείκτες για το σύστημα αναγγελίας κοινού (Public Address System) σύμφωνα με το IEC 60268-16:2020.

Τέλος, στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η μεταβολή των αποτελεσμάτων συγκρίνοντας διαφορετικές προσομοιώσεις του χώρου, με βάση την πολυπλοκότητα αρχιτεκτονικών λεπτομερειών, την επιλογή συντελεστών διάχυσης στην πρισματική οροφή.

Ενότητα: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (Building-Architectural Acoustics)  
Λέξεις κλειδιά: αρχιτεκτονική ακουστική, αμφιθέατρο, μετρήσεις

## ***Acoustical design , computer simulation, room acoustic analysis and acoustic measurements of new Amphitheater “Miltiadis Evert” in Technolopis, city of Athens.***

### **ABSTRACT**

*This paper presents the architectural and acoustic design methodology, the results of acoustic measurements carried out in the "Miltiadis Evert" amphitheater according to ISO 3382-2 as well as the comparison with the CATT-Acoustic acoustic simulation model. The calculation of various acoustic parameters such as Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 etc. gives important data for the acoustic behaviour and evaluation of the auditorium. The design complexity of the space was based on a unique acoustic ceiling, with an arrangement of prisms which consists of 564 pieces, combining diffusive, reflective and absorbing zones. Detailed analyzes of acoustic parameters based on relative source and listener positions also provide important insights into the room's impulse response and time-frequency relationship. During the measurement process, a "Talk Box" noise source was used which was calibrated according to the frequency response of the human voice in order to measure and evaluate the STI & STIPA indicators, while the indicators for the Public Address System were also measured ) according to IEC 60268-16:2020.*

*Finally, the variation of the results is examined by comparing different simulations of the space, based on the complexity of architectural details, the choice of diffusion coefficients in the prismatic roof.*

### **1. Εισαγωγή**

#### *1.1 Περιγραφή της αίθουσας*

Το έργο αναφέρεται στην ανακαίνιση του αμφιθέατρου εντός του κυλινδρικού ιστορικού αεριοφυλακίου στο βιομηχανικό μουσείο και πολιτιστικό πάρκο Τεχνόπολης στην Αθήνα. Η αρχιτεκτονική μελέτη και η επίβλεψη έγινε από το γραφείο Ahylo Studio με επικεφαλής την αρχιτέκτονα Ιουλιέττα Ζήνδρου.

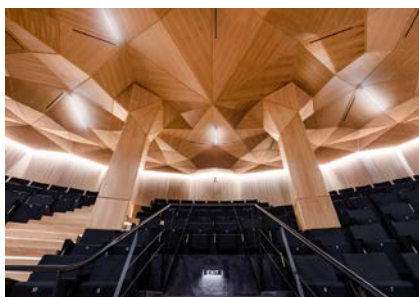
Η σχεδιαστική ιδέα αναφέρεται στην ιστορική λειτουργία της βιομηχανικής αυτής εγκατάστασης ως δεξαμενή αποθήκευσης φωταερίου που “ξεδιπλώνόταν” καθ' ύψος, με κύλιση της εσωτερικής ανεστραμμένης δεξαμενής στον περιμετρικό σκελετό από μεταλλικούς πυλώνες, από τα τέλη του 19ου αιώνα. Έτσι η σχεδιαστική προσέγγιση του νέου εσωτερικού «κενού» όγκου της αίθουσας κατευθύνεται από τον καθορισμό της ως μια σύγχρονη πολιτισμική δεξαμενή, και ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, διάμεσου της γλυπτικής οροφής και του φωτισμού, αποδίδει την αίσθηση της αιώρησης της οροφής, ως ένα διακριτό στοιχείο που «ξεδιπλώνεται». Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός της αίθουσας χαρακτηρίζεται από τις νέες εσωτερικές αναδιπλούμενες και ρέουσες τοπολογίες: τη σκηνή, το κοίλο και

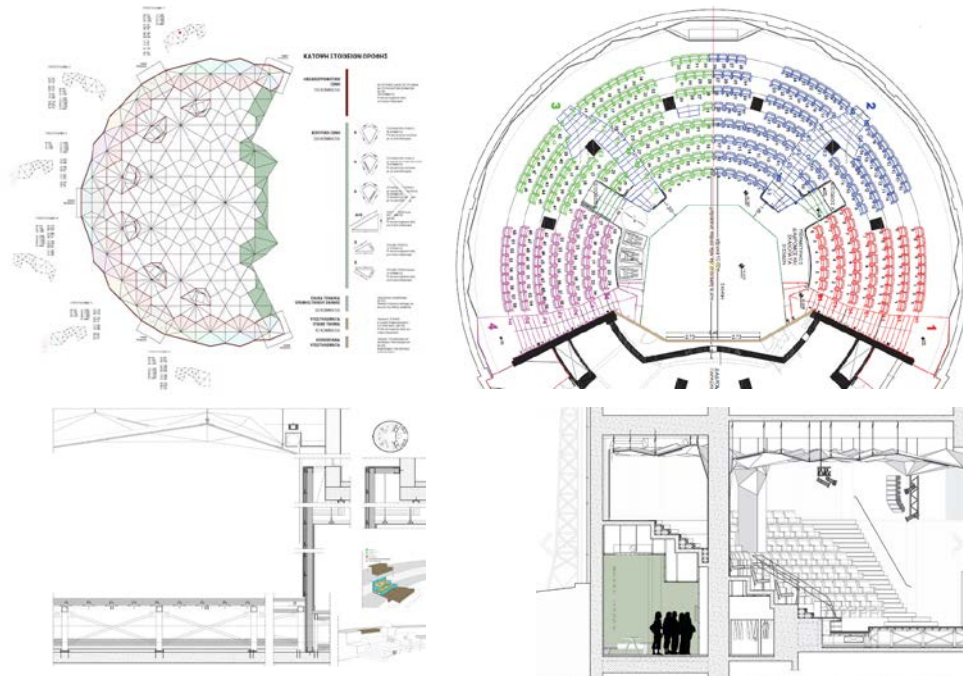
την οροφή, και ο χώρος γίνεται αντιληπτός ως μια «ακουστική συσκευή» παραγωγής πολιτισμικού κεφαλαίου, στον πυρήνα της ιστορικής δεξαμενής.

Ο όγκος της αίθουσας είναι  $1840\mu^3$ , συνολικής επιφάνειας  $675\mu^2$ . Το σύνολο των παρεμβάσεων στόχευσε στη βελτίωση τόσο της ποιότητας, όσο και της ποικιλίας των εκδηλώσεων, με βασικό στόχο τη διεξαγωγή συνεδρίων, και δυνατότητα επέκτασης των εκδηλώσεων όπως διοργάνωση θεατρικών δρώμενων, μουσικών παραστάσεων και οπτικοακουστικών προβολών, προσφέροντας μια αναβαθμισμένη εμπειρία για τον θεατή.

Η οροφή ενισχύει την παθητική ακουστική μέσω γεωμετρικών ηχοανακλαστών και ηχοαπορροφητών, δρύινων επιφανειών, που σχηματίζουν πρισματικές πυραμίδες. Αποτελείται από 564 κομμάτια που ανήκουν σε τυπολογίες, υποτυπολογίες και μοναδικά κομμάτια, όλα κατασκευασμένα κατά παραγγελία (custom fabrication). Ο σχεδιασμός παρέχει την απαραίτητη σχέση έντασης ανά ακροατή μέσω της γεωμετρίας και την ισορροπία μεταξύ των ανακλαστικών και ηχοαπορροφητικών επιφανειών, παρέχοντας μια μοναδική ακουστική εμπειρία στους θεατές

Η διάταξη του κοίλου του αμφιθεάτρου αναπτύσσεται σαν ένα πέταλο ακτίνας  $14,50\text{m}$ , αποδίδοντας  $350\text{m}^2$  ωφέλιμου εμβαδού καθισμάτων. Συγκεκριμένα διαμορφώνεται σε 8 βαθμίδες με χαρακτηριστικά ύψους και πλάτους,  $0,54\text{m} \times 0,95\text{m}$ , στις οποίες διατάσσονται 284 σταθερά ανακλινόμενα καθίσματα.





Η πλάτη της αίθουσας στην περιοχή του κοίλου του αμφιθεάτρου είναι κατασκευασμένη από διάτρητα ξύλινα ηχοαπορροφητικά πάνελ με διάκενο 150χιλ και πλήρωση από ηχοαπορροφητικές πλάκες χαμηλής πυκνότητας. Η οροφή είναι κατασκευασμένη από ηχοανακλαστικές ξύλινες πλάκες MDF, με μεγάλο διάκενο, η οποία αποτελείται από μια συστοιχία διαχυτικών πυραμίδων. Η ψευδοροφή, βρίσκεται στην περιοχή της σκηνής καθώς επίσης και πάνω από όλο το ακροατήριο. Στο περιμετρικό διάδρομο κυκλοφορίας του κοίλου και συγκεκριμένα πίσω από τα καθίσματα, η ψευδοροφή διατηρεί την ίδια σχεδιαστική γεωμετρία αλλά με ηχοαπορροφητικές ιδιότητες, οι οποίες καλύπτουν ένα φάσμα μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων. Ο σχεδιασμός της αποτελείται από απόλυτα γεωμετρικά σχήματα, τον κύκλο, το εξάγωνο, το τρίγωνο, που υπόκεινται σε συμμετρία, ρυθμό και αρμονία.

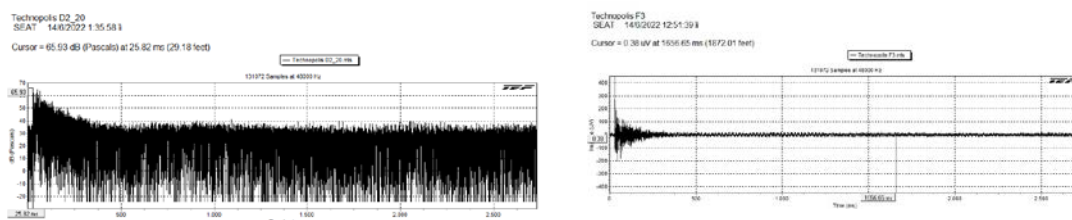
Το σύνολο του χώρου της σκηνής είναι επιστρωμένο με ξύλινο πάτωμα, ενώ εδράζεται σε μεταλλική βάση, η οποία σχεδιάστηκε πάνω σε αντικραδασμικά εφέδρανα για μείωση μεταφοράς δονήσεων και κραδασμών στο χώρο του ραδιοφωνικού studio το οποίο βρίσκεται κάτω από το αμφιθέατρο.

Στο σύνολό του το δάπεδο του κοίλου είναι επιστρωμένο με μοκέτα ενώ οι κλίμακες είναι μασίφ δρύινο.

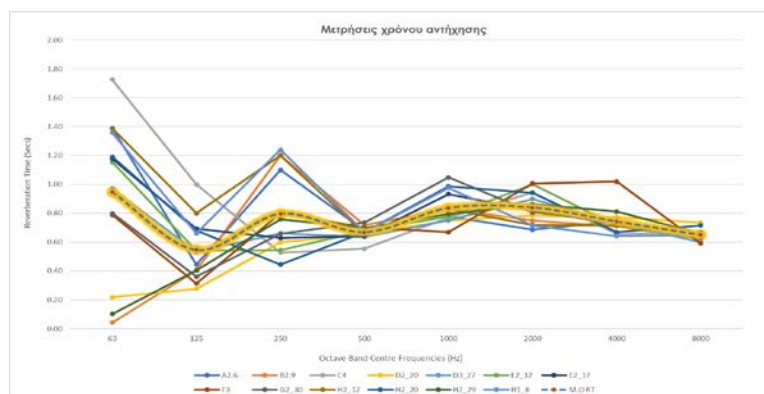
### 1.2 Ακουστικές μετρήσεις

Η ακουστική μέτρηση του αμφιθεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 14/06/2022 με την χρήση προσωπικού φορητού υπολογιστή και το GOLD-LINE, TEF25 USB Preamp, πολυκατευθυντικό πυκνωτικό μικρόφωνο τύπου TEF04(tm) ½", πολυκατευθυντικό ηχείο δωδεκάεδρο CESVA BP012 και ενισχυτή CESVA AP602. Οι μετρήσεις λήφθηκαν 13 διαφορετικές θέσεις στην αίθουσα. Η πολυκατευθυντική

πηγή έχει ύψος 1,5 m, το μικροφώνου 1,2m, κατευθυνθείς προς την πηγή και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 4m. Οι μετρήσεις έγιναν σε 13 θέσεις χωρίς ακροατήριο, σύμφωνα με τις οδηγίες του ISO-3382.



Γράφημα 1.2 Αποτελέσματα μετρήσεων χρόνου αντίληψης

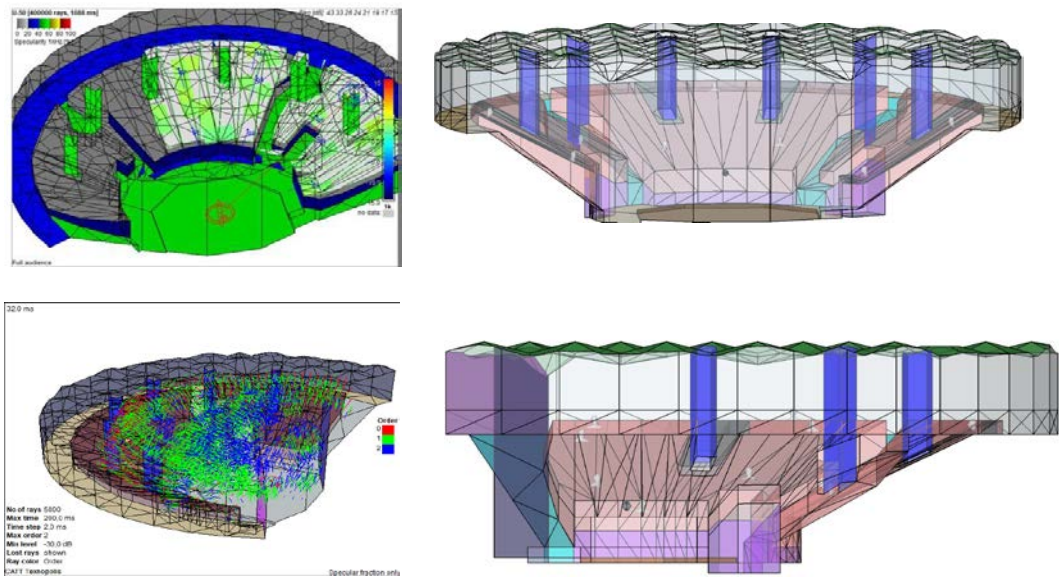


Πίνακας 1.2 Αποτελέσματα ακουστικών παραμέτρων από μετρήσεις

Θέση	C80	D50	STI
A.2.6	5.41	0.66	0.57
B2.9	3.72	0.54	0.67
C1.4	4.32	0.6	0.71
D2.20	4.4	0.61	0.64
D3.27	6.54	0.67	0.68
E2.12	6.54	0.67	0.68
E2.17	4.39	0.63	0.64
F1.3	4.18	0.59	0.55
G2.30	5.27	0.62	0.71
H2.12	3.61	0.61	0.63
H2.20	5.07	0.65	0.72
H2.29	8.19	0.83	0.73
H1.8	2.74	0.54	0.65

### 1.3 Πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων

Για την πρόβλεψη των ακουστικών παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CATT Acoustic 9.1e- TUCT, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και γεωμετρικές τεχνικές ανίχνευσης ακτινών (ray tracing)



Πίνακας 1.3. Αποτελέσματα ακουστικών παραμέτρων από μετρήσεις

Θέση	C80	D50	STI
B3.13 (01)	3.92	57.95%	0.70
G3.29 (02)	9.07	82.77%	0.72
B1.03 (03)	6.27	58.69%	0.66
G1.03 (04)	8.28	78.35%	0.68
E2.12 (05)	-2.66	33.75%	0.66
H2.14 (06)	7.26	70.27%	0.69
B2.08 (07)	8.51	74.24%	0.68
G2.20 (08)	8.34	68.59%	0.68
D1.09 (09)	7.67	66.82%	0.66

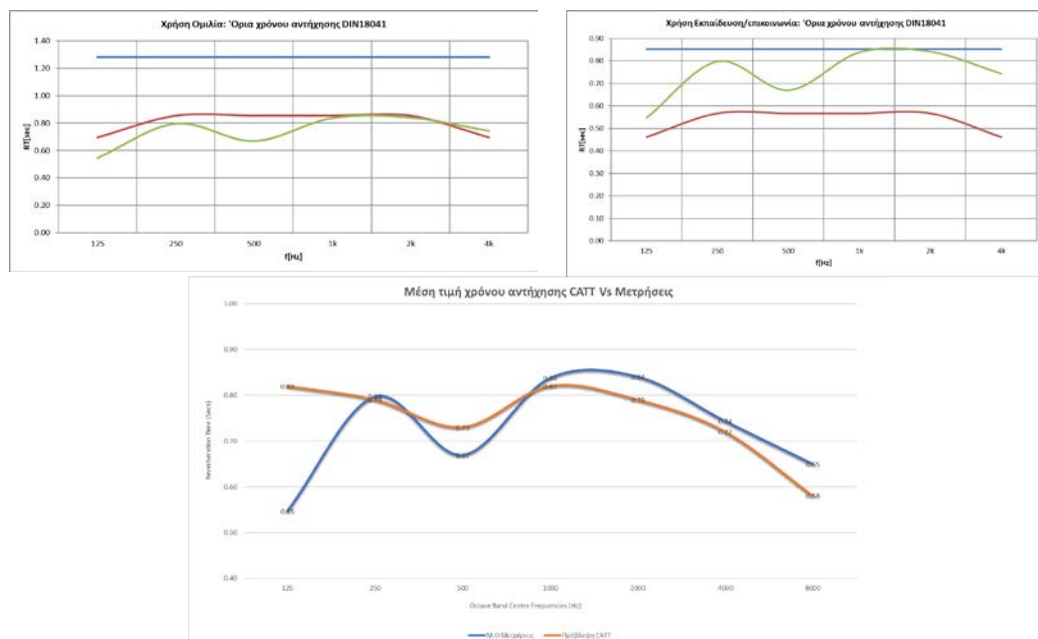
## 2. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων, διαπιστώνεται ότι ο χρόνος αντήχησης κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα σε όλο το φάσμα των

συχνοτήτων. Ο μέσος όρος RT63 έως 250Hz = 0.76sec, RT500 έως 2000Hz = 0.78 sec, RT 4000 έως 16.000Hz = 0.65 sec, τιμές πολύ ικανοποιητικές για την καταληπτότητα της ομιλίας. Ο συγκεκριμένος χρόνος αντήχησης, μπορεί να εξυπηρετήσει χρήσεις όπως συνέδρια και ομιλίες. Παράλληλα οι δείκτες ευκρίνειας- διαύγειας, καλύπτουν τις απαιτήσεις του DIN 18041. Ο δείκτης STI , μετρήθηκε με το σύστημα ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης καθώς επίσης και με πηγή θορύβου «Talk Box» το οποίο σχεδιάστηκε και βαθμονομήθηκε σε απόκριση συχνότητας αλλά και στάθμη ακουστικής ισχύος σύμφωνα με το IEC 60268-16:2020.

Τα διαγράμματα των μετρήσεων κρουστικής απόκρισης, δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την συνεισφορά σε διάχυση της νέας οροφής προς το ακροατήριο. Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας, χωρίς να παρατηρηθούν δυσάρεστα ακουστικά φαινόμενα. Οι προβλέψεις του ακουστικού μοντέλου, ήταν αρκετά πιο αισιόδοξες σε σχέση με τις μετρήσεις. Ο υπολογισμός των συντελεστών διάχυσης των υλικών της αίθουσας (diffusion/scattering coefficient) αποτελεί ένα πολύ σοβαρό θέμα στην πρόβλεψη των ακουστικών παραμέτρων. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία δεν καλύπτει τις ανάγκες σχεδιασμού, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί και μια αβεβαιότητα σχετικά με την ακρίβεια πρόβλεψης ακουστικών παραμέτρων.

Ωστόσο το πιο σημαντικό κριτήριο, ο χρόνος αντήχησης ήταν μέσα σε αποδεκτά όρια σε σχέση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η σύγκριση πρόβλεψης και μέτρησης καθώς επίσης και η σύγκριση σύμφωνα με τα όρια του χρόνου αντήχησης (ομιλία και Εκπαίδευση/Επικοινωνία) σύμφωνα με το DIN18041 δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



### **3. Βιβλιογραφία**

- [1] Barron, M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Chapman & Hall, London. (1993)
- [2] Barron, M.. 21 years of Acoustic Scale Modeling Testing. Proceedings of Institute of Acoustics, Vol.19:Part3, Published by IOA, 67-80. (1997)
- [3] Cavanaugh,W.. Architectural Acoustics Principles and Practice. John Wiley & Sons Inc, NY. (1998)
- [4] Cremer, L. & Muller, H. & Schultz, T.. Principles and Applications of Room



## **Συγκριτική Αξιολόγηση Πειραματικών διατάξεων κατασκευαστικών λύσεων εσωτερικής διαχωριστικής τοιχοποιίας.**

**Β. Βασιλειάδης,**  
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός  
Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής  
Τεχνολογίας ΑΠΘ.  
vvasil@arch.auth.gr

**Π. Καραμπατζάκης**  
Αρχιτέκτων Μηχανικός,  
Σύμβουλος Ακουστικής,  
info@nestos.net

**Στέλλα Χαδιαράκου**  
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός  
[stellah@fibran.gr](mailto:stellah@fibran.gr)  
FIBRAN A.E.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ : Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (Building-Architectural Acoustics)

Λέξεις Κλειδιά : Ηχομόνωση, Εργαστηριακές μετρήσεις, Διαχωριστική τοιχοποιία, Κυτία

Το πρόβλημα που καλείτε να επιλύσει η σύγχρονη αρχιτεκτονική είναι η ηχομόνωση των κατασκευών ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των ενοίκων. Το πρόβλημα είναι εντονότερο σε κτήρια συνάθροισης κοινού όπως ξενοδοχεία, κτήρια γραφείων κλπ. Διαχωριστικές τοιχοποιίες μεταξύ γραφείων ή δωματίων αλλά και πολυσύχναστων διαδρόμων καλούνται να έχουν την απαραίτητη ηχομείωση, ώστε να εξασφαλίζεται η «ησυχία» στα δωμάτια. Εξάλλου τα τελευταία χρόνια απαιτήσεις ηχομόνωσης ορίζουν και οι μεγάλοι τουριστικοί πράκτορες αφού προδιαγράφουν την ηχομόνωση ως ένα πλεονέκτημα του καταλύματος.

Στο πλαίσιο αυτό σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα πειραματικών μετρήσεων σε διαχωριστικές τοιχοποιίες. Το πρόγραμμα είχε ως απαίτηση τις ελάχιστες απαιτήσεις του DIN 4109 που αποτελεί το πιο διαδεδομένο πανευρωπαϊκά κείμενο απαιτήσεων ηχομόνωσης κατασκευών και αποτελούνταν περισσότερες από 50 μετρήσεις. Αναλυτικότερα, μελετήθηκαν συστήματα με μια ή δύο γυροσανίδες εκατέρωθεν καθώς επίσης και ένας ή δυο σκελετοί. Παράλληλα μελετήθηκαν διάφορα πάχη σκελετών, όπως αυτά διατίθενται στην αγορά. Στα συστήματα ως ηχομονωτικό υλικό χρησιμοποιείται ο πετροβάμβακας σε δυο πυκνότητες 50 και 100kg/m<sup>3</sup> και σε διάφορα πάχη. Τέλος, μελετήθηκε η συμπεριφορά ηχομονωτικών και απλών κυτιών σε ηχομονωτικές λύσεις.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά των συστημάτων ανάλογα των επιμέρους στοιχείων του, καθώς και του τύπου των κυτιών, ώστε να επιλέξουμε το κατάλληλο σύστημα για την κάθε κατασκευή.

### **Εισαγωγή**

Το πρόβλημα που καλείτε να επιλύσει η σύγχρονη αρχιτεκτονική είναι η ηχομόνωση των κατασκευών ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των ενοίκων. Το πρόβλημα είναι εντονότερο σε κτήρια συνάθροισης κοινού όπως ξενοδοχεία, κτήρια γραφείων κλπ. Διαχωριστικές τοιχοποιίες μεταξύ γραφείων ή δωματίων αλλά και πολυσύχναστων διαδρόμων καλούνται να έχουν την απαραίτητη ηχομείωση, ώστε να εξασφαλίζεται η «ησυχία» στα δωμάτια. Εξάλλου τα τελευταία χρόνια απαιτήσεις ηχομόνωσης ορίζουν και οι μεγάλοι τουριστικοί πράκτορες αφού προδιαγράφουν την ηχομόνωση ως ένα πλεονέκτημα του καταλύματος.

Στο πλαίσιο αυτό σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα πειραματικών μετρήσεων σε διαχωριστικές τοιχοποιίες. Το πρόγραμμα είχε ως νομική απαίτηση τις ελάχιστες απαιτήσεις του DIN 4109 που αποτελεί το πιο διαδεδομένο πανευρωπαϊκά κείμενο τεχνικών υποδείξεων ηχομόνωσης των κατασκευών και αποτελούνταν περισσότερες από 50 μετρήσεις. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι παράμετροι μέτρησης, θα περιγράψουν οι κατασκευαστικές λύσεις και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

### **1. Θεωρητικό Υπόβαθρο**

Σε αντίθεση με την εύκολη ερμηνεία του φαινομένου της ηχομονωτικής ικανότητας μίας μονοκέλυφης κατασκευής, για την οποία, τις περισσότερες φορές αρκεί ο νόμος της μάζας, οι

δυπλοκέλυφες κατασκευές, είναι πολύπλοκες οντότητες και η ανάλυση του μηχανισμού λειτουργίας τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Γενικά ισχύει ο μηχανισμός μάζα – ελατήριο – μάζα αλλά εκ της φύσεως του, ο μηχανισμός αυτός, παρουσιάζει διαφορές στο φάσμα λειτουργίας του εξ αιτίας πολλών ποιοτικών και φυσικών χαρακτηριστικών.

Για να κατανοήσουμε την λειτουργία της διπλοκέλυφης κατασκευής μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελείται από δύο πλάκες (πάνελ), κάθε μία σε μία παρειά της κατασκευής και στο ενδιάμεσο υπάρχει αέρας και έχει εφαρμοστεί ένα ηχοαπορροφητικό μέσο.

Σε χαμηλές συχνότητες η ακαμψία του ενδιάμεσου των πάνελ, αέρα, είναι τόσο υψηλή σε σχέση με την αδράνεια των πάνελ ώστε τα δύο πάνελ είναι «κλειδωμένα» μεταξύ τους και περισσότερο ή λιγότερο συμπεριφέρονται, ως ένα μόνο πάνελ. Το TL στην περίπτωση αυτή, καθορίζεται, από τον νόμο μάζας χρησιμοποιώντας τη συνδυασμένη μάζα των δύο πλαισίων, ως σύνολο.

Καθώς η συχνότητα διέγερσης αυξάνεται, η αδράνεια των πάνελ αυξάνεται στη συχνότητα συντονισμού του συστήματος μάζας-αέρα-μάζας, η αδράνεια των πάνελ ακυρώνεται από την ακαμψία του αέρα και τα δύο πάνελ απομακρύνονται από τη φάση μεταξύ τους.

Καθώς η συχνότητα αυξάνεται περαιτέρω, το TL αυξάνεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό από τον νόμο μάζας (έως 12 dB/οκτάβα). Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες όπου η απόσταση των πάνελ, γίνεται μικρότερη από  $\frac{1}{2}$  του μήκους κύματος η κατασκευή μπορεί τώρα να θεωρηθεί ανεξάρτητη με έναν μόνο πάνελ σε κάθε πλευρά.

Η παραπάνω γενικότητα επηρεάζεται τοπικά από τους παρακάτω υπολογισμούς με βάση τη :

Critical frequency.

Σε υψηλότερες συχνότητες η ακαμψία των υλικών γίνεται σημαντική και σε μια συγκεκριμένη συχνότητα γνωστή ως κρίσιμη συχνότητα (Critical frequency), το TL του στοιχείου, πέφτει πολύ κάτω από το νόμο μάζας. Πάνω από την κρίσιμη συχνότητα, το TL αυξάνεται κατά 12 dB/οκτάβα, έτσι ώστε καθώς αυξάνεται η συχνότητα, το TL μπορεί να αυξηθεί πάνω από το νόμο μάζας.

Modulus of Elasticity

Η κρίσιμη συχνότητα ενός πάνελ καθορίζεται από το μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus) και το πάχος του πάνελ.

Για τα περισσότερα “κανονικά” υλικά το γινόμενο της επιφανειακής μάζας ( $\text{kg/m}^2$ ) και της κρίσιμης συχνότητας είναι σταθερά και αυτή η απλή σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί γρήγορα η συχνότητα σύμπτωσης οποιουδήποτε δεδομένου πάχους.

Damping (Loss Factor)

Internal damping (Εσωτερική απόσβεση)

Η εσωτερική απόσβεση του στοιχείου, επηρεάζει το μέγεθος του TL (και πάνω από την κρίσιμη συχνότητα).

Edge damping (Απόσβεση άκρων)

Ο συντελεστής απόσβεσης των άκρων περιγράφει την απώλεια ενέργειας που συμβαίνει στην άκρη ενός κανονικού δομικού στοιχείου, όπου τα ηχητικά κύματα μεταδίδονται στη γύρω δομή. Αυτό είναι σημαντικό για πολύ βαριά χωρίσματα σε κανονικές κατασκευές.

Σε ορισμένες εργαστηριακές μετρήσεις και σε ορισμένες ασυνήθιστες καταστάσεις το χωρίσμα μπορεί να μην είναι σταθερά συνδεδεμένο με την γύρω δομή και έτσι η απώλεια ενέργειας είναι πολύ μικρότερη

## 2. Υλικά

Οι κατασκευαστικές λύσεις που μελετήθηκαν κατασκευάστηκαν με υλικά πιστοποιημένα με βάση τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα. Αναλυτικότερα οι γυψοσανίδες είναι σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 520, έχουν διαστάσεις 2400x1200mm και πάχος 12.5mm. Η επιλογή της πιο κοινής γυψοσανίδας έγινε ώστε τα αποτελέσματα να ισχύουν και για βαρύτερες γυψοσανίδες όπως είναι η ανθυγρή αλλά και η πυράντοχη.

Ο μεταλλικός σκελετός που επιλέχθηκε είναι σύμφωνα με τον EN 14195 και πάχους 60mm όπως ορίζεται και από το DIN 4109

Τέλος για την πλήρωση των συστημάτων έχει επιλεγεί πετροβάμβακας δυο πυκνοτήτων 50 και 100  $\text{kg/m}^3$  αντίστοιχα και πάχη ανάλογα με τους σκελετούς των κατασκευών 40-60-90mm αντίστοιχά.

Ο πετροβάμβακας είναι πιστοποιημένος σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13162 και έχει υπολογισμένο το συντελεστή ηχοαπορρόφησης του αλλά και την αντίσταση ροής αέρα AFR.

Τέλος, στα υλικά συγκαταλέγονται απλά και ηχομονωτικά κυτία, ώστε να μετρηθεί η επίδραση τους στο τελικό αποτέλεσμα του δείκτη ηχομείωσης

## 3. Πρότυπα Μετρήσεων -Εργαστηριακός Εξοπλισμός

Η δοκιμή υλοποιήθηκε σύμφωνα με τις διαδικασίες που καθορίζονται στο πρότυπο ISO 10140-2:2021, Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements -Part 2: Measurement of airborne sound insulation.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής στις ζώνες συχνοτήτων από 100 μέχρι 3150 Hz (σε τριτοοκτάβες) χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του Σταθμισμένου Δείκτη Ηχομείωσης του δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 717-1:2013.

Οι θάλαμοι δοκιμών είναι κατασκευασμένοι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 10140-5:2021

Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι του οίκου NORSONIC και διακριβώνεται κάθε χρόνο από εργαστήριο του εξωτερικού.

Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα υπολογίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12999-1:2014 και βρέθηκε αμελητέα.

Το Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας είναι διαπιστευμένο Εργαστήριο κατά EN ISO/IEC 17025: 2005 από το ΕΣΥΔ (Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης) και ελέγχεται σε ετήσια βάση ως προς την τήρηση όλων των προτύπων.

Το Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας είναι κοινοποιημένος Φορέας της Ευρωπαϊκής Ένωσης,

#### 4. Συστήματα – Πειραματικές Διατάξεις

Τα συστήματα που επιλέχθηκαν προκρίνονται ως τις συνηθέστερες λύσεις για την ηχομόνωση διαχωριστικών τοιχοποιιών δωματίων, γραφείων και αιθουσών, όπου η ανάγκη για έλεγχο του ήχου είναι επιβεβλημένη.

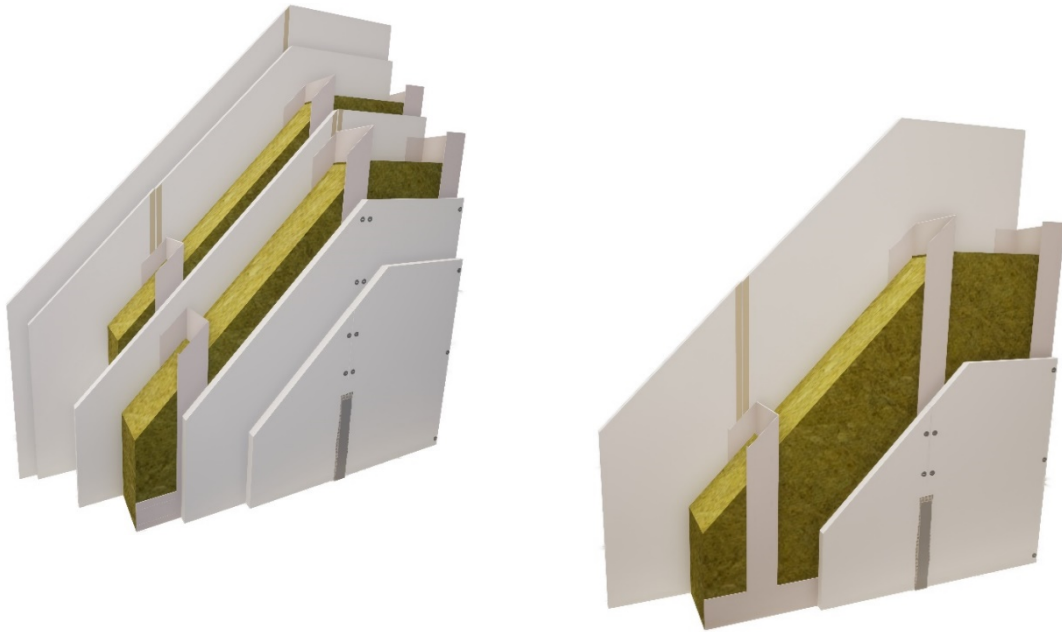
Αναλυτικότερα μελετήθηκαν συστήματα με διπλή γυψοσανίδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, αλλά και σύνθετα συστήματα με διπλό σκελετό για πιο απαιτητικές εφαρμογές (Σχήμα 1.2 και 1.3) και τέλος μετρήθηκαν και τα απλά συστήματα με μονή γυψοσανίδα για την σύγκριση τους με τα υπόλοιπα (Σχήμα 1.4)

*Σχήμα 1.1 Σύστημα Ξηράς Δόμησης με διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν και πλήρωση με πετροβάμβακα*



*Σχήμα 1.2 Σύστημα Ξηράς Δόμησης με διπλό σκελετό και διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν και πλήρωση με πετροβάμβακα*

*Σχήμα 1.3 Σύστημα Ξηράς Δόμησης με διπλό σκελετό και διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν και πλήρωση με πετροβάμβακα*



*Σχήμα 1.4 Σύστημα Ξηράς Δόμησης με μονό σκελετό και πλήρωση με πετροβάμβακα*

Στο παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν

*Πίνακας 1.1. Συστήματα Ξηράς Δόμησης*

Σύστημα ξηράς δόμησης					
Σύστημα	Πάχος mm	Βάρος kg/m <sup>2</sup>	Σκελετός mm	Πάχος μονωτικού mm	Απαιτήση DIN 4109
	12,5	25	50	40	41
			75	60	42
			100	90	45
	12,5	45	50	40	48
			75	50	48/40mm
				60	51/60mm
			100	50	49/40mm
				60	51/60mm
80	52/80mm				
	12,5	50	50+10+50	40+40	60/50mm
	12,5	60	50+20+50	40+50	
				40+40	

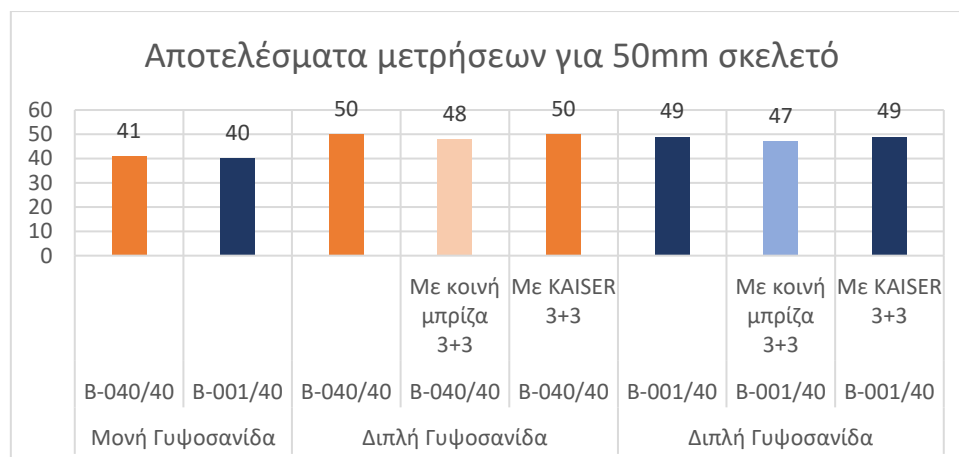
Σε κάθε ένα από τα παραπάνω συστήματα εξετάστηκαν αλλαγές στην πυκνότητα του πετροβάμβακα, αλλά και στη χρήση απλών και ηχομονωτικών κυτρίων και στον αριθμό των οπών. Αναλυτικότερα:

- Πυκνότητα πετροβάμβακα 50 και 100kg/m<sup>3</sup>
- Μέτρηση με 1 και με 3 κοινά ηλεκτρολογικά κυτρία
- Μέτρηση με 1 και με 3 ηχομονωτικά κυτρία

Στα συστήματα με το διπλό σκελετό που χρησιμοποιήθηκε μόνο πετροβάμβακας 50kg/m<sup>3</sup>. Συνεπώς συνολικά έγιναν 70 μετρήσεις.

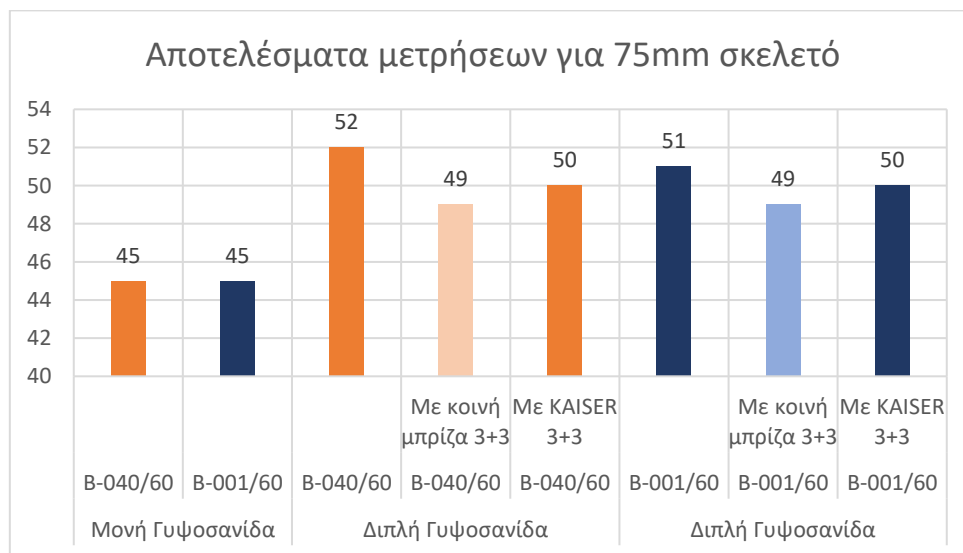
## 5. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα ακόλουθα διαγράμματα και διαχωρίζονται με βάση το μεταλλικό σκελετό. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πιο στενό σκελετό αυτό των 50mm. Παρατηρούμε πως όλα τα αποτελέσματα καλύπτουν και υπερέρχουν τις απαιτήσεις του DIN 4109. Επίσης παρατηρούμε πως τα ηχομονωτικά κυτρία διατηρούν υψηλά την ηχομονωτική ικανότητα του χωρίσματος.

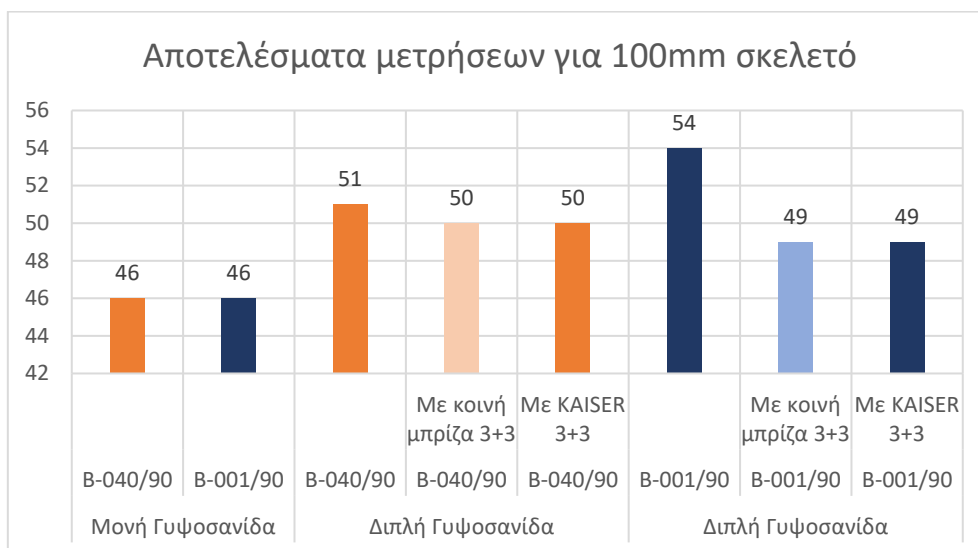


Σχήμα 1.5 Αποτελέσματα μετρήσεων για μεταλλικό σκελετό 50mm με μονή ή διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν

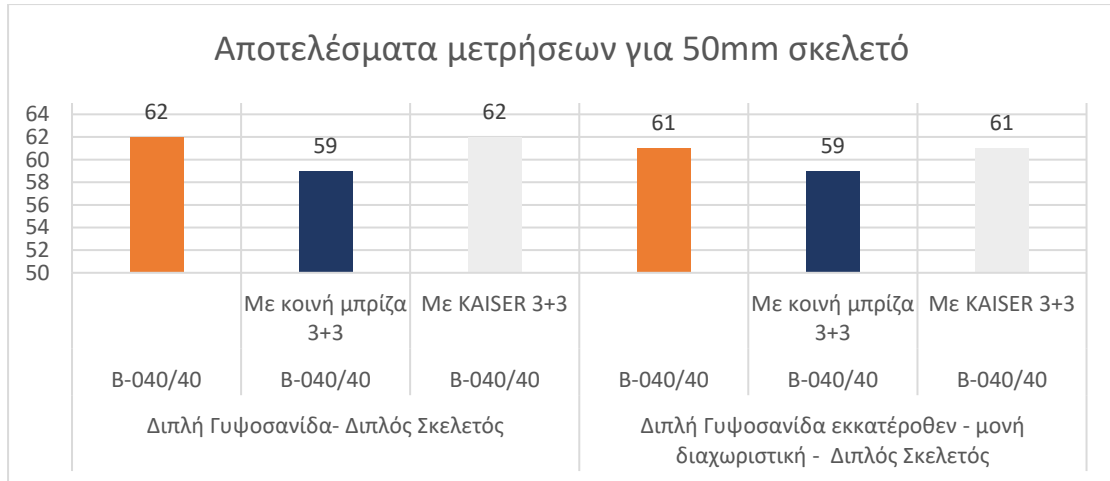
Παρόμοια αποτελέσματα είχαμε και για τα υπόλοιπα πάχη σκελετών όπως αυτά φαίνονται στα σχήματα 1.6 και 1.7. Τέλος στο σχήμα 1.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους διπλοκέλυφους τοίχους. Σημείο προσοχής είναι η σημαντική μείωση όταν ανοίγουν οι οπές και χρησιμοποιούνται κοινοί διακόπτες. Οι συγκεκριμένες κατασκευαστικές περιπτώσεις είναι και οι πιο συνηθισμένες όταν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις ηχομείωσης.



Σχήμα 1.6 Αποτελέσματα μετρήσεων για μεταλλικό σκελετό 75mm με μονή ή διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν

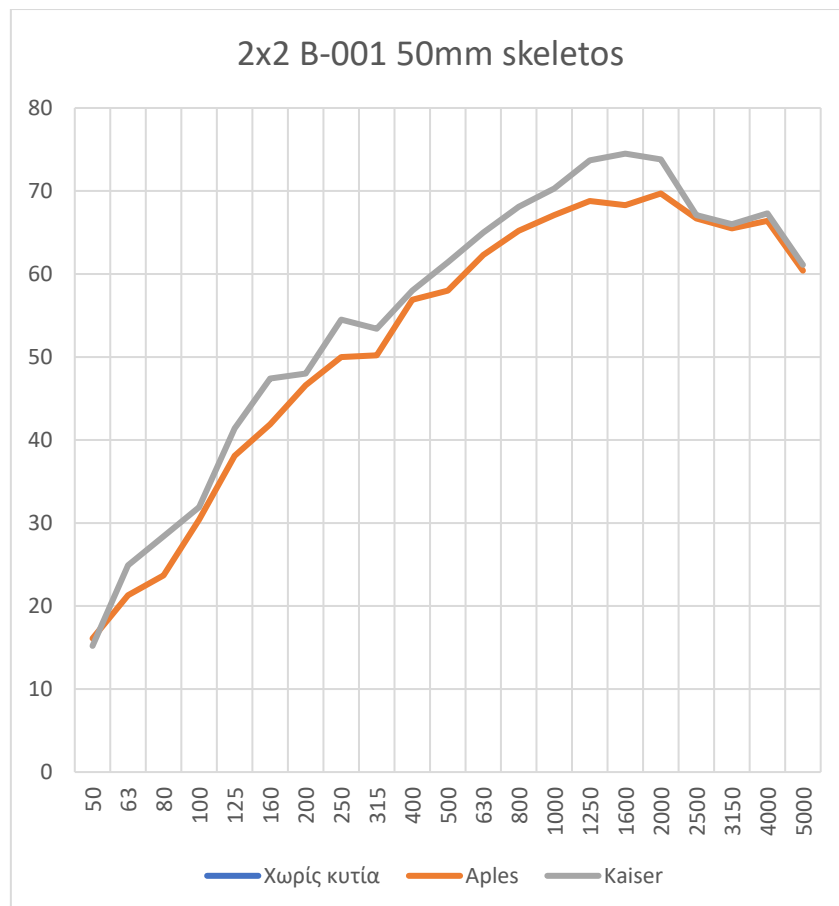


Σχήμα 1.7 Αποτελέσματα μετρήσεων για μεταλλικό σκελετό 100mm με μονή ή διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν



Σχήμα 1.8 Αποτελέσματα μετρήσεων για διπλό μεταλλικό σκελετό 50mm με διπλή γυψοσανίδα εκκατέρωθεν αλλά και στη μία περίπτωση και μια γυψοσανίδα εσωτερικά

Επιπρόσθετα στο σχήμα 1.9 συγκρίναμε τα φάσματα για μια ενδεικτικά λύση, αυτή της διπλής γυψοσανίδας εκκατέρωθεν με σκελετό 50mm. Παρατηρούμε την διαφοροποίηση που προκαλείται στην ακουστική συμπεριφορά του χωρίσματος χωρίς οπές και με απλά κυτία, ενώ γίνεται εύκολα αντιληπτό τι επιτυγχάνεται με τη χρήση ηχομονωτικών κυτίων.



Σχήμα 1.9 Αποτελέσματα μετρήσεων για διπλό μεταλλικό σκελετό 50mm με διπλή γυψοσανίδα εκατέρωθεν αλλά και στη μία περίπτωση και μια γυψοσανίδα εσωτερικά

## 6. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά λοιπόν, έγινε μια προσπάθεια μέσω ενός φιλόδοξου προγράμματος μετρήσεων να μετρηθούν τα πιο συχνά κατασκευαστικά συστήματα εσωτερικών χωρισμάτων. Επιπρόσθετα μελετήθηκε η συμμετοχή των οπών αλλά και των κυτίων ηχομονωτικών και μη στην ηχομονωτική του αξία. Διαπιστώθηκε από τα αποτελέσματα των μετρήσεων πως καλύπτουν τις απαιτήσεις του DIN 4109. Παράλληλα, η ύπαρξη οπών με την χρήση ηχομονωτικών κυτίων έδωσε καλύτερα αποτελέσματα από τα απλά κυτία.

Για τη συνέχεια έχουν προγραμματιστεί μετρήσεις με τα ίδια προϊόντα ώστε να δημιουργηθεί ένα ικανό στατιστικό δείγμα αλλά και μετρήσεις με ειδικού τύπου γυψοσανίδες και πιο αντιπροσωπευτικό αριθμό οπών.

## 7. Αναφορές

1. Ballagh, K. 2004, '[Accuracy of predictions methods for sound transmission loss](#)', Proceedings of Internoise 2004, INCE, Prague, Czech Republic.
2. Beranek, L 1971, Noise and Vibration Control, McGraw-Hill, New York
3. Cremer, L, Heckl, M & Petersson, B.A.T 2005, *Structure borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*, Springer-Verlag, Berlin.
4. Gomperts, MC 1964, 'The sound insulation of circular and slit-shaped apertures', *Acustica*, vol. 14, no. 1, pp. 1-16.
5. Heckl, M., 1960, 'Untersuchungen An Orthotropen Platten', *Acustica*, vol. 10 pp 109-115.
6. Lam, Y.W. & Windle, R.M. 1994, 'A simple empirical method for predicting the sound reduction of single skin cladding', *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 16, no. 2, pp. 445-452.
7. Rindel, J.H. 'Sound Radiation from Building Structures and Acoustical Properties of Thick Plates', COMETT-SAVOIR Course, Noise Control in Buildings, CSTB, Grenoble, France
8. Sharp, BH 1978, 'Prediction methods for the sound transmission of building elements', *Noise Control Engineering*, vol. 11.
9. EN 520: Γυψοσανίδες – Ορισμοί, απαιτήσεις και μέθοδοι δοκιμής
10. EN 14195:2014 Metal framing components for gypsum board systems - Definitions, requirements and test methods
11. EN ISO/IEC 17025: 2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories
12. ISO 10140-2:2021, Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements -Part 2: Measurement of airborne sound insulation.



## **Εφαρμοσμένο επιστημονικό & ερευνητικό έργο για την υποστήριξη της εθνικής παραγωγικής αλυσίδας κατασκευής δομικών στοιχείων έναντι αερόφερτων θορύβων**

**Κατσαρός Μιλτιάδης<sup>1</sup>, Τιμαγένης Ιωάννης<sup>2</sup>, Τιμαγένη Αλεξάνδρα<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Αν. Καθηγητής ΕΜΠ, Δ/ντής Τομέα Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής & Δ/ντής Εργαστηρίου Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π. | Αρχιτέκτονας Μηχ., March & UDes

<sup>2</sup> Υπ. Διδάκτωρ, Ερευνητής – Υπεύθυνος ηχομετρήσεων Εργαστηρίου Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων, Σ.Α.Μ., Ε.Μ.Π. Αρχιτέκτονας Μηχ., Σύμβουλος Ακουστικής MSc, MArch, BA (Hons) Arch

<sup>3</sup> Αρχιτέκτονας Μηχ. Ε.Μ.Π.

Πατησίων 42 Αθήνα  
soundtechlab@arch.ntua.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων του Τομέα Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, του Ε.Μ.Π., ιδρύθηκε το 1954 από τον αείμνηστο Καθηγητή Δρ. Β. Παπαθανασόπουλο και ξεκίνησε τις ερευνητικές του δραστηριότητες με τον τίτλο «Εργαστήριο Ηχοτεχνίας» επιχειρώντας επί σχεδόν 70 συνεχή έτη να βρίσκεται στην αιχμή της ερευνητικής πρωτοπορίας στον τομέα της Ακουστικής.*

*Από το 2018 το πρώην Εργαστήριο Ηχοτεχνίας επιχειρεί ένα νέο ξεκίνημα, διευρύνοντας τις ερευνητικές του δραστηριότητες στους τομείς των προσομοιώσεων, της φυσικής κατασκευής ακουστικών πεδίων, αλλά και στην ανάπτυξη της τεχνολογίας Ελληνικών ηχομονωτικών προϊόντων. Η μετεξέλιξη του Εργαστηρίου υποστηρίχθηκε από την σύνταξη νέου κανονισμού λειτουργίας, την έναρξη της διαδικασίας πιστοποίησης του Εργαστηρίου στον ΕΣΥΔ και την μετονομασία του σε «Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας και Προσομοιώσεων».*

*Ειδικότερα, στα πλαίσια της προαναφερόμενης αναβάθμισης και εξέλιξης του Εργαστηρίου σημαντικό έργο αποτελεί η ανάπτυξη και η εφαρμογή από την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου (2&3), ενός πρότυπου «εργαστηριακού δομοστοιχειωτού διαφράγματος» με το οποίο επιτυγχάνεται αύξηση των δυνατοτήτων αυτού, ώστε να γίνονται ηχομετρήσεις δοκιμών με ιδιαίτερα υψηλή ηχομονωτική ικανότητα ως προς αερόφερτους θορύβους, πράγμα το οποίο συνετέλεσε στην περαιτέρω βελτίωση των ήδη εξαιρετικών επιδόσεων του εργαστηρίου στον τομέα αυτόν. Πέραν της επιστημονικής αποδόμησης των παραμέτρων  $R_f$  και  $R_{max}$ , στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται τα επιστημονικά δεδομένα απόδοσης του δομοστοιχειωτού διαφράγματος καθώς και παραδείγματα πρακτικών εφαρμογών του. Επίσης, το άρθρο πραγματεύεται τις επιστημονικές μεθοδολογίες και διεργασίες με τις οποίες το*

ανωτέρω ερευνητικό μοντέλο συμβάλλει όχι μόνο στην ποιοτική ανάλυση και πιστοποίηση των δομικών στοιχείων ηχομόνωσης, αλλά μέσω των ερευνητικών αποτελεσμάτων ενισχύει την εθνική παραγωγική αλυσίδα στον κατασκευαστικό παραγωγικό τομέα της ηχομόνωσης & ηχοπροστασίας.

**Λέξεις κλειδιά:** Εργαστήριο Ακουστικής ΕΜΠ,  $R'_{max}$ , Αρχιτεκτονική, Ηχομόνωση, Αερόφερτος Θόρυβος, Ανάπτυξη Ελληνικών προϊόντων, Πιστοποίηση

## ***Applied scientific research for the support of the production chain of Hellenic building acoustics materials against airborne noise***

### **ABSTRACT**

*The Acoustics Research & Simulation Laboratory, NTUA School of architecture, dept IV was founded in 1954 by late Professor Dr. V. Papathanasopoulos and initiated its research activities under the title “Laboratory of Sound Technology”. During its almost 70 years of operation it has always been the spearhead of the acoustics research for the major Hellenic projects. Since 2018 the ex “Laboratory of Sound Technology” starts a new era by expanding its research capabilities at the areas of acoustical simulations, research on the physical reconstruction of auditory scenes and soundscapes, as well as the support of research related to the enhancement of the acoustic performance of Hellenic building materials. The above-mentioned breakthrough has also been accompanied by the composition of a totally new internal operations regulation, the initiation of the registration process to the National Accreditation System as a notified body and the renaming of the laboratory as “Acoustics Research and Simulation Laboratory NTUA”. One of the pivotal highlights of the above mentioned plan was -amongst other subjects- the research and development of a flexible modular diaphragm, by the Lab’s research team (2&3). The aim of the new modular partition in matter was to speed up the test element mounting times, reduce the cost of construction especially when having multiple test elements of different sizes and at the same time investigate in practical terms the measured  $R'_{max}$  of the laboratory, for supplementing the already excellent performance of the lab facilities. Further to the presentation of practical examples of the diaphragm’s application and its contribution in the qualitative measurements of high insulation elements’, the present article also engages the results of the measured  $R_w$  in a wider discourse about its contribution in the research and development of the production chain of the Hellenic sound insulation and soundproofing materials and building arrays.*

**Key Words:** NTUA Acoustics Research & Simulations Laboratory,  $R'_{max}$ , Architecture, Sound insulation, Airborne Noise, Hellenic building industry, Certification

## 1. Εισαγωγή

Το Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων του Τομέα Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, του Ε.Μ.Π αποτελεί το πρώτο και το ιστορικότερο εργαστήριο έρευνας και ανάπτυξης ηχομονωτικών και ηχοαπορροφητικών διατάξεων και κατασκευών της Ελλάδας [1] και διαθέτει τους ακόλουθους θαλάμους μετρήσεων, όλοι συμβατοί με τα αντίστοιχα πρότυπα μετρήσεων του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης:

- i. Έναν θάλαμο αντήχησης
- ii. Ένα κατακόρυφο ζεύγος θαλάμων μέτρησης κτυπογενών & αερόφερτων θορύβων (Πύργος οριζοντίων δομικών στοιχείων)
- iii. Ένα οριζόντιο ζεύγος θαλάμων μέτρησης αερόφερτων θορύβων στο ισόγειο (Σουίτα κατακόρυφων δομικών στοιχείων ισογείου)
- iv. Ένα οριζόντιο ζεύγος θαλάμων μέτρησης αερόφερτων θορύβων στον όροφο (Σουίτα κατακόρυφων δομικών στοιχείων ορόφου)

Η παρούσα εργασία αφορά σε έρευνα, που εκτελέστηκε στο υπ' αριθμόν -iv- ανωτέρω.

Κατά τις μετρήσεις ηχομόνωσης έναντι αερόφερτου θορύβου, λόγω της ανωτέρω διάταξης (βλ. σχ 1.1), είθισται χωρίς αυτό να είναι δεσμευτικό ή περιοριστικό, ο θάλαμος ισογείου (GF Suite) να χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση ογκωδών και βαρέων δομικών στοιχείων (ενδεικτικά: συστήματα προσόψεων, υαλοπετάσματα, σταθερά και κινητά διαχωριστικά πολύ μεγάλων διαστάσεων, πετάσματα ηχομείωσης τροχαίου θορύβου, γκαραζόπορτες, οπτοπλινθοδομές κ.α), ενώ ο θάλαμος ορόφου (FF Suite) αν και διαθέτει όμοιο άνοιγμα με την GF Suite, χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση δομικών στοιχείων μικρού και μεσαίου μεγέθους (ενδεικτικά θύρες, μικρά παράθυρα, υαλοπίνακες μικρών διαστάσεων, συστήματα εξερισμού, ηχομονωτικές κουρτίνες, ηχομονωτικά πάνελ, ηχοφραγές, στοιχεία σφράγισης αρμών κ.α.).

Όπως είναι γνωστό [2] για την εκτέλεση μετρήσεων της δεύτερης περίπτωσης απαιτείται ανάρτηση του δοκιμίου επί εξειδικευμένου ηχομονωτικού διαφράγματος κατάλληλης φασματικής ηχομόνωσης τέτοιας ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία της μέτρησης (βλ. επόμενο κεφάλαιο). Τούτο δε είναι απολύτως κεφαλαιώδες στην αξιόπιστη και επιτυχή διεξαγωγή της μέτρησης ούτως ώστε να αποφευχθούν ψευδώς - θετικά [3] αποτελέσματα τα οποία όχι μόνον αποτελούν επιστημονικό σφάλμα αλλά πολλές φορές οδηγούν και σε οικονομική ζημία του αναθέτη της έρευνας, λόγω της -φαινομενικά- χαμηλότερης επίδοσης του μετρούμενου συστήματος του. Τέλος, αν και η κατασκευή ενός διαφράγματος μπορεί να αποτελεί ένα αρκετά λογικό και εύκολα κατανοητό ζήτημα, οι συγγραφείς σημειώνουν ότι από την εμπειρία τους σε περιπτώσεις που έχουν κληθεί να ελέγξουν την επίδοση αντίστοιχων ηχομονωτικών κατασκευών έχουν εντοπίσει ελαττώματα σε βασικά σημεία της διαδικασίας υλοποίησης (λ.χ. εσφαλμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, αφανείς ηχογέφυρες, ρήξεις συναρμογών λόγω λανθασμένης επίλυσης στηρίξεων ή κακού χειρισμού κατά την εγκατάσταση και απεγκατάσταση). Ως εκ τούτου τονίζουν ότι η έρευνα και ανάπτυξη ενός τέτοιου στοιχείου απαιτεί τον συνδυασμό των κανόνων της οικοδομικής με τις επιστημονικές αρχές της ακουστικής, βασισμένες στην χρόνια εμπειρία παλαιότερων εφαρμογών και επομένως δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως «συνταγή» άνευ περιορισμών και ιδιαιτεροτήτων.

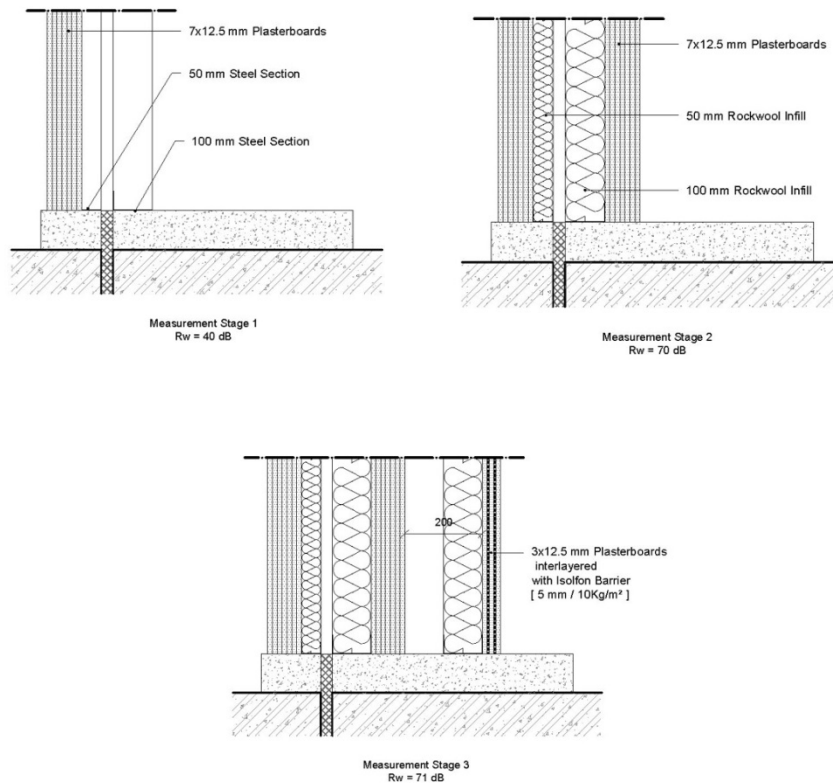


Σχήμα 1.1: Τμήμα της διαμήκους τομής του Εργαστηρίου στο οποίο διακρίνονται οι δύο θάλαμοι μέτρησης ηχομόνωσης (GF & FF) αερόφερτων θορύβων.

## 2. Προηγούμενη έρευνα

Προκειμένου να διασφαλισθεί η ακρίβεια του αποτελέσματος των υπολογισμών [4] της επίδοσης του δομοστοιχειωτού πετάσματος, πριν τον σχεδιασμό και την παραγωγή του, η έρευνα και ανάπτυξη του βασίστηκε τόσο στις κλασσικές μεθόδους υπολογισμού [5,6,7] λαμβάνοντας υπόψιν τα αντίστοιχα κριτήρια περιορισμούς αυτών, καθώς και σε προηγούμενες υλοποιημένες εργαστηριακές μετρήσεις [8,9,10,11] που είχαν εκτελεσθεί στο π. Εργαστήριο Ηχοτεχνίας ΕΜΠ, νυν Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ [12].

Συμπληρωματικά των ανωτέρω και πριν την τελική κατασκευή του δομοστοιχειωτού πετάσματος το 2020 οι συγγραφείς εκτέλεσαν επιπλέον προκαταρκτικές ηχομετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα 2.1.



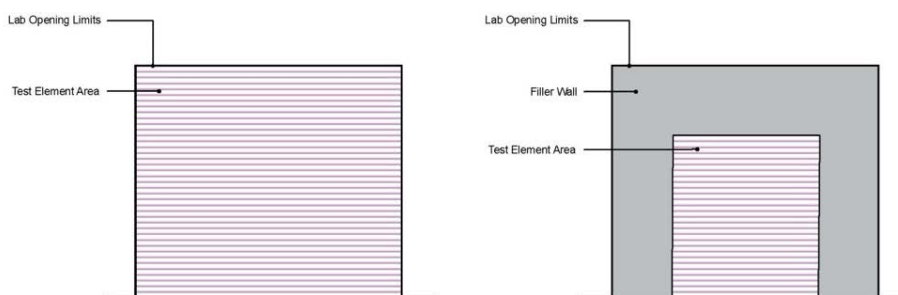
Σχήμα 2.1

*Αποτελέσματα προκαταρκτικών δοκιμών στο Εργαστήριο Ακουστικής ΕΜΠ πριν την εκκίνηση της κατασκευής του δομοστοιχειωτού πετάσματος*

### 3. Το δομοστοιχειωτό πέτασμα

Κατά τις πιστοποιήσεις της ηχομονωτικής απόδοσης δοκιμών έναντι αερόφερτου θορύβου, υφίστανται οι δύο ακόλουθες μέθοδοι στερέωσης, σχ. 3.1 [2]:

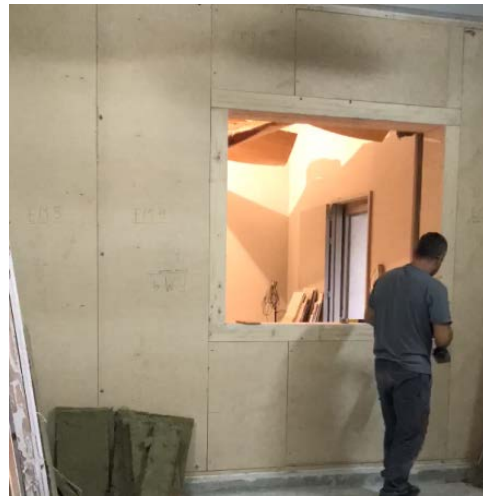
- i. Απευθείας επί του φυσικού ανοίγματος του εργαστηρίου το οποίο συνήθως έχει εμβαδόν ~10 m<sup>2</sup> (μέθοδος full-size opening)
- ii. Επί εξειδικευμένου διαφράγματος πλήρωσης το οποίο διαθέτει μικρότερο άνοιγμα για την στερέωση δοκιμών μικρότερου εμβαδού (μέθοδος reduced size opening).



Σχήμα 3.1: Οι δύο μέθοδοι στερέωσης δοκιμών κατά τις εργαστηριακές μετρήσεις (εγκάρσια τομή)

Η ιδέα κατασκευής του ξύλινου δομοστοιχειωτού πετάσματος ήταν από τις βασικές προτεραιότητες αναβάθμισης και εξέλιξης του Εργαστηρίου και προέκυψε το 2018 από την αύξηση των αναγκών του εργαστηρίου για μέτρηση πολλαπλών δοκιμών προκειμένου να αυξηθεί η παραγωγικότητα του εργαστηρίου. Η βασική λογική πίσω από το εν λόγω εγχείρημα ήταν η μείωση του χρόνου και του κόστους αναπροσαρμογής του ανοίγματος προς διευκόλυνση των κατασκευαστών για τους οποίους εκτελούνται οι πιστοποιήσεις. Το ανωτέρω πηγάζει από το ότι τα παραδοσιακά διαφράγματα ξηράς δόμησης απαιτούν συνεχές κόστος συντήρησης δεδομένης και της αποκομιδής των οικοδομικών απορριμμάτων (μπάζων) και εν γένει πολύωρη ενασχόληση για την -έστω και τμηματική- καθαίρεση και αναπροσαρμογή του ανοίγματος μέτρησης. Αντίστοιχα η εναλλακτική - επίσης παραδοσιακή επιλογή - σταθερού διαφράγματος από δικέλυφη τοιχοποιία οπλισμένου σκυροδέματος, όπως είναι ευνόητο πρακτικά ακυρώνει την οποιαδήποτε ευελιξία των θαλάμων. Η επίδειξη της λειτουργίας και της εφαρμογής παρουσιάζεται στα σχήματα 3.2 & 3.3.

Διακρίνεται μεταξύ άλλων και η απόλυτη ευελιξία που διαθέτει αφού, πέραν των 4 τυποποιημένων ανοιγμάτων που προσφέρονται, υπάρχει περαιτέρω δυνατότητα μικρών και γρήγορων προσαρμογών των ανοιγμάτων με πολύφυλλα τεμάχια ξηράς δόμησης (ανάλογης ηχομόνωσης), τα οποία επίσης μπορούν να εγκαθίστανται ως προκατασκευασμένα στοιχεία.



*Σχήμα 3.2: Κατά την αλλαγή του ανοίγματος μέτρησης του δομοστοιχειωτού πετάσματος του Εργαστηρίου Ακουστικής Έρευνας και Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ*



*Σχήμα 3.3: Το δομοστοιχειωτό πέτασμα του Εργαστηρίου Ακουστικής Έρευνας και Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ σε εφαρμογή*



#### 4. Η συμβολή στην εθνική παραγωγική αλυσίδα

Οι συγγραφείς σχεδίασαν, υλοποίησαν και μέτρησαν νέο δομοστοιχειωτό πέτασμα για την στερέωση δομικών στοιχείων τα οποία εξετάζονται ως προς την αερόφερτη εργαστηριακή ηχομονωτική τους ικανότητα. Με το εν λόγω δομοστοιχειωτό πέτασμα επετεύχθη τιμή  $R_w = 80$  dB. Η τιμή αυτή αποτελεί την υψηλότερη ηχομόνωση που έχει καταγραφεί στο Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του ΕΜΠ σύμφωνα με τις απαιτήσεις των ISO 10140-2 & ISO 717-1 (ενδεικτικά, μεθοδολογία μέτρησης, χρήση βαθμονομημένων και πιστοποιημένων οργάνων, συνθήκες περιμετρικής ανάρτησης κ.α.). Μέχρις ότου να διερευνηθεί ότι η ανωτέρω τιμή ηχομείωσης δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω εξαιτίας των εγγενών πλαγίων μεταδόσεων των εγκαταστάσεων του Εργαστηρίου, θα θεωρείται ως η ελάχιστη υψηλότερη δυνατή τιμή αερόφερτης ηχομόνωσης η οποία μπορεί να επιτευχθεί και ως εκ τούτου σημειώνεται ως η  $R'_{fwmax}$  αυτού.

Σε κάθε περίπτωση, η εν λόγω διαπίστωση επιβεβαιώνει την ύπαρξη του ζωτικότερου χαρακτηριστικού λειτουργίας εργαστηρίων ακουστικών μετρήσεων, δηλαδή της πολύ ισχυρής καταστολής των πλαγίων μεταδόσεων. Αυτό θεωρείται υψίστης σημασίας όχι μόνον διότι δίδεται ασφαλής και αξιόπιστη δυνατότητα μέτρησης δοκιμών πολύ υψηλής ηχομονωτικής ικανότητας, αλλά και διότι όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι Hongisto & Lindgren M and Keranen είναι σχεδόν αδύνατον να ενισχυθεί η καταστολή των εγγενών πλαγίων μεταδόσεων ενός θαλάμου από την στιγμή που ολοκληρώνεται η διαδικασία κατασκευής τους, εκτός και εάν πραγματοποιηθούν ριζικές επεμβάσεις στον Φ.Ο τους. [13]

Ως εκ τούτου η δυνατότητα αυτή, δηλαδή της αξιόπιστης μέτρησης δομικών στοιχείων με υψηλή ηχομονωτική ικανότητα, επιτρέπει την έρευνα και ανάπτυξη εγχώριων – πλέον - προϊόντων και δομικών διατάξεων υψηλής και πολύ υψηλής ηχομονωτικής ικανότητας χωρίς να υπάρχουν οι δυσκολίες, οι καθυστερήσεις και η σημαντική οικονομική επιβάρυνση πιστοποίησης δοκιμών υψηλής ηχομονωτικής ικανότητας εκτός της Ελλάδος εργαστήρια. Με τον τρόπο αυτόν, όχι μόνον ενισχύεται ο εθνικός κύκλος παραγωγής δομικών στοιχείων ηχομόνωσης, αλλά ειδικά για τις περιπτώσεις όπου η παραγωγή και του πρωτογενούς υλικού είναι εγχώρια τότε συζητούμε για ολοκληρωμένη δημιουργία αμιγώς Ελληνικών δομικών στοιχείων ηχομονωτικών έναντι αερόφερτων θορύβων με το μοντέλο: Παραγωγή-Κατασκευή-Πιστοποίηση-Διεθνής εξαγωγή.

Τέλος, χάρη στην πραγματική  $R'_{fwmax}$  η οποία μετρήθηκε, οι αερόφερτοι θάλαμοι του Εργαστηρίου Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, παρουσιάζουν την υψηλότερη επίδοση στην Ελλάδα, ξεπερνούν ακόμα και θαλάμους Ευρωπαϊκών εργαστηρίων μέτρησης ηχομόνωσης θυρών, προσόψεων κτηρίων και παραθύρων όσον αφορά στην αντίσταση τους στις πλάγιες μεταδόσεις, ενώ προσεγγίζουν παρόμοιες τιμές με Ευρωπαϊκά εργαστήρια μέτρησης ηχομόνωσης δομικών στοιχείων υψηλής ηχομόνωσης [14].

## 5. Αναφορές

- [1] Τιμαγένη Α., Επέκταση Εργαστηρίου Ακουστικής Σχολής Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π., <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.17282>, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2020 (Accessed 02-09-2022)
- [2] ISO 10140-2:2021 | Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements | Part 2: Measurement of airborne sound insulation, Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
- [3] <https://www.merriam-webster.com/dictionary/false%20positive> (Accessed 02-09-2022)
- [4] ISO 12354-1:2017 | Building acoustics- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements | Part 1: Airborne sound insulation between rooms, Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [5] B.H. Sharp, Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements. Noise Control Engineering Vol 11 1978
- [6] Rindel JH., Sound insulation of buildings Inter-noise 2007, 28-31 Αυγούστου 2007, Κωνσταντινούπολη, 2007
- [7] Κορωνάιος Α. και Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά, τόμος ΙΙ, Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005
- [8] Πουλάκος Γ., Πειραματική διερεύνηση ηχομονωτικών ικανοτήτων θυρών, Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, 2010
- [9] Εργαστήριο Ηχοτεχνίας Σ.Α.Μ. Ε.Μ.Π, Ερευνητικό πρόγραμμα για την ηχομονωτική απόδοση της ικανότητας διαχωριστικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, Αθήνα 1991
- [10] Τιμαγένης Θ., Βελτιστοποίηση χρήσεως γυψοσανίδας σε ηχομονωτικές και ηχοαπορροφητικές κατασκευές, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Αθήνα 1992
- [11] Ηχομονωτικά συστήματα Γυψοπλάκ Ελλάς, Η απόδοση συστημάτων ξηράς δόμησης έναντι αερόφερτου θορύβου,. Αντίγραφο αρχείου Θ. Τιμαγένης Σύμβουλοι Ακουστικής-Αρχιτέκτονες, Πειραιάς, ca. 1990
- [12] ΦΕΚ 816 / Β' / 24-02-2022, Εφημερίδα της κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας
- [13] Hongisto V, Lindgren M and Keranen J. Enhancing Maximum measurable sound reduction index using sound intensity method and strong receiving room absorption. J ASA, 2001; 109-1:254-265
- [14] Fraunhofer Institute for Building Physics. Measuring & Testing Facilities- Acoustics, <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/pruefstellen/en/documents/IBP-testing%20facilities-acoustics.pdf> (Accessed 11-09-2022)

## **Πρόταση για μία νέα δομή της τεχνικής έκθεσης της κτιριακής ακουστικής μελέτης**

Gottfried Schubert, schubert.athens@gmail.com  
Σύμβουλος Ακουστικής  
Βασίλειος Ζαφρανάς, zafran@arch.auth.gr  
ΕΤΕΠ, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, ΑΠΘ  
Παναγιώτης Καραμπατζάκης, info@nestos.net  
Σύμβουλος Ακουστικής

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τους σκοπούς και τους στόχους που έχει η ακουστική μελέτη, και τα περιεχόμενα της.*

*Οι παράμετροι της ακουστικής άνεσης, αποτελούν δυσνόητες έννοιες για τους μη ειδικούς ή εξοικειωμένους με την ακουστική. Η μελέτη ακουστικής, οφείλει να τις μεταφράσει σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες και να περιγράψει υποκειμενική αντίληψη καθημερινών θορύβων. Η ομάδα μελέτης του κτιριακού έργου (αρχιτέκτονας, πολιτικός μηχανικός, μηχανολόγος, κλπ.) πρέπει να πάρει σαφείς αποφάσεις και να δώσει συγκεκριμένες οδηγίες, για την γεωμετρία και την κατασκευή όλων των δομικών στοιχείων του έργου.*

*Η μετατροπή των ακουστικών απαιτήσεων σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες πρέπει να τεκμηριώνεται με υπολογισμούς σύμφωνα με τα αναγνωρισμένα πρότυπα και με την συνδρομή ακουστικών μετρήσεων. Η θεωρητική και πρακτική τεκμηρίωση αυτή, πρέπει να δίνει σε έναν ( τρίτο) σύμβουλο ακουστικής την δυνατότητα του «ελέγχου» της μελέτης, ανά πάσα στιγμή.*

*Τα παραπάνω στάδια, επιβάλουν τον περιορισμό των «φιλολογικών» κειμένων της μελέτης και την αύξηση των σχεδίων ακουστικής και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, αμφότερα τα οποία, στηρίζονται σε υπολογιστικά μοντέλα που υποδεικνύονται από τα αναγνωρισμένα πρότυπα του κλάδου.*

### ***A proposal for a new style of building acoustics design study***

#### **ABSTRACT**

*This paper tries to address the aims and objectives of the building acoustics study and its contents.*

*The parameters of acoustic comfort are difficult concepts for non-experts or even those familiar with acoustics. The acoustic study has to translate them into drawings and constructional details and describe a subjective perception of everyday noises.*

*The study team of the building project (architect, civil engineer, HVAC engineer, etc.) must make clear decisions and give specific instructions for the geometry and construction of all structural elements of the project.*

*The conversion of acoustic requirements into construction details must be proved by calculations by recognized standards and with the assistance of acoustic measurements. This theoretical and practical proof should allow an acoustic consultant to "control" the study at any state.*

*The above steps, impose the limitation of the "philological" texts of the study and the increase in the acoustic designs and the construction details, both of which, are based on computer models indicated by the accepted standards of the industry.*

## **Εισαγωγή**

Η «Ακουστική Μελέτη»<sup>1</sup> δεν είναι μια κατασκευαστική μελέτη, με την στενότερη έννοια. αλλά είναι η δικαιολογητική έκθεση στην οποία συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των συμβουλών που δόθηκαν στους βασικούς μελετητές του δομικού έργου. Η έκθεση αυτή συμπεριλαμβάνει σχέδια, λεπτομέρειες, μετρήσεις, πιστοποιητικά και υπολογισμούς για την επιστημονική τεκμηρίωση των συμβουλών.

Τα συμπεράσματα των συμβουλών, τα οποία φαίνονται στην «Ακουστική Μελέτη» πρέπει να έχουν ενσωματωθεί στην Αρχιτεκτονική Μελέτη, στη Στατική Μελέτη και στη Μηχανολογική Μελέτη. Ταυτόχρονα δεν απαιτείται να ανήκει στον φάκελο του εργοταξίου και δεν θα φέρει ποτέ την σφραγίδα «ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ».

Η «Ακουστική Μελέτη» δεν είναι ένα διδακτικό εγχειρίδιο.

Συνήθως οι μηχανικοί της ομάδας μελέτης του έργου δεν έχουν βαθύτερες γνώσεις της δομικής ακουστικής και δεν αναμένουν την «Ακουστική Μελέτη» να τις αποκτήσουν. Ο σύμβουλος ακουστικής έχει την υποχρέωση να μεταφράσει τους υπολογισμούς σε σχέδια, λεπτομέρειες και περιγραφές συστημάτων που μπορούν να ενταχθούν στις βασικές κατασκευαστικές μελέτες του έργου.

Ακόλουθα προτείνουμε μια κατά την άποψή μας άρτια «Δομική Ακουστική Μελέτη».

### **1. Η ανάλυση των ακουστικών απαιτήσεων**

Οι ακουστικές απαιτήσεις για δομικά έργα στην Ελλάδα αναγράφονται στον Κτιριοδομικό Κανονισμό στο άρθρο 12 [1]. Τα προβλήματα του κανονισμού είναι γνωστά [2]. Δεν παύει όμως ο κανονισμός να είναι το μοναδικό νομοθετικό έγγραφο για την δομική ηχομόνωση που ισχύει στην Ελλάδα.

Η προσπάθεια του ΕΛΙΝΑ να προτείνει ένα κείμενο για την αναμόρφωση του Ελληνικού Κανονισμού Κτιριακής Ηχοπροστασίας [3], δεν έγινε ευρύτερα αποδεκτή έως σήμερα. Ο προτεινόμενος κανονισμός του ΕΛΙΝΑ εισάγει τον

<sup>1</sup> Με τον όρο «Ακουστική Μελέτη» εννοούμε, μια ακουστική μελέτη, ενός κτιριακού έργου.

διαχωρισμό της ακουστικής άνεσης σε επιμέρους κατηγορίες, όπου η κατηγορία 1 αντιστοιχεί στην μέγιστη ηχομόνωση και η 5 στην ελάχιστη. Με τον τρόπο αυτό, ο κύριος του έργου υποχρεούται να δηλώσει την κατηγορία στην οποία θέλει να εμπίπτει το κτίριο και έτσι ο ενδιαφερόμενος αγοραστής θα μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων, αν και κατά πόσο αυτό ανταποκρίνεται στην ανάγκη του για ακουστική άνεση και ηχοπροστασία.

Κυρίως για κατοικίες υψηλότερης ακουστικής άνεσης πέρα από τις υπάρχουσες νομοθετικές ρυθμίσεις και προτάσεις<sup>2</sup>, προτείνονται οι προδιαγραφές της Γερμανικής Οδηγίας VDI 4100 [4]. Στην προδιαγραφή αυτή, η ακουστική άνεση περιγράφεται με τρεις κατηγορίες<sup>3</sup>, όπου η χαμηλότερη κατηγορία SSt1, είναι ίδια με τις προδιαγραφές του Γερμανικού Προτύπου DIN 4109-1, 2016 [5].

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο για κάποιους που δεν είναι ειδικοί στην ακουστική, να αντιληφθούν το αναμενόμενο επίπεδο ηχομόνωσης, όταν έχουν να αναγνώσουν τους αριθμούς, που χαρακτηρίζουν τις παραμέτρους της ακουστικής άνεσης.

Για τον παραπάνω λόγο, είναι αναγκαίο, να περιγραφεί ποιοτικά η ηχομονωτική ικανότητα, ή γενικότερα η ακουστική άνεση χώρων, με έναν τρόπο ώστε και ο μη «ακουστικά» εκπαιδευμένος, να μπορεί να καταλάβει τι μελετά, κατασκευάζει, νοικιάζει ή αγοράζει.

Η ποιοτική περιγραφή της κατηγορίας ακουστικής άνεσης μπορεί να γίνει με τις μεθόδους που περιγράφονται στην οδηγία VDI 4100 [4] και γενικότερα στην βιβλιογραφία [6], [7].

## **2. Ηχομονωτική ικανότητα δομικών στοιχείων**

Αυτό που περιμένει η ομάδα μελέτης από τον σύμβουλο ακουστικής είναι, σαφής οδηγίες για την κατασκευή των δομικών στοιχείων.

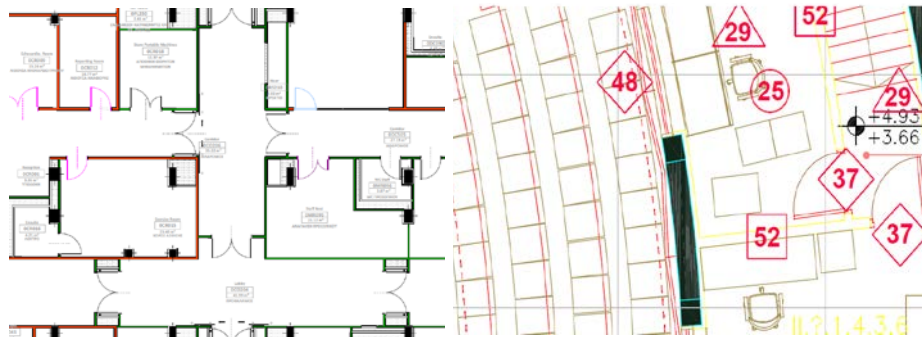
Ο ακουστικός σύμβουλος πρέπει να προτείνει τις κατασκευές των δομικών στοιχείων που ικανοποιούν τις ακουστικές απαιτήσεις του έργου.

Η ακουστική μελέτη, κατ ελάχιστο, πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Περιγραφή των κατασκευών όλων των δομικών στοιχείων
- Ταυτοποίηση (πιστοποιητικά, εργοταξιακές μετρήσεις, υπολογισμούς) της ηχομονωτικής ικανότητας των δομικών στοιχείων
- Σήμανση της ηχομονωτικής ικανότητας των δομικών στοιχείων στα σχέδια της ομάδας μελέτης
- Υπολογισμός της ηχομονωτικής ικανότητας των δομικών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη και τις πλευρικές μεταδόσεις του ήχου

<sup>2</sup> Κτιριοδομικός κανονισμός και πρόταση ΕΛΙΝΑ

<sup>3</sup> SSt1, SSt2 και SSt3



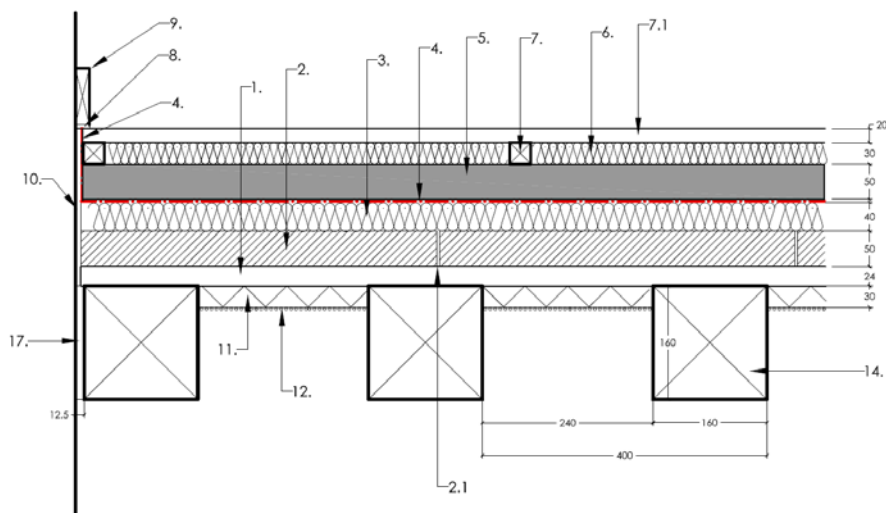
Σχήμα 2.1 Σήμανση κατασκευής και ηχομονωτικής ικανότητας δομικών στοιχείων στα αρχιτεκτονικά σχέδια

### 3. Περιγραφή των δομικών στοιχείων και λεπτομέρειες

Η περιγραφή των δομικών στοιχείων περιλαμβάνει και σχέδια λεπτομερειών. Οι λεπτομέρειες αυτές δεν είναι απαραίτητα κατασκευαστικές γιατί δεν περιλαμβάνουν πάντοτε και στοιχεία άλλων τμημάτων της δομικής φυσικής (θερμομόνωση, υγραμόνωση, πυρασφάλεια).

Η σύνθεση και η παραγωγή των κατασκευαστικών λεπτομερειών παραμένει στην ομάδα μελέτης.

Ακόμα πιο σημαντική είναι η παραγωγή σχεδίων σύνδεσης δομικών στοιχείων. Η ορθή σύνδεση π.χ. τοίχων με οροφή ή δάπεδο ή με άλλους τοίχους, επηρεάζει καθοριστικά την ηχομόνωση μεταξύ χώρων.



Σχήμα 3.1 Λεπτομέρεια

#### 4. Η δομή της «Ακουστικής Μελέτης»

Η προτεινόμενη δομή της «Ακουστικής Μελέτης» ακολουθεί στενά την πρόταση του ΕΛΙΝΑ [3].

##### Προμελέτη

- Ανάλυση των ακουστικών απαιτήσεων του έργου
- Περιγραφή των γενικών αρχών ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας ανάλογα με την οργάνωση των χώρων του κτιρίου και με το είδος της κατασκευής.
- Προσδιορισμός της εξωτερικής στάθμης θορύβου στη θέση του έργου για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ηχομόνωσης του κελύφους

##### Οριστική Μελέτη

- Επικαιροποίηση των στοιχείων της ακουστικής μελέτης, σύμφωνα με τα σχέδια της οριστικής μελέτης
- Αναγραφή των απαιτήσεων ηχομόνωσης-ηχοπροστασίας στα σχέδια της μελέτης (κατόψεις όλων των επιπέδων και τομές του κτιρίου)
- Σύνταξη καταλόγου των διαφόρων τύπων χωρισμάτων που θα χρησιμοποιηθούν, με τον σταθμισμένο δείκτη ηχομείωσης  $R_w$  της κατασκευής
- Σύνταξη καταλόγου των διαφόρων τύπων οροφών που θα χρησιμοποιηθούν, με την σταθμισμένη κανονικοποιημένη ηχητική πίεση κτυπογενούς ήχου  $L'_{n,w}$  της κατασκευής
- Υπολογισμός του φαινόμενου σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης  $R'_w$  από τον σταθμισμένο δείκτη ηχομείωσης  $R_w$  σύμφωνα με το EN ISO 12354:2000 και αναγραφή στα σχέδια της μελέτης
- Σχέδια ακουστικής μελέτης 1:100 με αναγραφή όλων των στοιχείων της ακουστικής μελέτης
- Λεπτομέρειες ακουστικής μελέτης 1:20 έως 1:1
- Τεχνική περιγραφή και προσδιορισμός υλικών όλων των κατασκευών που επηρεάζουν την ηχομόνωση – ηχοπροστασία
- Αναλυτική τεχνική περιγραφή και σχέδια των μέτρων ηχοπροστασίας των χώρων και του περιβάλλοντος από τους θορύβους όλων των ΗΜ εγκαταστάσεων, αναλυτικά ανά είδος εγκατάστασης
- Μελέτη ακουστικής των χώρων

##### Μελέτη Εφαρμογής

- Επικαιροποίηση των στοιχείων της ακουστικής μελέτης, σύμφωνα με τα σχέδια της μελέτης εφαρμογής
- Έλεγχος των λεπτομερειών της αρχιτεκτονικής μελέτης και της μελέτης ΗΜ εγκαταστάσεων

#### 5. Αναφορές

[1] Υπουργική Απόφαση: 3046/304/89, Κτιριοδομικός Κανονισμός. (ΦΕΚ 59/Δ/3-02-89)

- [2] Gottfried Schubert, *Ηχομόνωση σχετικά με το άρθρο 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού*, Επιστημονική Έκδοση ΚΤΙΡΙΟ Β/1999
- [3] ΕΚΚΗ-2010, *Πρόταση επιτροπής του ΕΛΙΝΑ για την αναμόρφωση του Ελληνικού Κανονισμού Κτιριακής Ηχοπροστασίας*  
[http://www.helina.gr/images/stories/TECHNICAL\\_DOCS/HELINA\\_EKKH.pdf](http://www.helina.gr/images/stories/TECHNICAL_DOCS/HELINA_EKKH.pdf)
- [4] VDI 4100 *Noise control in dwellings – Criteria for planning and assessment*  
Γερμανική Οδηγία, 2007
- [5] DIN 4109-1, *Sound insulation in buildings, Minimum requirements*,  
Γερμανικό Πρότυπο, 2016
- [6] W. Moll & A. Moll *Schallschutz im Wohnungsbau*, Ernst & Sohn Berlin (2011)
- [7] Gottfried Schubert, *Αιτιολογημένη εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων*, ΕΛΙΝΑ Κέρκυρα 2012



***Ακουστική και αρχιτεκτονική διαμόρφωση χώρου  
δοκιμών της Συμφωνικής Ορχήστρας Νέων του  
Ο.Μ.Μ.Θ.***

Γεώργιος Πατσιαλάς,  
Ηλεκτρολόγος μηχ. και μηχ.  
υπολογιστών / Α.Π.Θ.,  
patsialasgeorge@gmail.com

Χρήστος Σεβαστιάδης  
Δρ. ηλεκτρακουστικής / Α.Π.Θ.  
csevast@ece.auth.gr

Μάριος Γιουβανάκης,  
Υποψ. Διδάκτορας / Α.Π.Θ.  
mgiouvan@ece.auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου  
Ομ. Καθηγητής / Α.Π.Θ.  
lina@ece.auth.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την μετατροπή ενός υπόγειου αποθηκευτικού χώρου των κτιρίων του Οργανισμού Μεγάρου Μουσικής Θεσσαλονίκης (Ο.Μ.Μ.Θ.) σε αίθουσα δοκιμών για τη Συμφωνική Ορχήστρα Νέων του Μεγάρου (MOYSA). Η πρόκληση του εγχειρήματος ήταν η δημιουργία μιας αίθουσας με κατάλληλη για τη χρήση της ακουστική συμπεριφορά, αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της μικρού ύψους σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις της. Η ανάρτηση καμπύλων ανακλαστήρων στην οροφή, καθώς και η εφαρμογή, σε ξεχωριστά τμήματα των τοίχων, επικλινών επιφανειών και ηχητικών διαχύτων, είχαν ως αποτέλεσμα την επίτευξη του στόχου.*

***Acoustic and architectural adaptation of the rehearsal  
room of the Megaro Youth Symphony Orchestra of  
Thessaloniki***

**ABSTRACT**

*The subject of this work is the adaptation of an underground storage space in the buildings of the Thessaloniki Concert Hall (TCH) into a rehearsal room for the Megaro Symphonic Youth Orchestra (MOYSA). The challenge of the project was to create a room with an acoustic behavior suitable for its use, addressing the problem of its short height, in relation to its other dimensions. The suspension of curved reflectors on the ceiling, as well as the application, on separate sections of the walls, of inclined surfaces and sound diffusers, resulted in the achievement of the goal.*

## Εισαγωγή

Οι αίθουσες δοκιμών είναι απαραίτητες για τους μουσικούς καθώς χρειάζονται έναν ήσυχο και άνετο χώρο προκειμένου να εξασκούνται. Για τον μουσικό, σημαντικό είναι οι συνθήκες των δοκιμών να είναι όσο πιο κοντά γίνεται σε αυτές της παράστασης. Απαιτείται, λοιπόν, ένας χώρος με ουδέτερη ακουστική στον οποίο ο μουσικός να ακούει ακριβώς αυτό που παίζει χωρίς χρωματισμούς. Επειδή οι χώροι δοκιμών διαφέρουν από την σκηνή της παράστασης και συχνά είναι πολύ μικρότεροι σε όγκο, απαραίτητο χαρακτηριστικό τους είναι η απορρόφηση και η διάχυση του ήχου[1].

Ο Οργανισμός Μεγάλου Μουσικής Θεσσαλονίκης (Ο.Μ.Μ.Θ.) το 2016 αποφάσισε να δημιουργήσει μια αίθουσα δοκιμών για τη Συμφωνική Ορχήστρα Νέων του Μεγάρου (ΜΟΥΣΑ). Ο μοναδικός ικανού μεγέθους διαθέσιμος χώρος στις εγκαταστάσεις του ήταν μια αποθήκη, παρά του σταθμού αυτοκινήτων του δεύτερου κτιρίου. Η εργαστηριακή μονάδα Ηλεκτρακουστικής του Α.Π.Θ., ανέλαβε την εκπόνηση της ακουστικής μελέτης, και σε συνεργασία με την ΜΕΤΕ ΣΥΣΜ Μελετητική Εταιρεία Τεχνολογικών Εφαρμογών Α.Ε., εκπονήθηκαν και συντάχθηκαν όλες οι απαραίτητες τεχνικές μελέτες, καθώς και τα τεύχη δημοπράτησης του έργου κατασκευής της αίθουσας.

Η μετατροπή της υπόγειας αποθήκης σε αίθουσα κατάλληλη για την εκτέλεση μουσικών έργων, ήταν μεγάλη πρόκληση επειδή το ύψος της ήταν μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις της. Η ανάρτηση καμπύλων ανακλαστήρων στην οροφή, καθώς και η εφαρμογή, σε ξεχωριστά τμήματα των τοίχων, επικλινών επιφανειών και ηχητικών διαχύτων, είχαν ως αποτέλεσμα την επίτευξη του στόχου. Για την παραγωγή του έργου διεξήχθησαν ακουστικές μετρήσεις σε τρία στάδια, για την αρχική κατάσταση, τη διαμόρφωση του χώρου χωρίς τους ανακλαστήρες οροφής και την τελική κατάσταση του χώρου όπως παραδόθηκε. Τέλος, τόσο η εκπόνηση των μελετών, όσο και η κατασκευή του έργου, χρηματοδοτήθηκαν από το Ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος.

### 1. Αρχική κατάσταση χώρου

Ο συγκεκριμένος χώρος επιλέχθηκε ως επαρκής για τη φιλοξενία 87 θέσεων μουσικών, με την τυπική διάταξη των διαφορετικών οργάνων, συμπεριλαμβανομένου και του μαέστρου, καθώς και για διάθεση 33 θέσεων θεατών. Βρίσκεται υπό της κύριας αίθουσας εκτέλεσης έργου του κτιρίου Β. Οι αρχικές διαστάσεις του ήταν  $20.5 \times 10.8 \times 3.2$  m (μήκος, πλάτος, ύψος). Ο αρχικός όγκος του, περίπου  $700 \text{ m}^3$ , μειωνόταν από τους μεγάλους αεραγωγούς κλιματισμού της κύριας αίθουσας του κτιρίου, οι οποίοι διέτρεχαν, μαζί με άλλους αγωγούς των δικτύων πυρόσβεσης, φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού, την οροφή και τους τοίχους. Περιμετρικά η αίθουσα περιβάλλεται από βοηθητικούς ή κενούς χώρους, ενώ η επιφάνεια που γειτνιάζει με το σταθμό αυτοκινήτων έχει συνολικό μήκος μόλις 4.5 m. Ο φέρων οργανισμός του σταθμού αυτοκινήτων είναι διαχωρισμένος από αυτόν του κτιρίου, για τη διακοπή της μετάδοσης των δονήσεων, πράγμα που διασφαλίζει την υψηλή ηχομόνωσή του. Για την πρόσβαση στο χώρο υπάρχουν δύο προθάλαμοι, με διπλές θύρες, βαριών πυράντοχων θυρόφυλλων. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται μια όψη της αρχικής κατάστασης του χώρου.



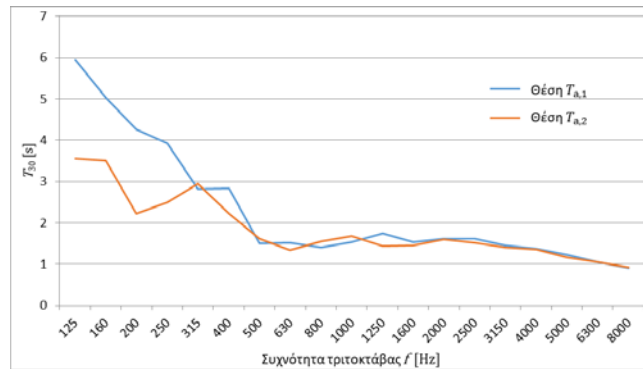
*Εικόνα 1.1. Όψη της αρχικής κατάστασης του χώρου [Πηγή: ΜΕΤΕ ΣΥΣΜ].*

### *1.1 Ηχομόνωση*

Λόγω του διαχωρισμού των φερόντων οργανισμών, η ηχομόνωση αναμενόταν ικανοποιητική, με μόνη επιφύλαξη ως αδύναμα σημεία τις θύρες, ειδικά στην πλευρά του σταθμού αυτοκινήτων. Συνεπώς, μετρήθηκε η διαφορά στάθμης ήχου μεταξύ των δύο χώρων, με σταθμίσεις A και C, εφαρμόζοντας τις οδηγίες του προτύπου ISO 16283-1:2014 [2]. Με σφραγισμένα τα θυρόφυλλα, μετρήθηκε διαφορά  $D_A = 34.9 \text{ dB(A)}$  και  $D_C = 28.6 \text{ dB(C)}$ . Επειδή η αίθουσα θα ήταν σχεδόν απίθανο να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με τη διεξαγωγή συναυλιών στην κύρια αίθουσα του κτιρίου, με την συνεπαγόμενη χρήση του σταθμού αυτοκινήτων, θεωρήθηκε ότι η ηχομόνωση δεν χρειαζόταν ιδιαίτερη βελτίωση. Παρά ταύτα, προβλέφθηκε η κατασκευή ενός επιπλέον προθαλάμου, τόσο για τη βελτίωση της ηχομόνωσης όσο και για το διαχωρισμό της πρόσβασης στην αίθουσα από το σταθμό των αυτοκινήτων. Ωστόσο, τα υπάρχοντα θυρόφυλλα, αν και δεν ήταν ηχομονωτικά, δεν αντικαταστάθηκαν.

### *1.2 Χρόνος αντήχησης αρχικής κατάστασης*

Για την εκτίμηση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου, μετρήθηκε ο χρόνος αντήχησης εφαρμόζοντας την κλασική μέθοδο με διακοπτόμενο θόρυβο — πρότυπο ISO 3382-2:2008 [3]. Μετρήθηκε το μέγεθος  $T_{30}$ , σε δύο ενδεικτικές θέσεις στο χώρο. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 1.1, δείχνουν ότι η μη διαμορφωμένη αίθουσα έχει σημαντικό χρόνο αντήχησης, αντίστοιχο διαμορφωμένων αιθουσών με μεγαλύτερο όγκο, με ιδιαίτερα μακρύτερους χρόνους στις χαμηλές συχνότητες.



Διάγραμμα 2.1. Χρόνος αντήχησης  $T_{30}$  ανά τριτοκταβική ζώνη, στις δύο θέσεις  $T_{a,1}$  και  $T_{a,2}$ , στην αρχική κατάσταση της αίθουσας.

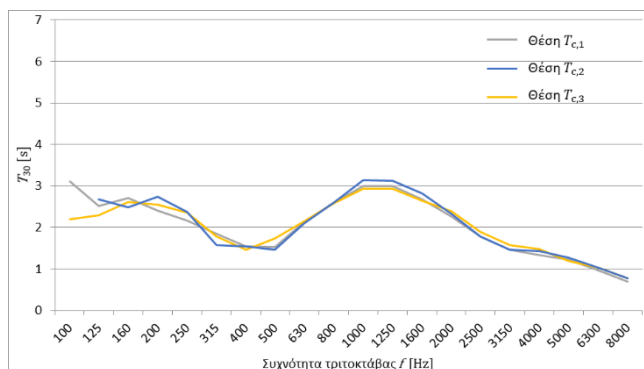
## 2. Ακουστική διαμόρφωση ενδιάμεσου σταδίου

Οι παρεμβάσεις που εφαρμόστηκαν αποσκοπούσαν τόσο στην ακουστική βελτίωση της αίθουσας όσο και στην ευχάριστη και εύρυθμη λειτουργία της. Οι τοίχοι καλύφθηκαν επικλινώς, εκατέρωθεν της ορχήστρας και όπισθεν του μαέστρου, και κατακόρυφα όπισθεν των κρουστών οργάνων, με επένδυση γυψοσανίδας, εσωτερικά πληρωμένης με πετροβάμβακα. Με την ίδια επικλινή επένδυση καλύφθηκαν οι αεραγωγοί των υπαρχόντων δικτύων κλιματισμού του κτιρίου, καθώς και των νέων της αίθουσας. Το τμήμα του επενδυμένου τοίχου όπισθεν των κρουστών οργάνων επενδύθηκε επιπλέον με διαχύτες ήχου, από υψηλής πυκνότητας διογκωμένη πολυστερίνη. Στο δάπεδο, επί υποστρώματος αυτοεπιπεδούμενου επισκευαστικού κονιάματος, επιστρώθηκε μεμβράνη φράγματος υδρατμών, φύλλο αφράδους πολυαιθυλενίου, και φυλλωτό συνθετικό ξύλο (laminat). Οι παρεμβάσεις μείωσαν τον όγκο του χώρου περίπου στα  $650 \text{ m}^3$ . Ο επιπλέον προθάλαμος πρόσβασης στην αίθουσα διαχωρίστηκε από το χώρο του σταθμού αυτοκινήτων με ξηρά δόμηση διπλής εκατέρωθεν γυψοσανίδας, πληρωμένης με πετροβάμβακα, ενώ εσωτερικά επενδύθηκε επιπλέον με διάτρητη ηχοαπορροφητική γυψοσανίδα.

### 2.1 Χρόνος αντήχησης ενδιάμεσου σταδίου

Για την αξιολόγηση του ενδιάμεσου σταδίου, αρχικά μετρήθηκε ο χρόνος αντήχησης με το μέγεθος  $T_{30}$ , με ανάλογο τρόπο όπως στη μέτρηση της αρχικής κατάστασης. Η αίθουσα ήταν άδεια, χωρίς τα καθίσματα και τα μουσικά όργανα. Τα σημεία μέτρησης και διέγερσης που επιλέχθηκαν αφορούσαν στην κεντρική περιοχή των πνευστών, στη θέση του μαέστρου, στη θέση των βιολιών και στην παράπλευρη περιοχή των πνευστών. Ο χρόνος αντήχησης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1, ενώ μειώθηκε στις χαμηλές συχνότητες λόγω της χαμηλόσυχνης ηχοαπορρόφησης των επενδύσεων στους τοίχους, όπως ήταν αναμενόμενο αυξήθηκε στις υψηλότερες συχνότητες, λόγω της επένδυσης των περισσότερων επιφανειών με ανακλαστικά υλικά, όπως το δάπεδο και η γυψοσανίδα, καθώς και από την έλλειψη των καθισμάτων που είχαν προβλεφθεί. Ακόμη, στον περιορισμό του χρόνου αντήχησης

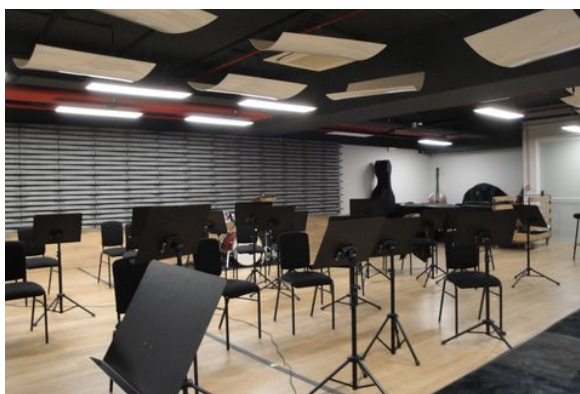
στη συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή αναμενόταν να συμβάλει και η ανάρτηση των ανακλαστήρων από την οροφή, στο ακόλουθο στάδιο.



Διάγραμμα 3.1. Χρόνος αντήχησης  $T_{30}$  ανά τριτοκταβική ζώνη, σε τρεις θέσεις  $T_{c,1}$ ,  $T_{c,2}$  και  $T_{c,3}$ , στη διαμορφωμένη αίθουσα, χωρίς τους ανακλαστήρες οροφής.

### 3. Τελική κατάσταση χώρου

Στο τελικό στάδιο της διαμόρφωσης τοποθετήθηκαν είκοσι καμπύλοι ανακλαστήρες από ακρυλικό γυαλί, σε συγκεκριμένα σημεία της οροφής, και με διαφορετικές κλίσεις. Για την επιλογή των θέσεων και των κλίσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόβλεψης ακουστικών παραμέτρων AFMG EASE [4], με εφαρμογής της μεθόδου της ακτινικής ανίχνευσης. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται μια όψη της τελικής διαμορφωμένης αίθουσας.



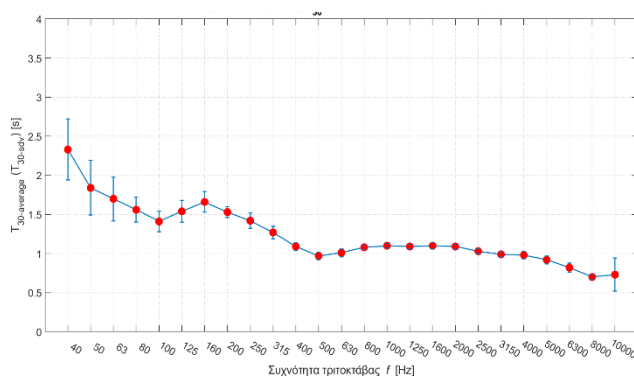
Εικόνα 3.1. Όψη της τελικής διαμορφωμένης αίθουσας. Διακρίνονται οι αναρτημένοι από την οροφή ανακλαστήρες και οι ηχητικοί διαχύτες στον τοίχο.

Οι ακουστικές μετρήσεις για την πιστοποίηση του έργου διεξήχθησαν αμέσως μετά την ολοκλήρωσή, το 2018. Ωστόσο, διεξήχθησαν επιπλέον και πιο ενδελεχείς

μετρήσεις κατά την εκπόνηση διπλωματικής εργασίας [5], με ιδιαίτερο σκοπό την ανάλυση της χαμηλόσυχνης ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις ακολούθησαν τα πρότυπα ISO 3382-1:2009 [6] και ISO 18233:2006 [7], εφαρμόζοντας τη σύγχρονη μέθοδο, με σήμα διέγερσης σαρωτικού ημιτόνου.

### 3.1 Χρόνος αντήχησης στην ολοκληρωμένη αίθουσα

Μετρήθηκε η αντήχηση με το μέγεθος  $T_{30}$ , σε 20 σημεία, κανονικά καταναμημένων στην περιοχή της ορχήστρα, με τρία σημεία διέγερσης. Στο Διάγραμμα 3.1 φαίνονται τα αποτελέσματα για το ένα σημείο διέγερσης, στην περιοχή των κοντραμπάσων, ως μέσος όρος επί όλων των σημείων μέτρησης. Ο χρόνος αντήχησης έχει ελεγχθεί περί του χρόνου στόχου λίγο πάνω από το 1 s. Τα άλλα δύο σημεία μέτρησης, το ένα σε μία από τις γωνίες της αίθουσας και το άλλο στην περιοχή των κρουστών, παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια μορφή.



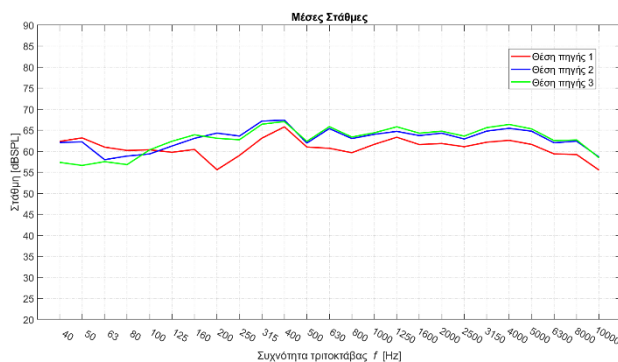
Διάγραμμα 3.1. Ο μέσος όρος  $T_{30,average}$  και η τυπική απόκλιση  $T_{30,sdv}$  για όλα τα σημεία μέτρησης και με σημείο διέγερσης στην περιοχή των κοντραμπάσων, ανά τριτοκταβική ζώνη του χρόνου αντήχησης, στη διαμορφωμένη αίθουσα με τους ανακλαστήρες οροφής και τα καθίσματα των μουσικών.

### 3.2 Χωρική κατανομή στάθμης $L_p$

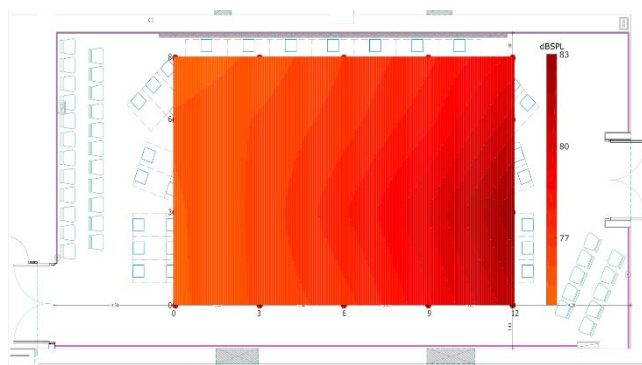
Για την επιπλέον αξιολόγηση της ακουστικής ομοιομορφίας της αίθουσας, μετρήθηκε η στάθμη πίεσης ήχου σε όλα τα σημεία, σε τριτοκταβικές ζώνες και σε συχνοτική στάθμιση με φίλτρα Z, και A. Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ως μέσοι όροι επί όλων των σημείων μέτρησης, για τα τρία σημεία διέγερσης. Τα αποτελέσματα έχουν αντισταθμιστεί σε σχέση με την απόκριση της πηγής διέγερσης. Η διέγερση από τα δύο σημεία, 2 και 3, μέσα από την ορχήστρα, έχει ως αποτέλεσμα σχεδόν όμοιο μέσο όρο μεταξύ των σημείων μέτρησης στην περιοχή της ορχήστρας.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα χαρτογραφήθηκαν επί του σχεδίου κάτοψης της αίθουσας, ως χωρική κατανομή της στάθμης πίεσης ήχου. Στο Διάγραμμα 3.3 παρουσιάζεται η χαρτογράφηση με το σημείο διέγερσης στη περιοχή των

κοντραμπάσων. Η πτώση της στάθμης από τη μία πλευρά της ορχήστρας έως την άλλη είναι περίπου 9 dB.



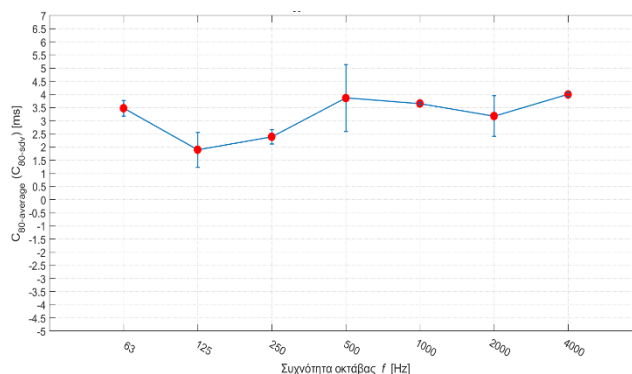
Διάγραμμα 3.1. Μέση τιμή της στάθμης πίεσης ήχου  $L_{pZ}$  για όλα τα σημεία μέτρησης και για τα τρία σημεία διέγερσης, ανά τριτοκταβική ζώνη, στη διαμορφωμένη αίθουσα, με τους ανακλαστήρες οροφής και τα καθίσματα των μουσικών.



Διάγραμμα 3.2. Χωρική κατανομή στάθμης πίεσης ήχου  $L_{pZ}$  εντός του χώρου της ορχήστρας, με σημείο διέγερσης στην περιοχή των κοντραμπάσων, στη διαμορφωμένη αίθουσα, με τους ανακλαστήρες οροφής και τα καθίσματα των μουσικών.

### 3.3 Δείκτης σαφήνειας $C_{80}$

Τέλος μετρήθηκε ο δείκτης σαφήνειας,  $C_{80}$ , ως παράμετρος πρώιμης προς ύστερης αφικνούμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 3.3, υποδεικνύουν σημαντική πρώιμη αφικνούμενη ενέργεια, η οποία υποστηρίζει γρήγορη και σύγχρονη μουσική, καθώς και τη διάκριση των λεπτομερειών των μουσικών έργων.



Διάγραμμα 3.3. Μέση τιμή και τυπική απόκλιση επί όλων των θέσεων της σαφήνειας  $C_{80}$ , στη διαμορφωμένη αίθουσα, με τους ανακλαστήρες οροφής και τα καθίσματα των μουσικών.

#### 4. Συμπεράσματα

Ο χρόνος αντήχησης ελέγχθηκε και διαμορφώθηκε στα επιθυμητά επίπεδα για το μέγεθος και τη χρήση της αίθουσας. Οι πλευρικές ανακλάσεις αντιμετωπίστηκαν με την εφαρμογή της επικλινούς επένδυσης και του ηχητικού διαχύτη όπισθεν της ορχήστρας. Ο αρνητικός παράγοντας του χαμηλού ύψους της αίθουσας, για τη βέλτιστη διάχυση του ήχου των υποσυνόλων των μουσικών οργάνων αντιμετωπίστηκε αποτελεσματικά με την ανάρτηση των καμπύλων ανακλαστήρων οροφής. Η αίθουσα έχει πλέον ζωντανό και διάχυτο ακουστικό χαρακτήρα, προσαρμοσμένο στις ανάγκες δοκιμών της ορχήστρας.

#### 5. Αναφορές

- [1] T. Cox and P. d'Antonio Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application CRC Press (2016).
- [2] ISO 16283-1:2014 Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne Sound Insulation
- [3] ISO 3382-2:2008 Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2 Reverberation time in ordinary rooms.
- [4] <https://www.afmg.eu/en/ease-enhanced-acoustic-simulator-engineers>
- [5] Γ. Πατσιαλάς Διπλωματική εργασία: Ανάλυση χαμηλοσυχνοτικών φαινομένων και μέτρηση ακουστικών παραμέτρων στην αίθουσα «ΜΟΥΣΑ» του Μεγάλου Μουσικής Θεσσαλονίκης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (2022).
- [6] ISO 3382-1:2009 Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces.
- [7] ISO 18233:2006 Acoustics — Application of new measurement methods in building and room acoustics.



**Προσομοιωτής για την αναπαράσταση ακουστικών πεδίων. Εφαρμογή στην ακουστική μελέτη του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου Ηρακλείου Κρήτης (ΠΣΚΗ)**

**Ιωάννης Τιμαγένης<sup>1</sup>, Θόδωρος Τιμαγένης<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Σύμβουλος Ακουστικής - Αρχιτέκτων Μηχανικός,  
Υποψήφιος Διδάκτωρ Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ  
MSc Architectural and Environmental Acoustics,  
Dip Arch (RIBA 2), Ba (Hons) Architecture (RIBA 1)

<sup>2</sup> Αρχιτέκτων Μηχανικός – Σύμβουλος Ακουστικής ΕΜΠ, MSc Un of London

Κ. Παλαιολόγου 5, Πειραιάς τηλ. 210 4119545  
www.timagenis-acoustics.com,  
athens@timagenis-acoustics.com

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το Πολιτιστικό και Συνεδριακό Κέντρο Ηρακλείου Κρήτης αποπερατώθηκε το 2019. Αποτελείται από ένα μεγάλο κτιριακό συγκρότημα, προσαρμοσμένο στο υπάρχον ιστορικό περιβάλλον, εντός του οποίου μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται πολλές ειδικές αίθουσες συγκέντρωσης ακροατηρίου (δύο θέατρα, δύο αίθουσες σεμιναρίων, ωδείο, αίθουσα συναυλιών 250 θέσεων καθώς και κεντρική αίθουσα πολλαπλών χρήσεων (ΚΑΠΧ) χωρητικότητας 750 θέσεων)*

*Η Κεντρική Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων (ΚΑΠΧ), έχει σχεδιασθεί και έχει τον κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να μπορεί να υποστηρίξει συναυλίες κλασικής και σύγχρονης μουσικής, παραστάσεις θεάτρου, όπερας, μουσικού θεάτρου, μπαλέτου, σύγχρονου χορού, συνέδρια, συναυλίες έντεχνου και δημοτικού τραγουδιού καθώς και κινηματογραφικές προβολές.*

*Στην εργασία παρουσιάζονται μεταξύ άλλων:*

*α. οι τρόποι προσαρμογής της ΚΑΠΧ στις ακουστικές απαιτήσεις κάθε συγκριμένης εκδήλωσης, με την κατάλληλη και ορθή χρήση μεταβλητών στοιχείων του χώρου, όπως ο όγκος, η υφή των επιφανειών και η μορφολογία της αίθουσας και*

*β. ο τρόπος με τον οποίο λειτούργησε ο πρώτος ελληνικός προσομοιωτής ανακατασκευής ακουστικών πεδίων, που μελετήθηκε και τέθηκε σε λειτουργία από τους συγγραφείς.*

*Με αυτόν τον προσομοιωτή αναπαράχθηκε (με φυσικό τρόπο χωρίς παρέμβαση ηλεκτρονικών ψηφιακών διορθώσεων) η ακουστική της αίθουσας κατά το τελικό στάδιο της μελέτης, ώστε να ελεγχθεί πέραν των αντικειμενικών παραμέτρων η υποκειμενική αντίληψη του χώρου όπως δηλ. θα τον αντιλαμβάνονται οι ακροατές*

(χωρίς να απαιτείται να έχουν ειδικές τεχνικές γνώσεις ακουστικής) πριν αυτός ολοκληρωθεί

**Λέξεις κλειδιά:** ΠΣΚΗ, ΔΕΠΑΝΑΛ Α.Ε, Κρήτη, Χωροαίσθηση, Αίθουσα  
Συναυλιών, Κλασσική Μουσική

## ***The employment of the first Hellenic human-scale physical Acoustic Simulator in the design of the Cultural and Conference Center of Crete (CCCC)***

### **ABSTRACT**

*After all these years, the expression of its meticulous modern Greek architecture is perfectly amalgamated with the city's context, while its state-of-the-art acoustics fulfill the vision of the numerous people that aspired this majestic project through the entire development. CCCC encapsulates a top-notch main auditorium (750 seats), a smaller chamber dedicated to classical music events (250 seats), two theatrical venues and other satellite spaces with primary functions such as seminar rooms, a conservatory and various musicians' warm up areas.*

*The main auditorium is designed in order to support classical music concerts. The acoustic design also allows the dynamic adjustment of the hall in order to also fully support drama opera, folk music, ballet and contemporary dance performances. Moreover, high-end electro-acoustical equipment has been integrated for allowing the delivery of lectures, presentations, conferences as well as the projection of cinematic movies.*

*In the current lecture the subjects that will be discussed include but are not limited to:*

*a- The main acoustical features that have been incorporated into the architectural design and the implementation of the dynamic acoustic components that realize the hall's adjustability.*

*c- The pivotal contribution of the first Hellenic physical acoustic simulator that has been developed for over 7 years by the authors. The simulator was employed for the first time during the design of CCCC for the spatial reconstruction of the main auditorium's acoustic environment. The purpose was to analyze the psychoacoustic perception of the hall during the final design phase -without any signal post-processing corrections and investigate for any potential final adjustments, in a «design-through-hearing» manner.*

**Key Words:** Crete, Concert Hall, Classical Music, Spatial impression, DEPANAL, CCCC

### **Εισαγωγή**

Το Πολιτιστικό και Συνεδριακό Κέντρο Ηρακλείου Κρήτης γεννήθηκε ως ιδέα το 1975, οπότε το πρώτο δημοτικό συμβούλιο της πόλης του Ηρακλείου «οραματίστηκε ένα κέντρο μαζί και άξονα πολιτισμού που θα λειτουργούσε

ενοποιητικά στην σύμπραξη λόγου και πολιτισμού των ανθρώπων της Κρήτης, της Ελλάδος, του Κόσμου».

Από τότε το έργο, αποτέλεσμα ενός σύγχρονου αρχιτεκτονικού και ακουστικού σχεδιασμού, στηρίχθηκε, μέχρι το 2019, οπότε και ολοκληρώθηκε, από όλες τις δημαρχιακές αρχές

Το ΠΣΚΗ αποτελείται από ένα μεγάλο κτιριακό συγκρότημα, προσαρμοσμένο στο υπάρχον ιστορικό περιβάλλον, εντός του οποίου, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνονται πολλές ειδικές αίθουσες συγκέντρωσης ακροατηρίου (όπως δύο θέατρα, δύο αίθουσες σεμιναρίων, ωδείο, αίθουσα συναυλιών 250 θέσεων καθώς και κεντρική αίθουσα πολλαπλών χρήσεων (ΚΑΠΧ) χωρητικότητας 750 θέσεων / Αίθουσα «Ανδρέας και Μαρία Καλοκαιρινού προς τιμή των μεγάλων δωρητών») [1].

Η ΚΑΠΧ, έχει σχεδιασθεί και έχει τον κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να μπορεί να υποστηρίξει συναυλίες κλασικής και σύγχρονης μουσικής, παραστάσεις θεάτρου, όπερας, μουσικού θεάτρου, μπαλέτου, σύγχρονου χορού, συνέδρια, συναυλίες έντεχνου και δημοτικού τραγουδιού καθώς και κινηματογραφικές προβολές.

Με την ευκαιρία της αποπεράτωσης του έργου, την λήξη της περιόδου δοκιμαστικής λειτουργίας αυτού και της Πανελληνίας και Ευρωπαϊκής ομόφωνης επιτυχίας της πλήρους λειτουργίας του [2, 3, 4], οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας παρουσιάζουν ορισμένα από τα διδάγματα που απεκόμισαν κατά την 30ετή περίοδο κατά την οποία είχαν την ευθύνη της ακουστικής (μελέτης και επίβλεψης της κατασκευής) ολόκληρου του έργου (όλων των αιθουσών και όλων των υπολοίπων χώρων) καθώς και την ευθύνη για τις τελικές ηχομετρήσεις παραλαβής αυτού.

## **1. Περιγραφή της Κεντρικής Αίθουσας Πολλαπλών Χρήσεων**

Η ΚΑΠΧ είναι χωροθετημένη στο ΒΔ άκρο του συγκροτήματος.

Ο αρχικός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, σε αυτή την θέση, προέβλεπε τρία επίπεδα καθ' ύψος. Στο ισόγειο προβλεπόταν η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, επάνω από αυτήν, μια αίθουσα κινηματογράφου και τέλος επάνω από τον κινηματογράφο μια μεγάλη αίθουσα εκθέσεων και κοινωνικών εκδηλώσεων.

Η ακουστική μελέτη της αίθουσας και ολόκληρου του υπόλοιπου συγκροτήματος μας ανατέθηκε μόλις ολοκληρώθηκε η προμελέτη, οπότε δόθηκε η δυνατότητα να προταθούν εκτεταμένες τροποποιήσεις και μετατροπές, και σε άλλους χώρους συνάθροισης κοινού του συγκροτήματος, αλλά κυρίως στην κεντρική Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων.

## **2. Προτάσεις της ακουστικής μελέτης**

### *2.1 Αίθουσα ακροατηρίου*

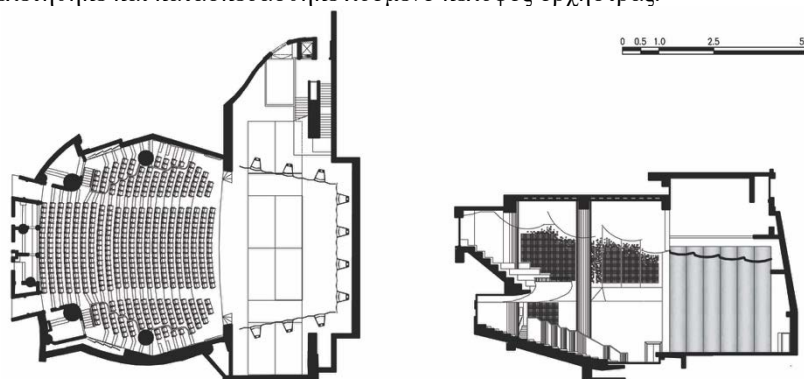
Οι προτάσεις της ακουστικής μελέτης, με την σύμφωνη γνώμη και στήριξη του Κ.τ.Ε. και των υπολοίπων μελετητών υιοθετήθηκαν και εφαρμόστηκαν όλες. Οι προτάσεις αυτές ήταν οι ακόλουθες:

1. Κατάργηση της αίθουσας κινηματογράφου, ώστε η αίθουσα συναυλιών, να αποκτήσει κατάλληλο ύψος και όγκο.

2. Τροποποίηση – αλλαγή κατεύθυνσης των πλάγιων τοίχων / επενδύσεων, προκειμένου να δημιουργηθούν χρήσιμες πλάγιες ανακλάσεις.  
Δημιουργία υπερυψωμένων θεωρείων στα πλάγια της πλατείας (δεξιά και αριστερά) και κατάλληλη διαμόρφωση αυτών, ώστε να στέλνουν προς το κεντρικό τμήμα της πλατείας πρόσθετες ισχυρές πλάγιες ανακλάσεις.
3. Η διαμόρφωση των θεωρείων περιλαμβάνει και κατάλληλη διαμόρφωση των στηθαίων, προκειμένου τμήμα της ακουστικής ενέργειας να επιστρέψει προς την σκηνή, ώστε να υπάρχει η απαραίτητη απόκριση της αίθουσας προς τους καλλιτέχνες
4. Δημιουργία κατάλληλης κλίσης της πλατείας και του εξώστη, ώστε να υπάρχει και αμεσότητα στον απ' ευθείας ήχο από την σκηνή καθώς και άνετη και ανεμπόδιστη ορατότητα.
5. Σχεδιασμός και κατασκευή κατάλληλης ανακλαστικής / διαχυτικής οροφής, εντός της οποίας διευθετήθηκαν τα μηχανολογικά δίκτυα , οι προβολείς και ο υπόλοιπος θεατρικός εξοπλισμός.
6. Σχεδιασμός και κατασκευή του πρώτου ανακλαστήρα εμπρός από την σκηνή, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η αυξομείωση του ύψους του αναλόγως με το είδος των παραστάσεων
7. Εξασφάλιση καταλλήλων επιφανειών για την εγκατάσταση κινητών πανέλων για την μεταβολή του χρόνου αντίληψης
8. Σχεδιασμός και κατασκευή βαρέως πλωτού δαπέδου επάνω σε ελατήρια στην αίθουσα περιοδικών εκθέσεων και κοινωνικών εκδηλώσεων που είναι χωροθετημένη επάνω από την ΚΑΠΧ και συνδέεται με την αίθουσα με ενιαίο φέρονται οργανισμό.

## 2.2. Σκηνή

1. Στην σκηνή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε υψηλός πύργος για την εγκατάσταση των μηχανισμών σκηνής.
2. Εξασφαλίστηκαν στο υπόγειο, χώρος υποσκηνίου και αποθήκης σκηνικών
3. Μετά από τα ανωτέρω κατέστη δυνατή η τοποθέτηση αναβατορίου για την αυξομείωση του ύψους του δαπέδου της τάφρου μουσικών (pit) καθώς και τμημάτων του δαπέδου της σκηνής.
4. Μελετήθηκε και κατασκευάστηκε λυόμενο κέλυφος ορχήστρας.



Σχήμα 2.1 Κάτοψη και τομή αίθουσας

### 3. AuroLab: Το εργαλείο σχεδιασμού μέσω της ακοής

Μεταξύ των ποικίλων σχεδιαστικών εργαλείων που χρησιμοποιεί το γραφείο των συγγραφέων συμπεριλαμβάνεται και το «AuroLab». Το AuroLab αποτελεί προσομοιωτή ανακατασκευής και αναπαραστάσης ακουστικών πεδίων σε φυσική κλίμακα, δηλαδή σε αυτήν του ανθρώπου.

Η βασική αρχή του προσομοιωτή δημιουργήθηκε το 2010 ενώ μεταξύ 2016-2019 εξελίχθηκε στην σημερινή της μορφή, χάρη σε κρατική επιχορήγηση Ελληνικών ιδιωτικών εταιρειών, για την ανάπτυξη νεοφυών ιδεών ενώ υποστηρίχθηκε παράλληλα και ανεξάρτητα από το Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (στον ημιανηχοϊκό θάλαμο AMI/ΠΠ, την ακουστική μελέτη του οποίου επίσης έχει εκπονήσει το γραφείο των συγγραφέων [5]) και το Εργαστήριο Ακουστικής Έρευνας & Προσομοιώσεων της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, ως τμήμα εν εξελίξει έρευνας, σχετικής με την επιρροή των πλαγίων ανακλάσεων στην αντίληψη της χωροαίσθησης.

Όπως είναι γνωστό το παραδοσιακό και μέχρι τώρα ευρέως διαδεδομένο αμφιωτικό μοντέλο (με ή χωρίς ακουστικά) έχει αποδειχθεί ακατάλληλο και μη ακριβές για τους σκοπούς της αρχιτεκτονικής σύνθεσης μιας αίθουσας, έστω και εάν το ακουστικό σήμα μεταβάλλεται ενεργά με χρήση «Συνάρτησης Κεφαλής» [6], για τους ακόλουθους λόγους (ενδεικτικά [7]):

- i. Σφάλματα στον προσδιορισμό του ύψους και αδυναμία διαχωρισμού των εμπρόσθιων από τις οπίσθιες ανακλάσεις.
- ii. Πλήρης απώλεια της χωρικής ανάλυσης λόγω του φαινομένου του ενδοκρανιακού περιορισμού [8]
- iii. Αδυναμία απόδοσης των χαμηλών συχνοτήτων, για ευνόητους λόγους.
- iv. Σχεδόν αδύνατη βαθμονόμηση της έντασης κατά την χωρική ανακατασκευή. [Στην πράξη απαιτούνται συστήματα HATS για την δειγματοληψία και την βαθμονόμηση της SPL [9] κατά την εγγραφή και την αποκωδικοποίηση, η χρήση του οποίου είναι πρακτικά αντικοινωνική σε σύγκριση με τα οφέλη που προσφέρει. Βέβαια ευνόητο είναι ότι ακόμα και αυτό να μην υπήρχε ως τεχνικό ζήτημα θα παρέμεναν όλα τα υπόλοιπα εκ των ανωτέρω].
- v. Ανάγκη δημιουργίας εξατομικευμένων «συναρτήσεων κεφαλής» με τα χαρακτηριστικά του κάθε ακροατή για τα συγκεκριμένα ακουστικά που θα χρησιμοποιηθούν. Όμοια ζητήματα με τα ανωτέρω.

Το AuroLab ξεπερνά τα ανωτέρω προβλήματα χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες αρχές:

- i. Μη εξαρτώμενη σχέση κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης
- ii. Δυνατότητα φυσικής απόδοσης των κινούμενων πηγών (λ.χ ηθοποιοί, τραγουδιστές)
- iii. Απόδοση της διάχυσης του ηχητικού πεδίου με την ταυτόχρονη εξάλειψη του FBC effect [10]
- iv. Αναλλοίωτη απόδοση των ακουστικών παραμέτρων λόγω του διανυσματικής και ενεργειακής [11] του βάσης και της δυνατότητας απόδοσης ακόμα και των πολύ χαμηλών συχνοτήτων (33 Hz και άνω) και

ανάλογα με την cut-off frequency [12] της εκάστοτε υπό μελέτης αίθουσας και η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{sch} = 2000 \sqrt{\frac{T60}{V}}$$

- v. Δυνατότητα βαθμονόμησης στην πραγματική ένταση με βάση την σχετική θέση του ακροατή ως προς την σκηνή με κλασσικό ακουστικό αναλυτή Class I [13].
- vi. Η ακρόαση γίνεται με την φυσική θέση του ατόμου, καθήμενο όπως ακριβώς και σε μια αίθουσα συναυλιών θεάτρου κλπ. Επομένως το σώμα δέχεται τον πλήρη ήχο και συμμετέχει σαν να βρίσκεται μέσα σε αυτή.

Ως εκ τούτου μπορεί να υλοποιηθεί τόσο η αναπαράσταση της φυσικής ακουστικής των υπό μελέτη αιθουσών (ήδη από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού) όσο και η ακουστική ανακατασκευή των υπαρχόντων, με την ακουστική αλληλεπίδραση του ανθρώπινου σώματος όπως ακριβώς σε μια πραγματική αίθουσα. Χάρη σε αυτό, επιτυγχάνεται η συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού και του ακουστικού αποτελέσματος, αφού κάθε συνθετική αλλαγή μπορεί να ελεγχθεί – πέραν των στατιστικών [14] και γεωμετρικών μεθόδων [15]- και μέσω της φυσικής ακοής. Με τον τρόπο αυτόν εξοικονομείται σχεδιαστικός χρόνος αφού ενισχύεται η στοχευμένη αναπροσαρμογή των συνθετικών αρχών και των αρχιτεκτονικών επιλογών, αλλά επίσης αξιολογείται η απόδοση της αίθουσας με βάση και ψυχοακουστικά κριτήρια.

Για την περιγραφή της μεθοδολογίας τους, οι συγγραφείς «δημιούργησαν» την σύνθετη λέξη «Περιφώνηση» αποτελούμενη από τα συνθετικά «Περί» [16] (δηλαδή γύρω – γύρω, ολόγυρα, από όλες τις μεριές, από παντού) και «Φωνέω-Φωνώ» (δηλαδή μιλάω) [17,18]. Παράλληλα σημειώνουν ότι η μέθοδος της Περιφώνησης δεν θα πρέπει να συγχέεται με τα εμπορικά μοντέλα επεξεργασίας σήματος (τύπου «Atmos») για τους ακόλουθους λόγους:

1) Τα εμπορικά μοντέλα παραμορφώνουν τα εγγενή χαρακτηριστικά του ακουστικού αποτυπώματος αφού προκειμένου να λειτουργήσουν απαιτούν επεξεργασία και επέμβαση από τον χρήστη. Ως εκ τούτου παράγεται ψευδώς θετικό [19] ακουστικό δείγμα.

2) Η λογική της «Περιφώνησης» βασίζεται στην πεπερασμένη ανάλυση της κυματικής εξίσωσης με σκοπό την επίλυση της στο τρισδιάστατο πεδίο με αγνωστικιστικό τρόπο ως προς την συστοιχία αναπαραγωγής. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι όλες οι ακουστικές παράμετροι των αιθουσών [20] μπορούν να αποδοθούν με πολύ υψηλή ακρίβεια, συμπεριλαμβανομένων και των πρώιμων και ύστερων πλαγίων ανακλάσεων.

Το AuroLab μεταξύ των άλλων σταδίων σχεδιασμού, χρησιμοποιήθηκε και στο τελικό στάδιο της ΚΑΠΧ λίγο πριν την εκκίνηση κατασκευής των επενδύσεων, προς επισφράγιση του τελικού αποτελέσματος και ως τμήμα των ενδεδειγμένων και συνεχών ελέγχων και επιβλέψεων που απαιτούνται σε Έργα τέτοιας κλίμακας και σημασίας.



Σχήμα 3.1: Το πρωτότυπο του AuroLab στο ημιανηχοϊκό θάλαμο του ITE

Αριστερά: I. Τιμαγένης / Δεξιά: A. Τιμαγένη | Λήψη φωτογραφίας: Θ. Τιμαγένης

#### 4. Τελικός έλεγχος – αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση των υπολοίπων τμημάτων του συγκροτήματος καθώς και του φέροντος οργανισμού του τμήματος του κτιρίου όπου είναι χωροθετημένη η ΚΑΠΧ και της αίθουσας εκθέσεων και κοινωνικών εκδηλώσεων, και πριν από την τελική δημοπράτηση της ΚΑΠΧ, έγιναν ο τελικός έλεγχος της ακουστικής της αίθουσας. Ο κατωτέρω πίνακας παρουσιάζει τις μέσες χωρικά σταθμισμένες παραμέτρους ακουστικής

Πίνακας 4.1 *Single number frequency averaging*

Παράμετρος	T30	EDT	LF	LFC	GLL	G	G [0; 80]	G [80; ∞]	BR	TR
Μ.Ο κατά ISO	1,83	1,65	0,20	0,27	5; 6*	8,70	5,77	5,58	1,0	0,90
Συνήθη όρια κατά ISO	–	+1; +3	+0,05; +0,35		-14; +1	-2; +10		–	–	–

\* Ο μετρητής δείκτης του ύστερου τμήματος των πλαγίων ανακλάσεων συμφωνεί και με τις ψυχοακουστικές απόψεις των μουσικών που έχουν εκτελέσει έργα στην κεντρική αίθουσα ΠΣΚΗ. Δεδομένου ότι η τιμή GLL βρίσκεται ακόμα υπό διερεύνηση (σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα), άποψη των συγγραφέων είναι ότι τιμές έως και + 8 dB μπορούν να συμβάλλουν στην επαύξηση της χωροαίσθησης, εφ' όσον ο δείκτης ισχύος είναι ομοιόμορφα κατανομημένος και στα δυο τμήματα (πρώιμο και ύστερο) της καμπύλης ηχοαπόσβεσης και μεγαλύτερος από την εκάστοτε GLL



Σχήμα 4.1 Γενική Άποψη της ΚΑΠΧ

## 5. Αναφορές

- [1] <https://www.cccc.gr/en> (Accessed 02-09-2022)
- [2] <https://www.heraklion.gr/press/press-releases-2019/orchestra-viennis-politistiko-041219.html> (Accessed 02-09-2022)
- [3] <https://www.protothema.gr/culture/article/1203617/to-baleta-karuothraustis-politistiko-sunedriako-kedro-irakleiou/> (Accessed 02-09-2022)
- [4] <https://www.politica.gr/kriti/m-kapetanakis-na-min-afisoume-tin-politiki-kakomoiria-na-amaurosei-tin-lampri-ekkinisi-tou-politistikou/>
- [5] Θ. Τιμαγένης, Μελέτη και κατασκευή θαλάμων αναφοράς για ακουστικές μετρήσεις στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο ακουστική ΕΛΙΝΑ, Θεσσαλονίκη, 2014, .
- [6] Silzle A., Quality of Head-Related Transfer Functions - Some Practical Remarks
- [7] Gardner G, Martin D. HRTF measurements of a KEMAR. J. Acoust. Soc. Am., 1995; 97 (6), 3907-3908
- [8] Brimijoin, W. Owen et al. "The Contribution of Head Movement to the Externalization and Internalization of Sounds (2013)
- [9] Chen-Hung Huang, S.J. Pawar, Zih-Jyun Hong, Jin H. Huang, Earbud-type earphone modeling and measurement by head and torso simulator, Applied Acoustics, Volume 73, Issue 5, 2012, Pages 461-469.
- [10] Fischer T., Caversaccio, M., Wimmer W., A Front-Back Confusion Metric in Horizontal Sound Localization: The FBC Score, ACM Symposium on Applied Perception 2020, Virtual Event, USA, September 2020
- [11] Attenborough M., 18 - Vector calculus, Attenborough, Mathematics for Electrical Engineering and Computing, Newnes, 2003, Pages 446-458, ISBN 9780750658553,
- [12] M. R. Schroeder, "On frequency response curves in rooms: Comparison of experimental, theoretical and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima," J. Acoust. Soc. Am, vol. 34, pp. 76-80, 1962.



- [13] IEC 61672-1:2013 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications, International Electrotechnical Commission
- [14] Schuster, K., and Waetzmann, E., "Reverberation in closed rooms, Ann. D. Phys. 1, 671, 1929
- [15] A. Le Bot and A. Bocquillet, "Comparison of an integral equation on energy and the ray-tracing technique in room acoustics," J. Acoust. Soc. Am. 108(4), 1732–1740 (2000).
- [16] [https:// www.greek-language.gr/ greekLang/modern\\_greek/ tools/lexica/triantafyllides/search.html?lq=περί&dq=](https://www.greek-language.gr/greekLang/modern_greek/tools/lexica/triantafyllides/search.html?lq=περί&dq=)
- [17] <https://logeion.uchicago.edu/φωνέω> (Accessed 02-09-2022)
- [18] Π.Α. Διαμαντάκου, Λεξικό άπαντων ρημάτων των απαντωμένων εις τους αττικούς πεζολόγους, Ι. Σιδέρης, 1999
- [19] <https://www.merriam-webster.com/dictionary/false%20positive> (Accessed 02-09-2022)
- [20] ISO 3382-1. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces, Geneva: International Organization for Standardization, 2009.

## **Μορφές σύγχρονων αιθουσών συναυλίας : προβλήματα αρχιτεκτονικού & ακουστικού σχεδιασμού**

Μιχάλης Αθανασίου                      Βασίλης Σαράντης                      Νίκος Μπάρκας  
athanamiha@gmail.com                      vasilis.sarantis@outlook.com.gr                      nbarkas@arch.dth.gr  
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Οι διαφορετικές απαιτήσεις ακουστικής άνεσης στους χώρους λόγου και μουσικής, μετά την αρχαιότητα επανήλθαν κατά την Αναγέννηση, παίρνοντας μια επικρατούσα, αλλά ατελή, λύση την εποχή του Μπαρόκ. Για τη διάταξη και τη μορφή αυτών των αιθουσών επιλέχθηκαν συγκεκριμένα πρότυπα που κατέληγαν στην ορθογώνια διάταξη τύπου shoebox, μια μορφή μπαρόκ που κυριαρχεί μέχρι τις μέρες μας.*

*Μια εναλλακτική εκδοχή εμφανίστηκε στην Φιλαρμονική του Βερολίνου (1963), με τη διάταξη τύπου vineyard, μορφή που ανάγεται σε προτάσεις θεατρικού σχεδιασμού για θέατρα ανοικτής σκηνής ή αρένες. Κατά τη σύγχρονη εποχή (20ος - 21ος αιώνας) οι αίθουσες συναυλιών είναι πλέον χώροι εξοπλισμένοι με άρτια τεχνολογικά μέσα και συνεχίζουν να προβάλλουν ως σύμβολα του πλούτου και της ανάπτυξης ενός τόπου.*

### **Forms of modern concert halls: architectural & acoustic design problems**

#### **ABSTRACT**

*The different acoustic comfort requirements in speech and music spaces, after the classical era, returned during the Renaissance, receiving a prevailing, but incomplete, solution during the Baroque era. For the layout and form of these rooms, specific stereotypes were chosen that resulted in the rectangular, uni-axial layout (shoebox type), a baroque form that dominates until nowadays.*

*The emergence of an alternative version with the vineyard layout appeared at the Berlin Philharmonic (1963), a format that goes back to theatrical design proposals for open stage or arena. In the modern era (20th - 21st century) concert halls are places equipped with advanced technological means and continue to stand as symbols of the wealth and development of a place.*

#### **Εισαγωγή**

Μέχρι και τα τέλη του 17ου αιώνα οι μουσικές εκδηλώσεις φιλοξενούνταν στα μεγάλα, συνήθως ορθογώνια, σαλόνια των ανακτόρων. Ύστερα από τις κοινωνικές αναταράξεις που διαπέρασαν την Ευρώπη τον 18ο αιώνα, προέκυψε η ανάγκη κα-

τασκευής δημοσίων αιθουσών συναυλίας που, συνήθως, προσομοίαζαν σε σχήμα, μέγεθος και αναλογίες με τα ανακτορικά σαλόνια. Είναι ένας τύπος αίθουσας σχετικά μικρής χωρητικότητας, με αναλογίες διπλού, όρθιου κύβου, που λόγω των υψηλών πλάγιων τοίχων πήρε αργότερα το όνομα shoebox (κουτί παπουτσιών) (Haydn Saal – 1700, Hanover Square Rooms - 1775, Altes Gewandhaus Concert Hall - 1780) [1]

Για να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη χωρητικότητα σε θεατές και μουσικούς, ο J. Meyer πρότεινε τη διατήρηση των αναλογιών αυτού του τύπου, αυξάνοντας ομοιόμορφα τις βασικές διαστάσεις, σε συνδυασμό με την αντικατάσταση των ξύλινων επενδύσεων από άλλα, συμπαγή υλικά, για να διατηρηθεί η υψηλή αντήχηση. Μέχρι τα μέσα του 19ου αιώνα ο τύπος shoebox θεωρείτο ο πιο επιτυχημένος ακουστικά τύπος αίθουσας. Όμως η απαίτηση για περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας οδήγησε στην προθήκη θεωριών και εξωστών κατά μήκος των πλάγιων πλευρών, κίνηση που επέτρεψε την εμφάνιση πρόσθετων ηχο-ανακλάσεων, τυχαίων διευθύνσεων. Ο συνδυασμός του μακρόστενου ορθογώνιου σχήματος με μεγάλο όγκο και ανακλαστικές επενδύσεις στις νέες αίθουσες εξασφάλισε υψηλά επίπεδα αντήχησης, έγκαιρες ηχο-ανακλάσεις, διαύγεια και λαμπρότητα στις χαμηλές συχνότητες, που ανταποκρινόταν στη μουσική εκείνης της περιόδου (Neues Gewandhaus - 1844, Musikvereinsaal - 1869, Concertgebouw - 1888, Συμφωνική Βοστώνης - 1900). [2]

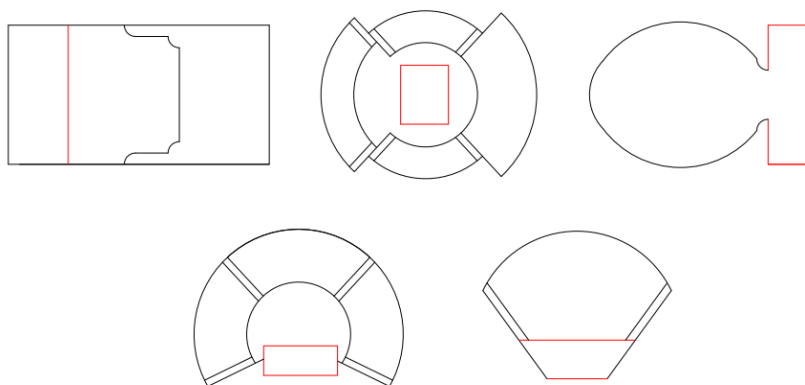
Η μετεξέλιξη της ακουστικής από τον εμπειρισμό σε επιστήμη, χάρη στη θεωρία του W. Cl. Sabine, στα τέλη του 1890, επέτρεψε την αξιολόγηση των εσωτερικών επενδύσεων για τον έλεγχο της αντήχησης, οπότε ο σχεδιασμός αιθουσών απέκτησε επιλογές πέρα από τον επικρατέστερο (μέχρι τότε) τύπο shoebox. Στη δεκαετία του '50 πρωτο-εμφανίστηκε στη Στουτγάρδη (MozartSaal - 1956) ο τύπος vineyard (αμπελώνας), που σχεδόν έναν αιώνα μετά τα εγκαίνια της αίθουσας στη Βιέννη, έγινε γνωστός όταν υιοθετήθηκε από τον αρχιτέκτονα H. Scharoun στη Φιλαρμονική του Βερολίνου (1963 - 2.440 θέσεις). [3] Επρόκειτο για την εφαρμογή του κυκλικού σχήματος της αρένας σε αίθουσα συναυλιών, ένα νεωτερισμό που είχε ήδη τεθεί ως προβληματισμός στο θεατρικό σχεδιασμό από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα (Σχήμα 1), ο οποίος χάρη στη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας άρχισε να διαδίδεται και να κατακτά μερίδιο στις προτιμήσεις του κοινού. [4]

Στις αίθουσες τύπου vineyard οι θεατές ομαδοποιούνται σε τμήματα κερκίδων που εγκιβωτίζονται ανάμεσα σε χαμηλούς τοίχους και διατάσσονται αμφιθεατρικά, θυμίζοντας τα αμπέλια στις πλαγιές των λόφων. Το νεωτερικό σχήμα της Φιλαρμονικής του Βερολίνου μετέφερε την ορχήστρα στο κέντρο της αίθουσας, με τους θεατές περιμετρικά, μια θαρρετή αρχιτεκτονική διαρρύθμιση που γενίκευσε τη διευθέτηση της Concertgebouw του Αμστερνταμ, με το μικρό πλήθος των θέσεων δίπλα και πίσω από τη σκηνή. Το προτέρημα του τύπου vineyard είναι η αύξηση της χωρητικότητας με ταυτόχρονη μείωση της μέσης απόστασης των θεατών από τη σκηνική εξέδρα. Παράλληλα, εξαλείφθηκε ο διαχωρισμός μεταξύ κοινού και μουσικών, αρχιτεκτονική και ιδεολογική κίνηση που αποτέλεσε τομή στη σχεδιαστική φιλοσοφία των αιθουσών συναυλίας [2]

Καθώς στη δεκαετία του 1950 είχε γίνει ήδη κατανοητή η σημασία των πρώιμων ανακλάσεων, σε αντίθεση με τους ορθογώνιους τοίχους και την επίπεδη οροφή των shoebox, στη Φιλαρμονική επιλέχθηκε ένα επτάπλευρο εσωτερικό κέλυφος, ανισόπεδη οροφή σε σχήμα τέντας με κορυφή πάνω από την ορχήστρα και το εκκλησιαστικό όργανο (orgue) μακριά από την εξέδρα. Το βασικό στοιχείο που άλλαξε ριζικά το σχεδιασμό της αίθουσας ήταν η τοποθέτηση ανακλαστών ως αιωρούμενων πετασμάτων πάνω από την ορχήστρα, αλλά και στις προσόψεις των

εξωστών, που σε συνδυασμό με την ικανή κλίση των κερκίδων, εξασφαλίζουν οπτική άνεση και άμεσο ήχο στο βάθος μιας αίθουσας. Η επιτυχία της Φιλαρμονικής του Βερολίνου προσέδωσε ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και παράλληλα άνοιξε τους ορίζοντες της ακουστικής, από τις απλές στις σύνθετες γεωμετρικές μορφές. Η μελέτη των αιθουσών έγινε τρισδιάστατη και αρχικά βασίστηκε σε προπλάσματα μεγάλης κλίμακας, μέχρι να υποστηριχθεί από τους σύγχρονους Η/Υ. [3]

Ο ακουστικός σχεδιασμός μιας αίθουσας συναυλιών ακολουθεί συγκεκριμένες διαδικασίες και προϋποθέσεις, όπως κελύφη με μεγάλα ανοίγματα, ανοικτό δομικό κάναβο, ποικίλες ανισοσταθμίες, ηχοπροστασία της αίθουσας, επιλογή της κατάλληλης αναλογίας επιφάνειας & όγκου ανά θεατή / μουσικό και ρύθμιση της αντήχησης, σε συνάρτηση με το λειτουργικό πρόγραμμα και το επιθυμητό είδος της μουσικής. Παράλληλα απαιτείται να εξασφαλιστούν οι σύγχρονοι χώροι εξυπηρέτησης - κίνησης θεατών / μουσικών, η προσπέλαση / πρόσβαση των ΑΜΕΑ, καθώς και ο φωτιστικός - ηχητικός εξοπλισμός. [5]



Σχήμα 1 Σκαριφήματα αιθουσών μουσικής (με κόκκινο η περιοχή της ορχήστρας)  
πάνω από αριστερά : shoebox, vineyard, πέταλο,  
κάτω από αριστερά : ανοικτή σκηνή, κόρνα

## 1. Η μεθοδολογία της έρευνας

Η προτεινόμενη ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης (σε εξέλιξη) έρευνας, η οποία επικεντρώνεται στα προβλήματα σχεδιασμού, τις τεχνολογικές εφαρμογές, τα υλικά και τις τεχνικές κατασκευής των σύγχρονων αιθουσών συναυλίας. Αφορά ένα αρχικό δείγμα δέκα (10) αιθουσών, με βιβλιογραφική και δικτυακή έρευνα από διασταυρωμένες πληροφορίες που περιλαμβάνουν :

- τη θέση, το κοινωνικό και πολιτιστικό πλαίσιο κατασκευής του κτιρίου
- το μέγεθος, τη μορφή και τα υλικά κατασκευής του κελύφους
- τη μορφή, τη διάταξη και τις προσφερόμενες ανέσεις της αίθουσας,
- ακουστικές παραμέτρους (όπως χωρητικότητα, όγκος και χρόνος αντήχησης).

Για τη συνοπτική καταχώρηση των δεδομένων κάθε αίθουσας σχεδιάστηκε μια πρωτότυπη καρτέλα. Για τη σφαιρική θεώρηση των δεδομένων του δείγματος συγκροτη-

θηκε ένας συνοπτικός πίνακας. Στις γραμμές (με λατινική αρίθμηση) αναγράφονται με χρονική σειρά οι αίθουσες του δείγματος:

I. Wiener Musikverein Αυστρία, II. Berlin Philharmonien, III. Kioto Concert Hall, 1995, Ιαπωνία, IV. Walt Disney Concert Hall, 2003, ΗΠΑ, V. Guangzhou Opera House, 2010, Κίνα, VI. Harpa Concert Hall, 2011, Ισλανδία, VII. Stavanger Concert Hall, 2012, Νορβηγία, VIII. Blaibach Concerthaus, 2014, Γερμανία, IX. National Radio Symphony 2014, Πολωνία, X. CKK Jordanki, 2015, Πολωνία, XI. Philharmonie de Paris, 2015, Γαλλία, XII. Elbphilharmonie Hamburg, 2016, Γερμανία

	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H
I	1870	ΚΣ	1680	S	+	+	+	-
II	1963	ΚΣ	2440	V	-	+	+	-
III	1995	ΚΣ	1833	S	-	+	+	-
IV	2003	ΚΣ	2265	V	-	+	+	-
V	2010	ΚΣ	1800	V	-	+	-	-
VI	2011	ΚΣ	1800	S	-	+	+	-
VII	2012	ΚΣ	1500	S	-	+	+	-
VIII	2014	ΑΑ	200	S	+	-	-	-
IX	2014	ΚΣ	1800	S	-	+	+	-
X	2015	ΚΣ	882	S	+	+	-	+
XI	2015	ΚΣ	2400	V	-	+	-	+
XII	2016	ΚΣ	2100	V	-	+	+	+

Στις στήλες με κεφαλαία γράμματα σημαίνονται: (A) η χρονολογία αρχικής κατασκευής, (B) αυτόνομη αίθουσα ΑΑ ή κτιριακό συγκρότημα ΚΣ, (Γ) η χωρητικότητα της αίθουσας, (Δ) τύπος shoebox S ή vineyard V, (E) πολλαπλές χρήσεις της αίθουσας (+ ή -), (ΣΤ) αίθουσα δοκιμών (+ ή -), (Z) εκκλησιαστικό όργανο και (H) κινητή σκηνική εξέδρα (+ ή -). [2]

## 2. Ανάλυση παραδειγματικών αιθουσών της έρευνας

### 3.1 Wiener Musikverein

Η Wiener Musikverein είναι η έδρα της Φιλαρμονικής της Βιέννης. Η κατασκευή του κτιρίου (1863-70) στο κέντρο της αυστριακής πρωτεύουσας πραγματοποιήθηκε με σχέδια του δανού αρχιτέκτονα Th. von Hansen, σε νεοκλασική μορφή και διακόσμηση κατά το ρεύμα του αυστηρού Ιστορικισμού,.



Σχήμα 3.1 Η όψη του κτιρίου [2]



Σχήμα 3.2 Η αίθουσα [3]

Η κεντρική αίθουσα Musikvereinsaal έχει ορθογώνια κάτοψη (μήκος 36μ, πλάτος 16μ και ύψος 20μ), με ισόγειο και εξώστη, συνολικής χωρητικότητας 1680 θέσεων. Παρά το μεγάλο όγκο, τη μεγάλη πυκνότητα ακροατηρίου και τα οριζόντια δάπεδα, θεωρείται πρότυπο ακουστικού σχεδιασμού για τη μουσική του γερμανικού ρομαντισμού και είναι διαχρονικά δημοφιλής στους μουσικούς και το κοινό.

Αποτελεί κλασικό παράδειγμα αίθουσας shoebox με υψηλή αντήχηση και πρώιμες ανακλάσεις από τους επιμήκεις, πλάγιους τοίχους. Το σχήμα της δεν συμβαδίζει με τα δεδομένα των σύγχρονων κανονισμών κίνησης και πυρασφάλειας. Χάρη στο σχετικά περιορισμένο πλάτος της εξασφαλίζει πρώιμες ανακλάσεις, αλλά εξαιτίας του μεγάλου μήκους της δυσχεραίνει την οπτική άνεση και, ιδίως στον εξώστη, αυξάνει τα μειονεκτήματα της ηχο-διάδοσης. [3]

### 3.2 Berlin Philharmonie

Σχεδιάστηκε από τον γερμανό αρχιτέκτονα H. Scharoun και κατασκευάστηκε στην περιοχή Tiergarten (Δ. Βερολίνο, 1956 - 63), για να αντικαταστήσει την παλιά Φιλαρμονική που καταστράφηκε από βομβαρδισμούς. Εξωτερικά το κτίριο φέρει έντονες καμπύλες και γωνίες, που τονίζουν το κίτρινο μεταλλικό περίβλημά της. Σχεδιάστηκε από μέσα προς τα έξω, δηλαδή υπακούει στην επιθυμητή μορφή της αίθουσας, με τον (τότε) μη συμβατικό τύπο vineyard, την ορχήστρα σε κεντρική θέση και το κοινό περιμετρικά (ποσοστό 30% των θέσεων στα πλάγια και πίσω από την ορχήστρα), εξασφαλίζοντας χωρητικότητα 2.325 θέσεων με εξαιρετική οπτική και οικεία ατμόσφαιρα (μέγιστη απόσταση του κοινού 32μ από την εξέδρα). [6]

Ο L. Cremer θεωρούσε μειονέκτημα την πολυπλοκότητα της διάταξης και τη διευρυμένη έκταση των καθισμάτων γύρω από την ορχήστρα (για την έλλειψη έγκαιρων ανακλάσεων). Προς τούτο ο Scharoun απέδωσε σχηματικά την ορχήστρα στο κέντρο μιας κοιλάδας, όπου τα ανυψωμένα πρανή των πλατωμάτων του αμπελώνα περιμετρικά και οι χαμηλοί τοίχοι των 12 εξωστών (ο καθένας σε διαφορετική στροφή και στάθμη) σε ακανόνιστες θέσεις γύρω από την ορχήστρα κατά τα 3/4, εξασφαλίζουν ποικιλία ανακλαστικών επιφανειών και περιορίζουν τις χρονικές καθυστερήσεις (< 50ms, παρά την έκταση του κοινού) και αποτρέποντας τους συντονισμούς. [7]

Για να επιτευχθεί η προσδοκώμενη αντήχηση, ο Cremer υπολόγισε μια αναλογία 11m<sup>3</sup>/θ. Επίσης πρότεινε χαμηλές οροφές στους περιμετρικούς εξώστες και κυρτά

τιμήματα τέντας, σε μορφή σύννεφου, πάνω από την ορχήστρα, ώστε να ρυθμιστεί ο όγκος και να ελεγχθούν οι χαμηλές συχνότητες με 136 ξύλινους διαχυτές. [8]



Σχήμα 3.3. Η όψη του του κτιρίου [2]



Σχήμα 3.4. Η αίθουσα [2]

### 3.3 Harpa Concert Hall

Το Harpa Concert Hall χτίστηκε στο λιμάνι του Ρέικιαβικ της Ισλανδίας. Το όνομά του αναφέρεται στην άρπα και το κτίριο ξεχωρίζει σαν ένας γλυπτός όγκος από τον τοπικό βασάλτη, στο όριο μεταξύ στεριάς και θάλασσας. Εξωτερικά, το κέλυφος συντίθεται από κρυσταλλικά πετάσματα που λάμπουν στη διάρκεια της ημέρας ή φωτίζονται από λυχνίες LED κατά τη διάρκεια της νύχτας. [2]



Σχήμα 3.5 Το εξωτερικό κέλυφος [2]



Σχήμα 3.6 Η αίθουσα συναυλιών [2]

Το Harpa σχεδιάστηκε ως ένας πολύ-χώρος που θα στεγάσει συναυλίες, συνέδρια και ξενοδοχείο. Το Eldborg, η μεγαλύτερη αίθουσα του διαθέτει 1.800 θέσεις και χαρακτηρίζεται για την εξαιρετική ακουστική απόδοση διαφόρων ειδών μουσικής. Κτίστηκε ακολουθώντας την αρχή «θάλαμος μέσα σε θάλαμο» και διαθέτει συζευγμένους όγκους ενσωματωμένους στους πλευρικούς τοίχους (με ανοικτές ή κλειστές πόρτες από σκυρόδεμα), οι οποίοι ρυθμίζουν τον χρόνο αντήχησης (σε γεμάτη αίθουσα από 1,4 ως 3,3 s στις μέσες συχνότητες) σε συνδυασμό με ηχο-απορροφητικά πετά-

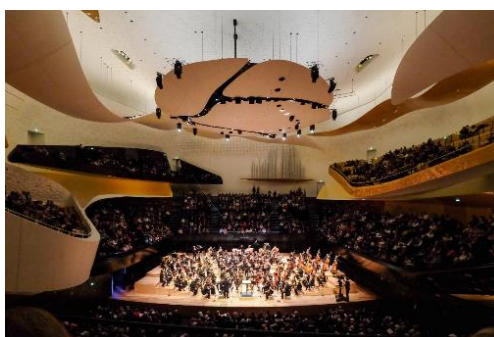
σματα που καλύπτουν ολόκληρο ή μέρος των τοιχωμάτων. Με αυτό τον τρόπο, η αίθουσα μετατρέπεται σ' ένα μεγάλο μουσικό όργανο που ρυθμίζεται ακουστικά για κάθε διακεκριμένη εκδήλωση. [2]

### 3.4. Philharmonie de Paris

Ο αρχιτέκτονας J. Nouvel κέρδισε τον διαγωνισμό της αρχιτεκτονικής μελέτης για τη νέα Φιλαρμονική στο Παρίσι (2007), ενώ στην ακουστική μελέτη συνεργάστηκαν ο H. Marshall (Marshall Day Acoustics) και ο Y. Toyota (Nagata Acoustics). Το κτίριο βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του Parc de La Villette, έχει τη μορφή βράχου και επενδύθηκε με 340.000 πετάσματα αλουμινίου. [2]



Σχήμα 3.7 Αποψη του κτιρίου [2]



Σχήμα 3.8 Η αίθουσα συναυλιών [2]

Η κεντρική αίθουσα της Φιλαρμονικής είναι ένας μονοκόμματος όγκος 37.700 m<sup>3</sup> χωρητικότητας 2.400 θέσεων, του οποίου η αντήχηση ρυθμίζεται με πετάσματα μεταβλητής ηχοαπορρόφησης. Η ακουστική της μελετήθηκε αναλυτικά με διάφορα λογισμικά σε ψηφιακό περιβάλλον τρισδιάστατης προσομοίωσης (για τις πρώιμες ανακλάσεις, την ηχητική ισχύ, το χρόνο αντήχησης, τη διαύγεια) και τελειοποιήθηκε σε μακέτα 1 : 10 με σήμα από ακτίνες λέιζερ. [3]

## 4. Συμπεράσματα

Η επίλυση των προβλημάτων μιας αίθουσας συναυλιών επηρεάζεται από μια σωρεία μεταβλητών, που καθεμιά και σφαιρικά όλες μαζί διαμορφώνουν την ιδιομορφία κάθε αίθουσας. Η αρχιτεκτονική αυτών των ειδικών κτιρίων γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη από την νεότερη εποχή των μεγάλων Βασιλείων στην Ευρώπη, μέχρι και τις μέρες μας σε παγκόσμια κλίμακα, στη φανερή προσπάθεια να επιδειχτεί η ανωτερότητα των αρχόντων και των πόλεων που οικοδομούν τέτοια μεγαλοπρεπή κτίρια.

Η ελευθερία που δόθηκε στους αρχιτέκτονες αφορούσε το κέλυφος των κτιρίων, ενώ στις αίθουσες επιλέχθηκαν συγκεκριμένα στερεότυπα που, σε συνδυασμό με την περιορισμένη γνώση περί της ακουστικής των αιθουσών και την τυπική, ορθογώνια, μονο-αξονική διάταξη shoebox (υψηλοί πλευρικοί τοίχοι, θεωρεία και εξώστες με κλασικιστική διακόσμηση) συνθέτουν μια μορφή μπαρόκ που θεωρείται πρότυπο



ακουστικής απόδοσης και κυριαρχεί μέχρι τις μέρες μας. Η επανάσταση στον ακουστικό σχεδιασμό των αιθουσών καθυστέρησε μέχρι τη δεκαετία του '60, όταν η κατασκευή της Φιλαρμονικής του Βερολίνου (1963) αποκάλυψε τη νέα μορφή της διάταξης vineyard, που ανάγεται στα θέατρα ανοικτής σκηνής ή αρένας. Ο νέος τύπος φαίνεται να εξασφαλίζει καλύτερες πρώιμες ανακλάσεις, ενώ υπερτερεί στην ευελιξία που εξασφαλίζει στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και στην οπτική άνεση.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, κατά το σχεδιασμό μιας αίθουσας συναυλιών δεν αρκεί πλέον η δυσδιάστατη μελέτη, αλλά ένα σύνολο τρισδιάστατων σχεδίων, εξέλιξη που απαιτεί τη συνεργασία διαφόρων τεχνικών και επιστημών. Παράλληλα με μια σειρά τυπικών προδιαγραφών και κανόνων, απαιτείται η ευαισθησία του αρχιτέκτονα στην εννοχρήστρωση αυτής της πολύπλευρης συνεργασίας.

## 5. Βιβλιογραφικές πηγές

- [1] Mauvan, J.: «Shoebox, an analysis of the concert hall and its adaption to small-scale music performance space», Victoria University of Wellington 2011
- [2] Αθανασίου, Μ.Κ. - Σαράντης, Β.: « Αίθουσες συναυλιών της σύγχρονης εποχής : αρχιτεκτονικός & ακουστικός σχεδιασμός» Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, TAM-ΔΠΘ, Ξάνθη 2022
- [3] Toyota Y - Komoda M - Beckmann D - Quiquerez M -Bergal E: «Concert Halls by Nagata Acoustics, Thirty Years of Acoustical Design for Music Venues and Vineyard-style Auditoria», Switzerland, Springer, 2020
- [4] Μπάρκας, Ν.: «Θεατρικός χώρος & Τεχνολογία», σημειώσεις μαθήματος, TAM-ΔΠΘ, 2018
- [5] Μερκούρη Ε.: «Η εξέλιξη των αιθουσών μουσικής από την Αναγέννηση μέχρι σήμερα», Ερευνητική εργασία - Διάλεξη, TAM-ΔΠΘ, Ξάνθη 2016
- [6] Beranek, L.: «Acoustics», Cambridge MA, 1993
- [7] Barron, M.: «Auditorium Acoustics and Architectural Design», Spon Press, 1993
- [8] Forsyth M.: «Buildings for Music», The MIT Press, 1985

## **Ένα επιχειρησιακό μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών για την πρόβλεψη θορύβου ναυσιπλοΐας**

Εμμ. Σκαρσουλής<sup>1\*</sup>, Γ. Πιπεράκης<sup>1</sup>, Α. Προσπαθόπουλος<sup>2</sup>, Δ. Μακρόπουλος<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ηράκλειο, Κρήτη

<sup>2</sup> Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, Ανάβυσσος, Αττική

\*eskars@iacm.forth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών για την πρόβλεψη του χαμηλόσυχνου θορύβου ναυσιπλοΐας σε θαλάσσιες περιοχές με περίπλοκη βαθυμετρία. Για την επιχειρησιακή εφαρμογή του μοντέλου τα τοπικά περιβάλλοντα κατηγοριοποιούνται ως προς βάθος, και για κάθε διακριτό βάθος νερού επιλύεται το κατακόρυφο πρόβλημα ιδιοτιμών και υπολογίζονται/αποθηκεύονται οι ιδιομορφές καθώς και οι πίνακες σύζευξης που αντιστοιχούν σε διαδοχικά βάθη. Στη συνέχεια, με βάση τη θέση της κάθε πηγής θορύβου (πλοίου) και το περιβάλλον διάδοσης, ανακτώνται και συνδυάζονται οι κατάλληλες ιδιομορφές και πίνακες σύζευξης και συντίθεται το ακουστικό πεδίο. Η προκαταρκτική επίλυση του κατακόρυφου προβλήματος, η αρχειοθέτηση και επιλεκτική ανάκτηση των σχετικών αποτελεσμάτων επιτρέπει τον ταχύ υπολογισμό του συνολικού ακουστικού πεδίου, πράγμα ιδιαίτερα σημαντικό για την κάλυψη μεγάλων θαλάσσιων περιοχών και μεγάλου αριθμού πλοίων. Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από το πρόγραμμα ΕΣΠΑ 2014-2020 (ΟΠΣ 5010880 και ΟΠΣ 5045792).

### ***An operational coupled-mode model for shipping-noise prediction***

#### **ABSTRACT**

*A coupled-mode model will be presented for the prediction of low-frequency shipping noise in marine areas with complex bathymetry. For the operational application of the model, the local environments are categorized according to water depth, and for each discrete water depth the vertical eigenvalue problem is solved, and the modes and coupling matrices corresponding to subsequent depths are calculated and stored. Then, depending on the location of each noise source (ship) and the propagation environment, the appropriate modes and coupling matrices are retrieved and combined, and the acoustic field is synthesized. The preliminary solution of the vertical problem, the archiving and selective retrieval of the relevant results allows for rapid calculation of the total acoustic field, which is particularly important for the coverage of large sea areas and large numbers of ships. This work was supported by the program NSRF 2014-2020 (OPS 5010880 and OPS 5045792).*

## ***SAnEWhales: Ακουστικό παρατηρητήριο φουσητήρων στη ΝΔ Κρήτη***

Εμμ. Σκαρσουλής<sup>1\*</sup>, Γ. Πιπεράκης<sup>1</sup>, Εμμ. Ορφανάκης<sup>1</sup>, Π. Παπαδάκης<sup>1</sup>,  
Δ. Παυλίδη<sup>1</sup>, Μ. Καλογεράκης<sup>1,2</sup>, Π. Αλεξιάδου<sup>3</sup>, Α. Φραντζής<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών,  
Ηράκλειο, Κρήτη

<sup>2</sup> Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων, Ηράκλειο, Κρήτη

<sup>3</sup> Ινστιτούτο Κητολογικών Ερευνών ΠΕΛΑΓΟΣ, Βουλιαγμένη

\*eskars@iacm.forth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στα πλαίσια του προγράμματος *SAnEWhales* σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ένα πιλοτικό ακουστικό παρατηρητήριο βαθιάς θάλασσας για τον τρισδιάστατο εντοπισμό φουσητήρων σε πραγματικό χρόνο. Οι φουσητήρες ανιχνεύονται και εντοπίζονται από τους παλμικούς ήχους (κλικς) που παράγουν όταν βρίσκονται σε κατάδυση. Το παρατηρητήριο ποντίστηκε και δοκιμάστηκε με επιτυχία για συνολικά 6 μήνες το καλοκαίρι του 2020 και 2021 στη ΝΔ Κρήτη. Μια λεπτομερής περιγραφή του συστήματος ανίχνευσης και εντοπισμού καθώς και αποτελέσματα και συγκρίσεις με ανεξάρτητες παρατηρήσεις δημοσιεύτηκαν πρόσφατα και είναι διαθέσιμα στο open-access περιοδικό *Frontiers in Marine Science*, DOI: 10.3389/fmars.2022.873888. Το πρόγραμμα *SAnEWhales* χρηματοδοτήθηκε από την *Ocean Care (CH)*.

## ***SAnEWhales: Acoustic observatory for sperm whales off SW Crete***

### **ABSTRACT**

A pilot acoustic deep-water observatory for detection and 3-dimensional localization of sperm whales in real time was designed and developed the framework of the *SAnEWhales* project. The sperm whales are detected and localized from the pulsed sounds (clicks) that they produce while diving. The observatory was deployed and successfully tested for a total of 6 months in the summer of 2020 and 2021 off SW Crete. A detailed description of the detection and localization system as well as results and comparisons with independent observations were recently published and can be found in the open-access journal *Frontiers in Marine Science*, DOI: 10.3389/fmars.2022.873888. The *SAnEWhales* project was funded by *Ocean Care (CH)*.

## **Αναγνώριση ιδιομορφών υποβρύχιων ακουστικών σημάτων με χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων**

Κώστας Σμαραγδάκης<sup>1</sup>, Ιωάννης Μαρής, Μιχάλης Ταρουδάκης<sup>1</sup>  
Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης,  
Πανεπιστημιούπολη Βουτών 70013 Ηράκλειο

<sup>1</sup> επίσης, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ν. Πλαστήρα 100,  
Βασιλικά Βουτών, 70013 Ηράκλειο  
kesmarag@gmail.com

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία παρουσιάζεται ένα σχήμα για την αναγνώριση των κανονικών ιδιομορφών μικρής τάξεως ακουστικών σημάτων που καταγράφονται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η αναγνώριση βασίζεται στο φασματογράφημα (spectrogram) του σήματος. Θα αναπτυχθεί και θα χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο με συνελκτικά στρώματα (Convolutional Neural Network - CNN). Η προσαρμογή των παραμέτρων του νευρωνικού δικτύου θα πραγματοποιηθεί με συνθετικά φασματογραφήματα τα οποία παράγονται με χρήση προγράμματος υπολογισμού του ακουστικού πεδίου στη θάλασσα από γνωστή πηγή μέσω θεωρίας κανονικών ιδιομορφών σε επιλεγμένα περιβάλλοντα. Για την ανάκτηση των ιδιομορφών υιοθετείται μια απλή παραμετροποίηση των καμπυλών διασποράς. Ο βασικός στόχος του σχήματος αναγνώρισης είναι ο καθορισμός των τιμών των παραμέτρων που περιγράφουν τις καμπύλες διασποράς μικρής τάξεως. Αυτές οι παράμετροι αποτελούν τις εξόδους του νευρωνικού δικτύου (ετικέτες). Η προσαρμογή των παραμέτρων για τα σήματα εισόδου (παραγωγή ετικετών) επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας τυπική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και με τη χρήση των θεωρητικών χρόνων άφιξης των κανονικών ιδιομορφών. Στην εργασία παρουσιάζουμε τα πρώτα αποτελέσματα για μια απλή γεωμετρία του θαλάσσιου περιβάλλοντος με ελεγχόμενες αβεβαιότητες των περιβαλλοντικών παραμέτρων.

## ***Recognition of normal modes in underwater acoustic signals using Convolutional Neural Networks***

### **ABSTRACT**

*The paper presents a scheme for the recognition of the lower order normal modes of acoustic signals recorded in the marine environment. The identification is based on the spectrogram of the signal. A suitable Convolutional Neural Network (CNN) is developed and used. The adjustment of the parameters of the neural network will be performed with synthetic spectrograms which are produced using a standard code to calculate the acoustic field at sea from a known source based on the theory of normal modes in selected environments. A simple parameterization of the dispersion curves is adopted to characterize the corresponding normal modes. The main goal of the identification scheme is to determine the values of the parameters that describe the small-order dispersion curves. These parameters constitute the outputs of the neural network (labels). The fitting of the parameters for the input signals (label generation) is achieved through a training process using a standard least-squares method and using the theoretical arrival times of the normal modes. In the paper we present the first results for a simple geometry of the marine environment with controlled uncertainties of the environmental parameters.*

## ***Ένα μεσοπρόθεσμο πείραμα για τη μέτρηση του θορύβου του θαλάσσιου περιβάλλοντος***

Panagiotis Papadakis, Michael I. Taroudakis<sup>1</sup>, George Piperakis,  
Emmanuel Skarsoulis, Emmanuel Orfanakis  
Institute of Applied and Computational Mathematics, FORTH N. Plastira 100,  
70013 Heraklion, Crete, GREECE.

<sup>1</sup>also, Department of Mathematics and Applied Mathematics, University of Crete,  
panos@iacm.forth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία αυτή βασίζεται στο έργο που ανέλαβε το Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών (IYM) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) στο πλαίσιο του προγράμματος QUIETMED που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η ομάδα Υποβρύχιας Ακουστικής του IYM σχεδίασε, ανέπτυξε και δοκίμασε αυτόνομους υποβρύχιους καταγραφείς, οι οποίοι εγκαταστάθηκαν σε δύο τύπους αγκυρώσεων για βραχυπρόθεσμες και για μεσοπρόθεσμες μετρήσεις. Η παρούσα εργασία περιγράφει το τέταρτο πιλοτικό πείραμα που ανέλαβε το IYM στο πλαίσιο του προγράμματος QUIETMED. Η εργασία περιλαμβάνει μια περιγραφή του πειράματος και μερικά παραδείγματα καταγεγραμμένων δεδομένων μετά τη επεξεργασία τους.*

### ***A medium term experiment for measuring ambient noise in the sea***

#### **ABSTRACT**

*This paper is based on the work undertaken by the Institute of Applied and Computational Mathematics (IACM) of the Foundation for Research and Technology-Hellas in the framework of the QUIETMED project funded by the Directorate General of the Environment of the European Commission. In this respect, the IACM group designed, developed and tested autonomous underwater listeners which were installed in two types of mobile stations for short term and medium term measurements. This paper describes the fourth pilot experiment undertaken by IACM in the framework of the QUIETMED project. The paper includes a description of the experiment and some examples of recorded data and processing results.*

---

## Εισαγωγή

Με την έγκριση της οδηγίας-πλασίου για τη θαλάσσια στρατηγική (MSDF) [1] για τον υποβρύχιο θόρυβο (Descriptor 11) [2] και την παρακολούθησή του, κατέστη προφανές ότι θα πρέπει να δημιουργηθεί μια γέφυρα για την κάλυψη του χάσματος μεταξύ κανονισμών, και ρεαλιστικής εφαρμογής. Έτσι, έγινε εμφανής η ανάγκη για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη κινητών σταθμών μέτρησης του θορύβου του θαλάσσιου περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας σχετικά χαμηλούς κόστους όργανα. Η διάρκεια λειτουργίας αυτών των σταθμών θα μπορούσε να είναι από λίγες ώρες έως πολλές ημέρες, οπότε απαιτήθηκε μεγάλος βαθμός ευελιξίας.

Επίσης, ήταν προφανές ότι οι σταθμοί αυτοί θα έπρεπε να συλλέγουν δεδομένα, τα οποία, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, θα μπορούσαν να συγκριθούν με δεδομένα από άλλους σταθμούς σε ίδιες ή διαφορετικές περιοχές, προκειμένου να εξαχθούν οριστικά συμπεράσματα σχετικά με τα επίπεδα του υποβρύχιου θορύβου που μετρείται από αυτούς τους σταθμούς. Έτσι, στο πλαίσιο του προγράμματος QUIETMED αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν πιλοτικά πειράματα σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου και από διαφορετικές ομάδες. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις από αυτά τα πιλοτικά πειράματα θα έπρεπε να είναι συγκρίσιμες, ήταν απαραίτητο κάθε ομάδα να αναφέρει τον τύπο των χρησιμοποιούμενων οργάνων, τη διαδικασία βαθμονόμησης και την παρουσίαση των καταγραφών θορύβου. Αυτό θα οδηγούσε τελικά στην τυποποίηση των μεθοδολογιών καταγραφής, επεξεργασίας και βαθμονόμησης της ακουστικής συσκευής ελέγχου, παράγοντας έτσι τυποποιημένα και συγκρίσιμα δεδομένα.

Το ΙΥΜ ανέλαβε - πέραν της ανάπτυξης των οργάνων - την διενέργεια των πιλοτικών πειραμάτων σε ρηχή και βαθιά θάλασσα. Επιλέχθηκαν δύο περιοχές για την διενέργεια των πειραμάτων: – Ο κόλπος του Ηρακλείου με σχετικά μικρό βάθος και η περιοχή στα ανοικτά της Παλαιόχωρας με μεγαλύτερο βάθος. –Στο Εργαστήριο Υποβρύχιων Ακουστικών Μετρήσεων του ΙΥΜ αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και βαθμονομήθηκε ένα χαμηλού κόστους αυτόνομο σύστημα ακουστικής καταγραφής για χρήση στο εσωτερικό της θάλασσας [3,4] που χρησιμοποιήθηκε στα πιλοτικά πειράματα. Έγιναν συνολικά 4 πειράματα, δύο μικρής διάρκειας (1 με 2 ώρες) και δύο μεγαλύτερης (3 ημέρες και 7 ημέρες αντίστοιχα). Τα τρία πρώτα πειράματα έχουν περιγραφεί σε προηγούμενες δημοσιεύσεις [5,6]. Στην παρούσα εργασία θα περιγραφεί το τέταρτο πιλοτικό πείραμα που έγινε στον κόλπο του Ηρακλείου και είχε διαρκέσει 7 ημέρες (20-26 Οκτωβρίου 2018) και στο οποίο δόθηκε η κωδική ονομασία NORTH3.

Αρχικά θα περιγραφούν τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, η περιοχή και η διαδικασία του πειράματος και στη συνέχεια η ανάλυση των δεδομένων που συνελέχθησαν.

## 1. Πειραματική διαδικασία

Οι σκοποί του πειράματος NORTH3 ήταν: Να βαθμονομηθεί ο αυτόνομος υποβρύχιος καταγραφέας UL1, να καταγραφεί ο υποβρύχιος θόρυβος περιβάλλοντος στην περιοχή του πειράματος για περίοδο μίας εβδομάδας και να επαληθευθεί η καλή απόδοση του συστήματος για μεσοπρόθεσμες ποντίσεις, κάτι που είχε ήδη διαπιστωθεί με το πείραμα στην περιοχή της Παλαιόχωρας [6].

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, η περιοχή διεξαγωγής του πειράματος και η πειραματική διαδικασία.

### 1.1 Εξοπλισμός

Το βασικό όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας προγραμματιζόμενος αυτόνομος υποβρύχιος καταγραφέας υποθαλάσσιου θορύβου που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υποβρύχιων Ακουστικών Μετρήσεων του ΙΥΜ/ΙΤΕ. Δόθηκε στο όργανο η κωδική ονομασία UL1 (από το Underwater Listener (Εικόνα 1)) και χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πιλοτικά πειράματα.

Το UL1 αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία: ένα υδρόφωνο χαμηλού θορύβου με ειδικά κατασκευασμένο προενισχυτή, μια κάρτα ήχου, έναν μικροϋπολογιστή, μια κάρτα που παρέχει ρολόι σε πραγματικό χρόνο, μια μπαταρία που παρέχει ισχύ στο σύστημα και ένα υδατοστεγανό κέλυφος που μπορεί να αντέξει πιέσεις έως 24 bar.

Άλλα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος ήταν: Μια ευρυζωνική ηχητική πηγή (Lubell LL9162T) με ενισχυτή και μια φορητή γεννήτρια συνεχούς σήματος (BK-PRESISION 3003) που χρησιμοποιήθηκαν για να βαθμονομηθεί και να υπολογισθεί η ευαισθησία του UL1. Για την βαθμονόμηση του οργάνου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος σύγκρισης και σαν υδρόφωνο αναφοράς ένα χαμηλού θορύβου υδρόφωνο (RESON TC4032) με γνωστή ευαισθησία. Τέλος ένας καταγραφέας πίεσης και θερμοκρασίας (TDR-2050) χρησιμοποιήθηκε για την ανάκτηση του προφίλ της ταχύτητας του ήχου στην περιοχή του πειράματος.

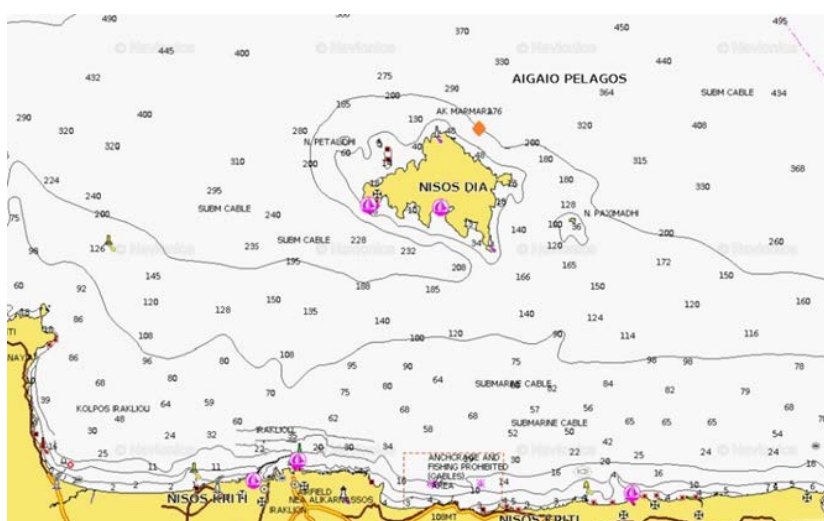


Εικόνα 1. Ο ακουστικός καταγραφέας UL1



### 1.2 Περιοχή του πειράματος

Η περιοχή του πειράματος NORTH3 ήταν βορειοανατολικά της νήσου Ντίας στον κόλπο του Ηρακλείου όπου το βάθος της θάλασσας ήταν 150-200 μέτρα όπως φαίνεται στον χάρτη της Εικ 2. Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε κυρίως για να καταγραφούν δεδομένα από μία περιοχή με διαφορετικά χαρακτηριστικά υποθαλάσσιου θορύβου σε σχέση με αυτή του πειράματος της Παλαιόχωρας ενώ η γειτνίασή της με το λιμάνι του Ηρακλείου απλοποίησε κατά πολύ τις διαδικασίες πόντισης και ανύψυξης του αγκυροβολίου.

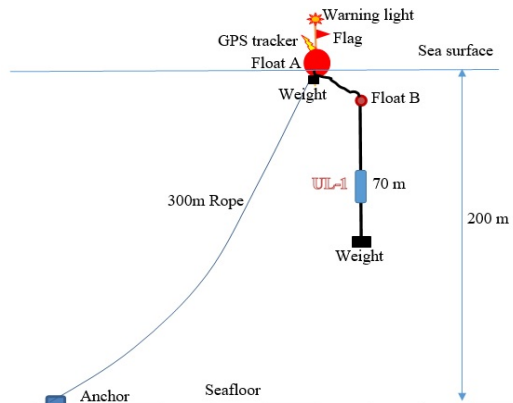


Εικόνα 2. Η περιοχή του πειράματος NORTH3. Η ακριβής θέση της πόντισης σημειώνεται με έναν πορτοκαλί ρόμβο.

### 1.3 Πειραματική διαδικασία

Η αγκυροβόληση των οργάνων φαίνεται στην Εικόνα 3. Μία σημαδούρα (Float A) με κεραία εξοπλισμένη με φανό και σημαία, και με ένα βάρος στο κάτω μέρος της ήταν δεμένη με άγκυρα που ποντίστηκε στον βυθό με 300 μέτρα σκοινί. Η σημαδούρα αυτή ήταν συνδεδεμένη με ένα πλωτήρα (Float B) από τον οποίο ήταν κρεμασμένο το UL1 σε βάθος 70 μέτρων και με ένα βάρος στο τέλος ώστε να ισορροπεί το όργανο κατακόρυφα με τον Float B λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στην επιφανειακή σημαδούρα υπήρχε δέκτης σήματος GPS μέσω του οποίου ήταν δυνατός ο εντοπισμός της σημαδούρας από απόσταση με χρήση δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Την πρώτη ημέρα του πειράματος και πριν την πόντιση της αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκε η πηγή και το υδρόφωνο αναφοράς για την βαθμονόμηση του UL1, με βάση τη διαδικασία που είχε επιλεγεί για όλα τα πειράματα αντίστοιχου τύπου και η οποία έχει περιγραφεί στο [6].



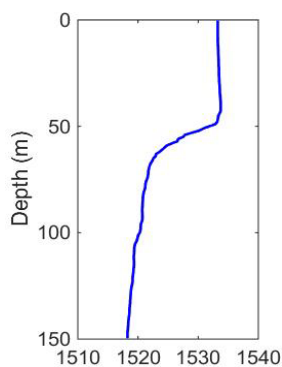
Εικόνα 3. Το αγκυροβόλιο που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος NORTH3.

Επίσης την πρώτη ημέρα του πειράματος, κατά τη διαδικασία πόντισης χρησιμοποιήθηκε το TDR-2050 για τον υπολογισμό του προφίλ της ταχύτητας του ήχου στην περιοχή της πόντισης.

Στην Εικόνα 4 φαίνεται το προφίλ της ταχύτητας του ήχου που είναι ένα τυπικό προφίλ για την περιοχή και το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος.

Μετά την πόντιση του UL1 και την αγκύρωση του το σύστημα παρέμεινε στην θάλασσα για περίπου 7 ημέρες. Η ακριβή θέση της σημαδούρας και η μετακίνηση της παρακολουθούνταν χρησιμοποιώντας το δίκτυο GSM

Στην Εικόνα 5 φαίνεται η θέση της σημαδούρας κατά την διάρκεια του πειράματος,



Εικόνα 4. Το προφίλ της ταχύτητας του ήχου (σε m/s) στην περιοχή του πειράματος.



Εικόνα 5. Η θέση της σημαδούρας κατά την διάρκεια του πειράματος.

Είναι προφανές ότι το σημείο αγκύρωσης βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου που σχηματίζεται από την κίνηση του πλωτήρα λόγω των θαλάσσιων ρευμάτων και του ανέμου. Η κατάσταση της θάλασσας κατά τη διάρκεια αυτών των έξι ημερών παρουσίασε διακυμάνσεις από 2 έως και 7.

Κατά την διάρκεια του πειράματος το UL1 είχε προγραμματισθεί να καταγράφει το περιβαλλοντικό υποβρύχιο θόρυβο για δύομιση λεπτά κάθε δύο ώρες με συχνότητα καταγραφής 96kHz. Η καταγραφή άρχισε στις 14:00, 20 Οκτωβρίου 2018 και ολοκληρώθηκε στις 14:00 26 Οκτωβρίου 2018.

## 2. Ανάλυση δεδομένων καταγραφής

Μετά το τέλος του πειράματος πραγματοποιήθηκε ανάλυση των δεδομένων προκειμένου να υπολογιστεί η ευαισθησία του UL1 και να προσδιορισθούν τα επίπεδα φασματικού θορύβου από τις μετρήσεις του περιβαλλοντικού υποβρύχιου θορύβου.

Από τη βαθμονόμηση κατά τη διάρκεια του πειράματος και των επακόλουθων δοκιμών στο Εργαστήριο η ευαισθησία για το UL1 υπολογίστηκε στα  $-160\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ . Χρησιμοποιώντας τα ακουστικά δεδομένα από τις περιόδους που κατέγραφε το όργανο (2,5 λεπτά κάθε δύο ώρες) και λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω τιμή ευαισθησίας, εκτιμήθηκαν τα επίπεδα θορύβου του ενός τρίτου της οκτάβας (one-third octave band noise levels). Υπήρξαν συνολικά 74 ηχογραφήσεις 2,5 λεπτών από τις 20 Οκτωβρίου 2018 στις 14:00 έως τις 26 Οκτωβρίου 2018 14:00. Στην Εικόνα 6 φαίνονται τα επίπεδα θορύβου στην κεντρική συχνότητα κάθε ζώνης ενός τρίτου της οκτάβας μέχρι και το 1 kHz. Ο άξονας x αυτού του σχήματος δίνει την ημερομηνία και την ώρα. Κάθε 2,5 λεπτά καταγραφής αντιστοιχεί σε μια στήλη στο σχήμα 6. Τις τελευταίες δύο ημέρες επικρατούσε δυνατός άνεμος και η κατάσταση της θάλασσας (sea state) ήταν περίπου 7. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 6 όπου τα επίπεδα θορύβου είναι αυξημένα τις δύο τελευταίες ημέρες ιδιαίτερα στις ψηλές συχνότητες γεγονός που είναι συμβατό με αυξημένο θόρυβο κυματισμού.

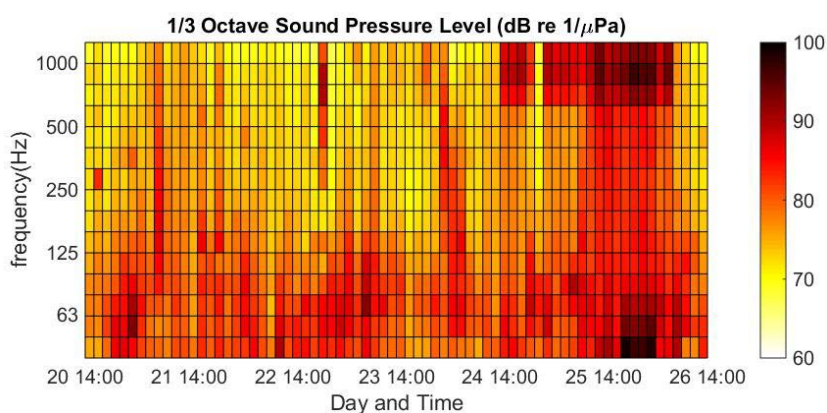
Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η σύγκριση του επιπέδου του θορύβου στα 63 και 125 Hz κατά την διάρκεια του πειράματος. Οι δύο αυτές συχνότητες είναι οι κεντρικές συχνότητες ενδιαφέροντος για τον υποθαλάσσιο ανθρωπογενή θόρυβο για την MSFD. [1],[2]. Οι διακεκομμένες γραμμές με παύλες και διακεκομμένες γραμμές με τελείες αντιπροσωπεύουν τις μέσες και διάμεσες τιμές των δεδομένων αντίστοιχα.

Τέλος στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η συχνότητα κατανομής (ανάλυση ιστογράμματος SPL) για αυτές τις δύο ζώνες 1/3 οκτάβας για ολόκληρη την περίοδο του πειράματος. Φαίνεται ότι η κορυφή της κατανομής ήταν περίπου στα 78 dB για τα 63Hz και στα 84 dB για 125Hz.

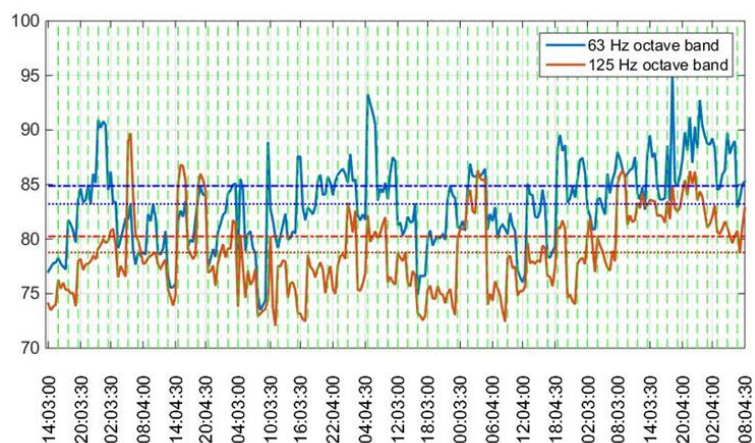
## 3. Σχόλια

Το πιλοτικό πείραμα NORTH3 ολοκληρώθηκε με επιτυχία τον Οκτώβριο του 2018. Ήταν το μεγαλύτερο πιλοτικό πείραμα που είχε προγραμματίσει η ομάδα του IYM στο πλαίσιο του προγράμματος QUIETMED. Ο σχεδιασμός πρόσδεσης και αγκυροβόλησης που χρησιμοποιήθηκε αποδείχθηκε αξιόπιστος, καθώς άντεξε σε

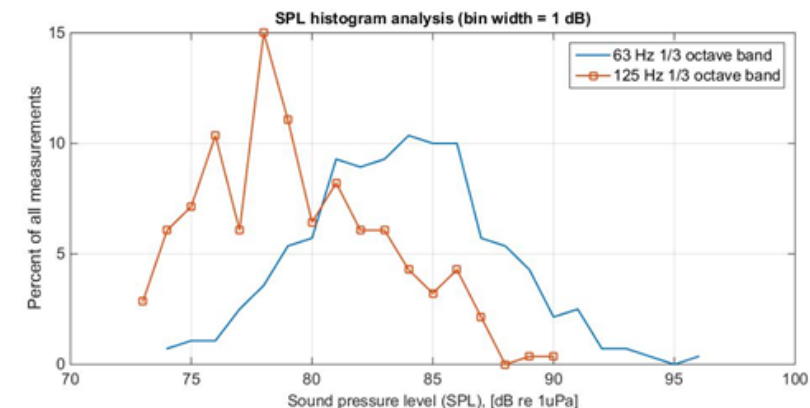
καταστάσεις θάλασσας έως και 7. Η χρήση διαφορετικών υδροφώνων που μπορούν να αναπτυχθούν σε βάθη έως και 200 μέτρα και η χρήση μπαταριών υψηλότερης χωρητικότητας μπορούν να παρατείνουν την περίοδο ανάπτυξης από εβδομάδες σε μήνες για μεγαλύτερης διάρκειας καταγραφή θορύβου περιβάλλοντος, η οποία με τη σειρά της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή στατιστικών χαρακτηριστικών για τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η εμπειρία από τα πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια του προγράμματος QUIETMED οδήγησε στα πλαίσια του προγράμματος AUTOREC, στην κατασκευή καταγραφών με δυνατότητα καταγραφής διάρκειας μηνών σε βάθη έως 150 μέτρων και οι οποίοι χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή από το ΕΛΚΕΘΕ.



Εικόνα 6. Επίπεδα θορύβου σε 1/3 οκτάβας από τα δεδομένα του UL1.



Εικόνα 7. Σύγκριση των επιπέδων ηχητικής πίεσης (SPL) που καταγράφηκαν από το UL1 κατά τη διάρκεια του πειράματος που υπολογίστηκαν στις ζώνες 1/3 οκτάβας στα 63Hz (μπλε) και στα 125Hz (πορτοκαλί).



Εικόνα 8. Η ανάλυση ιστογράμματος SPL για τις δύο ζώνες (ζώνες 63 και 125 Hz, 1/3 οκτάβας) χρησιμοποιώντας δεδομένα μίας εβδομάδας.

#### 4. Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία συγχρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα QUIETMED (<http://www.quietmed-project.eu/>) και το πρόγραμμα AUTOREC («ΥΜΕΠΕΡΑΑ ΟΠΘΣ»).

#### 5. Αναφορές

- [1] DIRECTIVE 2008/56/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 17 June 2008 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0056&from=EN>
- [2] COMMISSION DECISION (EU) 2017/848 of 17 May 2017 [https://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/ComDec/Com\\_dec\\_GES\\_2017\\_848\\_EU.pdf](https://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/ComDec/Com_dec_GES_2017_848_EU.pdf)
- [3] P. Papadakis, G.S Piperakis, E.K. Skarsoulis, and E. Orfanakis, «An autonomous underwater acoustic recorder», *Proceedings of Acoustics 2006*pp 276-2283, (2016) (in Greek)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] P. Papadakis, M. Taroudakis E. Skarsoulis, and G. Piperakis «An experiment for recording ambient noise in deep sea», *Proceedings of Acoustics 2018*, pp. 37-44, (2018) (in Greek).

## **Τεχνικές Ανάκτησης Μουσικής Πληροφορίας για την Παραγωγή Ρυθμικών Μοτίβων Τυμπάνων**

Αλέξανδρος Ηλιάδης Α.Π.Θ. alexilia @ece.auth.gr	Ιορδάνης Θωΐδης Α.Π.Θ. ithoidis @auth.gr	Νικόλαος Βρύζας Α.Π.Θ. nvryzas @jour.auth.gr	Λάζαρος Βρύσης Α.Π.Θ. lvrysis @auth.gr	Χαράλαμπος Δημούλας Α.Π.Θ. babis @eng.auth.gr
---	--	--	--	---

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παραγωγή μοτίβων τυμπάνων αποτελεί ένα μέρος του ευρύτερου ερευνητικού πεδίου της αλγοριθμικής σύνθεσης το οποίο επικεντρώνεται στο μουσικό στοιχείο του ρυθμού. Η σχετική έρευνα προσφέρει διάφορες μεθοδολογίες, ωστόσο υπάρχει έλλειψη προσεγγίσεων που να στηρίζονται σε ηχητικά δεδομένα για να παράγουν ρυθμικές ακολουθίες τυμπάνων. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα παρουσιάζοντας ένα σύστημα που λαμβάνει ένα ακατέργαστο μουσικό απόσπασμα και παράγει συμβολικά μοτίβα τυμπάνων τα οποία είναι ρυθμικά συμβατά με αυτό. Βασικό πυλώνα του προτεινόμενου συστήματος αποτελεί η ανάκτηση του λεγόμενου Σήματος Ισχύος Onset (OSS) και η επεξεργασία του από ένα μοντέλο Seq2Seq. Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω της διεξαγωγής μιας διαδικτυακής έρευνας στην οποία συμμετέχοντες κλήθηκαν να ακούσουν και να βαθμολογήσουν ποιοτικά χαρακτηριστικά ορισμένων ηχητικών δειγμάτων. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων επικύρωσε την αποτελεσματικότητα του συστήματος.*

## **Music Information Retrieval Techniques for Rhythmic Drum Pattern Generation**

### **ABSTRACT**

*Drum pattern generation is a part of the wider research field of algorithmic composition which focuses on the music element of the rhythm. Related research offers various methodologies, however there is a lack of approaches relying on audio data to generate rhythmic drum sequences. The current paper addresses this issue by introducing a system which receives a raw musical excerpt and generates symbolic drum patterns which are rhythmically compatible with it. Core pillar of the proposed system is the retrieval of the so-called Onset Strength Signal (OSS) and its processing by a Seq2Seq model. The system evaluation was carried out by conducting an online survey in which participants were asked to listen to and rate qualitative characteristics of certain audio samples. Statistical analysis of the results validated the effectiveness of the system.*

## Εισαγωγή

Η αλγοριθμική σύνθεση μουσικής αποτελεί ένα αντικείμενο με τεράστιο ενδιαφέρον και πολλαπλές εφαρμογές. Η εκθετική ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος και η υλοποίηση νέων αρχιτεκτονικών νευρωνικών δικτύων έχει δώσει στους υπολογιστές τη δυνατότητα να συνθέτουν μουσική τέτοιας ποιότητας και φυσικότητας ώστε αρκετές φορές να καθίσταται δύσκολη η διάκρισή της από μια ανθρώπινη μουσική δημιουργία. Ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία που απαρτίζουν τη μουσική και καλείται να κατανοήσει ένα σύστημα τεχνητής νοημοσύνης είναι ο ρυθμός. Στη σύγχρονη μουσική το πρωταρχικό ρυθμικό όργανο είναι τα τύμπανα, κοινώς ντραμς, ένα σύνολο από κρουστά όργανα το οποίο αποτελεί τη ραχοκοκαλιά ενός μουσικού συνόλου. Έτσι, δεδομένου του ρόλου που έχουν τα τύμπανα σε μια μουσική εκτέλεση, τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε ένα πολύ συγκεκριμένο κομμάτι του ευρύτερου πεδίου της αλγοριθμικής σύνθεσης, αυτό της αυτόματης παραγωγής ρυθμικών μοτίβων τυμπάνων.

Το πρόβλημα της παραγωγής μοτίβων τυμπάνων αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία κάποια πληροφορία αξιοποιείται για την παραγωγή μιας ακολουθίας συμβολικών δεδομένων. Η μορφή αυτής της πληροφορίας διαφέρει ανάλογα με τη φύση της εκάστοτε επιθυμητής εφαρμογής και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν διανύσματα τυχαίου θορύβου [1]-[2], παράμετροι ελέγχου [1]-[5], ρυθμικές ακολουθίες [4]-[11], συμβολικά δεδομένα [8]-[12] και ηχητικά δεδομένα [12]. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να συνεισφέρει στην περιορισμένη έως τώρα έρευνα για την παραγωγή μοτίβων τυμπάνων με βάση τον ήχο και να παρουσιάσει μια νέα μέθοδο βασισμένη σε τεχνικές Ανάκτησης Μουσικής Πληροφορίας και αξιοποιώντας τα μοντέλα κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή Seq2Seq [13].

### 1. Σχετική Έρευνα

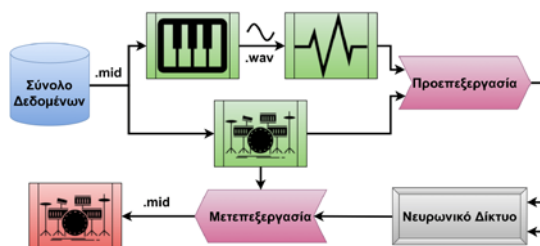
Τη σημαντικότερη συνεισφορά στο πρόβλημα της παραγωγής μοτίβων τυμπάνων με βάση ηχητικά δεδομένα αποτελεί το έργο των Wei et al. [12]. Σε αυτό, οι συγγραφείς αξιοποιούν μια αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή εμπνευσμένη από τα μοντέλα VAE. Το υλοποιημένο σύστημα παράγει μοτίβα τυμπάνων αξιοποιώντας φασματογραφήματα ενός ηχητικού σήματος το οποίο έχει προηγουμένως διαχωριστεί σε μουσικά μέτρα.

Αξιόλογα είναι επίσης τα έργα των Makris et al. [8]-[11] οι οποίοι υλοποιούν αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν δίκτυα FFNN και LSTM, αλλά και μια αρχιτεκτονική κωδικοποιητή-αποκωδικοποιητή εμπνευσμένη από τα μοντέλα Seq2Seq. Με αυτές τις αρχιτεκτονικές προσεγγίζουν το πρόβλημα της παραγωγής μοτίβων τυμπάνων αξιοποιώντας συμβολικά δεδομένα εκτέλεσης κιθάρας και μπάσου, καθώς επίσης και δεδομένα για το tempo, τα μέτρα και την οργάνωση ενός μουσικού κομματιού.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί το έργο των Haki και Jordà [14], οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα μοντέλο Seq2Seq για να υλοπίσουν ένα σύστημα που παράγει συμβολικές μπασογραμμές αξιοποιώντας δεδομένα μοτίβων τυμπάνων. Πρόκειται για την επίλυση ενός προβλήματος που είναι αντίστροφο από αυτό της παρούσας εργασίας, το οποίο ωστόσο επιδεικνύει την ικανότητα των μοντέλων Seq2Seq να μεταφράζουν τα μουσικά μοτίβα ενός οργάνου σε ένα άλλο όργανο.

## 2. Μεθοδολογία και Υλοποίηση

Η γενικότερη διαδικασία που ακολουθείται για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 2.1. Αρχικά, συγκροτείται ένα σύνολο δεδομένων από αρχεία μουσικών κομματιών με πληροφορία MIDI. Για κάθε αρχείο διαχωρίζεται το κανάλι των τυμπάνων από τα κανάλια των υπόλοιπων οργάνων, η πληροφορία των οποίων μετατρέπεται σε ήχο μέσω ηχητικής σύνθεσης. Έτσι προκύπτει ένα αρχείο .wav το οποίο περιέχει τα δεδομένα του ηχητικού σήματος και ένα αρχείο .mid το οποίο περιέχει τα δεδομένα των μοτίβων τυμπάνων καθώς επίσης και όλη την πληροφορία για τη μετρική δομή του μουσικού κομματιού. Τα δεδομένα των δύο αρχείων περνάνε από ένα στάδιο προεπεξεργασίας και τροφοδοτούνται ανά μουσικό μέτρο στο νευρωνικό δίκτυο, το οποίο μαθαίνει να παράγει τα επιθυμητά μοτίβα τυμπάνων βάσει των χαρακτηριστικών που εξάγονται από το σήμα ήχου. Τέλος, η έξοδος του νευρωνικού δικτύου περνάει από ένα στάδιο μετεπεξεργασίας έτσι ώστε να προκύψει το τελικό αρχείο MIDI που περιέχει όλη την πληροφορία των παραγόμενων μοτίβων τυμπάνων.



Σχήμα 2.1 Διαδικασία υλοποίησης του προτεινόμενου συστήματος

### 2.1 Σύνολο Δεδομένων

Για το σύνολο δεδομένων συλλέχθηκαν από το διαδίκτυο αρχεία με συμβολικά δεδομένα 150 κομματιών από τη δισκογραφία του συγκροτήματος Iron Maiden. Για τη διασφάλιση της ποιότητας του συνόλου δεδομένων κάθε αρχείο επιμελήθηκε ξεχωριστά σε λογισμικό επεξεργασίας MIDI αφαιρώντας μέτρα με κακή πληροφορία, καταργώντας αυτοματισμούς που μετέβαλαν το tempo σε ενδιάμεσα σημεία των μέτρων και πραγματοποιώντας γενικότερες διορθώσεις σε θέσεις νοτών, μουσικές αξίες και κλάσματα χρόνου.

### 2.2 Προεπεξεργασία

Το στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τρία υποστάδια, το πρώτο από τα οποία είναι η ανάκτηση της πληροφορίας της μετρικής δομής του μουσικού κομματιού. Αυτή πραγματοποιείται αξιοποιώντας τη συμβολική πληροφορία που περιέχεται στο αρχείο MIDI και έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του μουσικού κομματιού σε μέτρα, όπου κάθε μέτρο χαρακτηρίζεται από ένα κλάσμα χρόνου και μια σταθερή τιμή tempo.



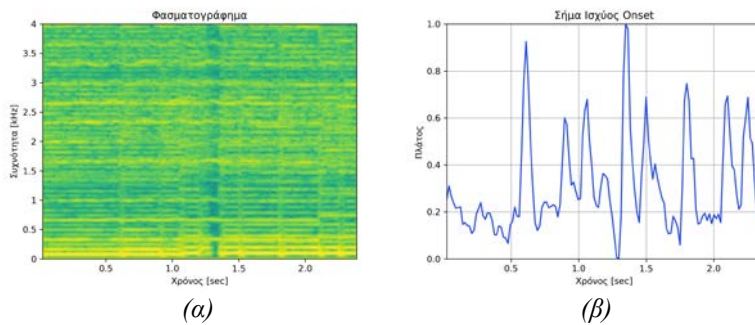
Το δεύτερο υποστάδιο αφορά τη μετατροπή των συμβολικών δεδομένων MIDI των μοτίβων τυμπάνων σε κάποια αναπαράσταση κατάλληλη για χειρισμό από το σύστημα. Αρχικά, επιλέχθηκαν για το σύστημα εννιά κρουστά προς αναπαράσταση τα οποία ήταν η μπότα, το ταμπούρο, τα πατινία crash, ride και hi-hat (σε ανοιχτή και κλειστή θέση) και τρία toms (χαμηλό/μεσαίο/υψηλό). Παράλληλα, επιλέχθηκε ως ελάχιστη μουσική αξία για την υποδιαίρεση των μέτρων σε διακριτές θέσεις νοτών το τρίγχο τριακοστού δευτέρου. Έτσι, για κάθε μέτρο προκύπτει ένας αραιός δυαδικός πίνακας διάστασης  $K \times 9$  όπου οι τιμές 1 και 0 σε κάποιο κελί του αναπαριστούν την ύπαρξη ή απουσία της αντίστοιχης νότας στην αντίστοιχη χρονική στιγμή. Η μεταβλητή  $K$  εξαρτάται από την ελάχιστη επιλεγμένη αξία και το κλάσμα χρόνου του εκάστοτε μέτρου και έτσι για παράδειγμα το μοτίβο τυμπάνων ενός μέτρου  $4/4$  θα αναπαρίσταται από έναν αραιό δυαδικό πίνακα διάστασης  $48 \times 9$ .

Το τρίτο και τελευταίο υποστάδιο αποτελεί η επεξεργασία του ηχητικού σήματος για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών που θα τροφοδοτηθούν στο νευρωνικό δίκτυο. Κατ' αρχάς το ηχητικό σήμα υποδειγματοληπείται στα 8kHz έτσι ώστε να αγνοηθούν οι θορυβώδεις υψηλές συχνότητες που δεν περιέχουν χρήσιμη πληροφορία και να βελτιωθεί σημαντικά η ταχύτητα των υπολογισμών. Στη συνέχεια, το ηχητικό σήμα χωρίζεται σε μουσικά μέτρα αξιοποιώντας την πληροφορία της μετρικής δομής που έχει ανακτηθεί νωρίτερα και για κάθε μέτρο ξεχωριστά υπολογίζεται το αντίστοιχο φασματογράφημα με χρήση του Βραχυπρόθεσμου Μετασχηματισμού Φουριέ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (α). Τα παράθυρα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αυτό είναι τύπου Hanning με επικάλυψη  $2/3$  και το μήκος τους αντιστοιχίζεται στη διάρκεια της ελάχιστης αξίας που έχει επιλεγεί. Η διάρκεια αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής του tempo και έτσι η χρήση παραθύρων μεταβλητού μήκους εξασφαλίζει σταθερή χρονική αναλυτικότητα σε κάθε μέτρο. Τέλος, αθροίζοντας τις θετικές πρώτες διαφορές ως προς τον άξονα της συχνότητας σε κάθε χρονικό σημείο του φασματογραφήματος λαμβάνεται το λεγόμενο Σήμα Ισχύος Onset (Onset Strength Signal - OSS) [15], το οποίο επιπλέον εξομαλύνεται με χρήση φίλτρου κινούμενου μέσου μήκους 3 σημείων.

Το OSS που προκύπτει από το φασματογράφημα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 (β) και αποτελεί το πρώτο και κυριότερο χαρακτηριστικό που αξιοποιείται από το νευρωνικό δίκτυο. Παράλληλα, κατασκευάζονται δύο επιπλέον χαρακτηριστικά που περιέχουν πληροφορία για τη δομή του μουσικού μέτρου, ένα σήμα με μορφή τριγωνικής συνάρτησης που περιγράφει την απόσταση κάθε σημείου του OSS από τη θέση του πλησιέστερου beat και ένα σήμα με μορφή γραμμικής συνάρτησης που περιγράφει τη γενικότερη θέση κάθε σημείου του OSS μέσα στο μέτρο.

### 2.3 Νευρωνικό Δίκτυο

Για το νευρωνικό δίκτυο του προτεινόμενου συστήματος υλοποιήθηκε ένα απλό μοντέλο Seq2Seq. Τόσο ο κωδικοποιητής όσο και ο αποκωδικοποιητής αποτελούνται από ένα αναδρομικό επίπεδο 512 κελιών LSTM με παράμετρο dropout 0.25. Το επίπεδο εξόδου αποτελείται από έναν κόμβο για κάθε ένα από τα εννιά επιμέρους κρουστά όργανα που έχουν επιλεγεί για να συμμετέχουν στα παραγόμενα μοτίβα τυμπάνων. Για συνάρτηση ενεργοποίησης στο επίπεδο εξόδου χρησιμοποιήθηκε η σιγμοειδής (sigmoid), ενώ για συνάρτηση κόστους χρησιμοποιήθηκε η Δυαδική Διασταυρωμένη Εντροπία (Binary Cross-Entropy).



Σχήμα 2.2 (α) Φασματογράφημα σήματος ήχου (β) Σήμα Ισχύος Onset

#### 2.4 Μετεπεξεργασία

Το τελικό στάδιο της μετεπεξεργασίας ξεκινάει με τη στρογγυλοποίηση των πιθανοτήτων που προκύπτουν από την έξοδο του νευρωνικού δικτύου στην κοντινότερη δυαδική τιμή η οποία αναπαριστά την ύπαρξη ή όχι νότας MIDI σε κάποια χρονική στιγμή. Στη συνέχεια, οι δυαδικές αναπαραστάσεις που προκύπτουν φιλτράρονται εισάγοντας λογικούς και φυσικούς περιορισμούς οι οποίοι ενεργοποιούνται στις χρονικές στιγμές όπου υπάρχει παίξιμο πολλών νοτών MIDI και εξασφαλίζουν πως τα παραγόμενα μοτίβα τυμπάνων θα είναι όσο το δυνατόν πιο ανθρώπινα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται αξιοποιώντας την πληροφορία για τη μετρική δομή του μουσικού κομματιού που έχει ανακτηθεί προηγουμένως ώστε η δυαδική αναπαράσταση των παραγόμενων μοτίβων τυμπάνων να μετατραπεί στο τελικό αρχείο MIDI που περιέχει όλη τη συμβολική πληροφορία.

### 3. Αξιολόγηση

Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε αφού το νευρωνικό δίκτυο είχε εκπαιδευτεί για 225 εποχές. Λόγω της φύσης του προβλήματος, η προσέγγιση έγινε με υποκειμενικά κριτήρια και έτσι διεξήχθη μία διαδικτυακή έρευνα στην οποία 45 συμμετέχοντες κλήθηκαν να ακούσουν και να βαθμολογήσουν ηχητικά δείγματα τα οποία προήλθαν από μουσικά κομμάτια που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του συστήματος.

Τα ηχητικά δείγματα που παρουσιάστηκαν στους συμμετέχοντες για βαθμολόγηση ήταν ομαδοποιημένα σε 20 ζεύγη. Κάθε ένα από αυτά τα ζεύγη αποτελούνταν από ένα κοινό μουσικό απόσπασμα το οποίο συνοδευόταν αφενός από μοτίβα τυμπάνων που προέκυψαν από ανθρώπινη μεταγραφή του αυθεντικού μουσικού κομματιού σε MIDI και αφετέρου από μοτίβα τυμπάνων που παρήχθησαν τεχνητά από το σύστημα. Για την αποφυγή μεροληπτικών βαθμολογήσεων η προέλευση των μοτίβων τυμπάνων κάθε δείγματος παρέμεινε κρυφή από τους συμμετέχοντες.

Κατά τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η ύπαρξη στατιστικής σημαντικότητας στη διαφορά των μέσων βαθμολογιών μεταξύ των ανθρώπινων και των τεχνητών δειγμάτων ελέγχεται με το t-test του Welch [16] για επίπεδο σημαντικότητας 5%. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που κλήθηκαν να βαθμολογήσουν οι συμμετέχοντες σε μια γραμμική κλίμακα από το 0 έως το 10 ήταν τα εξής:

- I. *Αισθητική*: πόσο ικανοποιητικό είναι ηχητικά το παίξιμο των τυμπάνων.
- II. *Προσαρμοστικότητα*: πόσο ταιριάζει με τον ρυθμό της μουσικής το παίξιμο των τυμπάνων.
- III. *Δημιουργικότητα*: πόσο ενδιαφέρον, εναλλακτικό ή απρόβλεπτο είναι το παίξιμο των τυμπάνων.
- IV. *Φυσικότητα*: πόσο ανθρώπινο ακούγεται το παίξιμο των τυμπάνων.
- V. *Ομοιότητα*: πόσο μοιάζουν ηχητικά τα δύο δείγματα ενός ζεύγους

Βάσει των δημογραφικών στοιχείων τους οι συμμετέχοντες της έρευνας χωρίστηκαν σε έξι διαφορετικές ομάδες, για κάθε μία από τις οποίες πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι ομάδες αυτές συντελέστηκαν ως εξής:

- 1) Όλοι οι συμμετέχοντες (45/45)
- 2) Όσοι είναι εξοικειωμένοι με τη μουσική των Iron Maiden (29/45)
- 3) Όσοι δεν είναι εξοικειωμένοι με τη μουσική των Iron Maiden (16/45)
- 4) Όσοι ξέρουν να παίζουν τύμπανα (12/45)
- 5) Όσοι ξέρουν να παίζουν κάποιο άλλο όργανο ή έχουν κάποια άλλη μουσική ενασχόληση (23/45)
- 6) Όσοι δεν έχουν καμία μουσική εμπειρία (10/45)

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μέσων βαθμολογιών για τα χαρακτηριστικά των ανθρώπινων και των τεχνητών δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Επιπλέον, ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να προσπαθήσουν να αναγνωρίσουν ποιο από τα δύο δείγματα κάθε ζεύγους ήταν αυτό που παρήχθη τεχνητά από το σύστημα. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα μέσων βαθμολογιών δειγμάτων

	I		II		III		IV		V
	A	T	A	T	A	T	A	T	
1	7.63	<u>7.65</u>	<u>7.96</u>	7.90	7.26	<u>7.60</u>	<u>7.42</u>	7.40	6.26
2	<u>7.45</u>	7.44	<u>7.75</u>	7.68	7.05	<u>7.42</u>	<u>7.17</u>	7.13	5.83
3	7.96	<u>8.00</u>	<u>8.34</u>	8.30	7.64	<u>7.92</u>	7.86	<u>7.89</u>	7.01
4	<u>7.29</u>	7.08	<u>7.79</u>	7.50	6.72	<u>7.18</u>	<u>6.80</u>	6.45	5.24
5	7.72	7.72	<u>8.04</u>	7.95	7.32	<u>7.59</u>	7.51	<u>7.56</u>	6.31
6	7.82	<u>8.14</u>	7.97	<u>8.24</u>	7.78	<u>8.11</u>	7.94	<u>8.18</u>	7.34

(A: Ανθρώπινα δείγματα | T: Τεχνητά δείγματα)  
(Η σκίαση υποδεικνύει στατιστικά σημαντική διαφορά)

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα αναγνώρισης τεχνητών δειγμάτων

	<b>Επιτυχία</b>	<b>Αποτυχία</b>	<b>Αμφιβολία</b>
<b>1</b>	<u>38.78%</u>	38.67%	22.55%
<b>2</b>	<u>43.79%</u>	39.14%	17.07%
<b>3</b>	29.69%	<u>37.81%</u>	32.50%
<b>4</b>	<u>48.75%</u>	37.92%	13.33%
<b>5</b>	37.61%	<u>37.39%</u>	25.00%
<b>6</b>	29.50%	<u>42.50%</u>	28.00%

Αποδεικνύεται επομένως πως όλες οι ομάδες, πλην της ομάδας 3, δείχνουν στατιστικά σημαντική προτίμηση ως προς τη δημιουργικότητα των τεχνητών δειγμάτων, ενώ η ομάδα 6 δείχνει επιπλέον στατιστικά σημαντική προτίμηση ως προς την αισθητική και την προσαρμοστικότητα των τεχνητών δειγμάτων. Επιπλέον, κατά μέσο όρο τα ποσοστά επιτυχίας και αποτυχίας αναγνώρισης των τεχνητών δειγμάτων βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Συνεπώς, μπορεί να δικαιολογηθεί η θεώρηση πως τα παραγόμενα μοτίβα τυμπάνων του συστήματος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με τα αντίστοιχα μοτίβα τυμπάνων που θα έπαιζε ένας άνθρωπος, επικυρώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

#### 4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία αξιολόγησης έδειξαν πως το προτεινόμενο σύστημα είναι ικανό να παράγει μοτίβα τυμπάνων τα οποία είναι αισθητικά ικανοποιητικά και προσαρμόζονται καλά στον ρυθμό της μουσικής, ενώ είναι επίσης ιδιαίτερα δημιουργικά και η φυσικότητα τους βρίσκεται σε ανθρώπινο επίπεδο. Το μουσικό υπόβαθρο των ακροατών φαίνεται πως παίζει σημαντικό ρόλο στην αντίληψη αυτών των χαρακτηριστικών, αλλά αποδείχθηκε πως ακόμα και οι πιο έμπειροι μουσικοί μπορούν να παραπλανηθούν από την ποιότητα των τεχνητών μοτίβων.

Η χρήση του OSS για την παραγωγή μοτίβων τυμπάνων αποτελεί καινοτόμο στοιχείο και μπορεί να αποτελέσει σημαντικό θεμέλιο σε παρόμοιες μελλοντικές προσεγγίσεις, ενώ η ικανότητα του προτεινόμενου συστήματος να παράγει μοτίβα τυμπάνων τα οποία είναι προσαρμοσμένα στη μετρική δομή του μουσικού κομματιού αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να δώσει το έναυσμα για την υλοποίηση παρόμοιων συστημάτων.

Κάποιες από τις μελλοντικές επεκτάσεις που επιδέχεται το σύστημα που παρουσιάστηκε είναι ο περαιτέρω πειραματισμός με τις διάφορες παραμέτρους και την αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου, η εκπαίδευση αυτού με περισσότερα δεδομένα και ιδιαίτερα με δεδομένα τραγουδιών διαφορετικού μουσικού είδους και τέλος, η υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής παραγωγής μοτίβων τυμπάνων με γραφικό περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη.

## 5. Βιβλιογραφία

- [1] N. Tokui «Can GAN Originate New Electronic Dance Music Genres? - Generating Novel Rhythm Patterns Using GAN with Genre Ambiguity Loss» (2020).
- [2] R. Vogl, H. Eghbal-Zadeh, and P. Knees «An Automatic Drum Machine with Touch UI Based on a Generative Neural Network» in *24th International Conference on Intelligent User Interfaces*, pp 91-92 (2019).
- [3] N. Tokui «Towards Democratizing Music Production with AI - Design of Variational Autoencoder-Based Rhythm Generator as a DAW Plugin » (2020).
- [4] F. Bruford, S. McDonald, and M. Sandler «jaki: User-Controllable Generation of Drum Patterns using LSTM Encoder-Decoder and Deep Reinforcement Learning» in *1st Joint Conference on AI Music Creativity*, pp. 212-220 (2020).
- [5] K. Lee, W. Kim, and J. Nam «PocketVAE: A Two-step Model for Groove Generation and Control» (2021).
- [6] P. Hutchings «Talking Drums: Generating Drum Grooves with Neural Networks» in *1st International Workshop on Deep Learning and Music joint with CNN*, pp. 43–47 (2017).
- [7] J. Gillick, A. Roberts, J. Engel, D. Eck, and D. Bamman «Learning to Groove with Inverse Sequence Transformations» in *36th International Conference on Machine Learning*, pp. 2269–2279 (2019).
- [8] D. Makris, M. Kaliakatsos-Papakostas, I. Karydis, and K. L. Kermanidis «Combining LSTM and Feed Forward Neural Networks for Conditional Rhythm Composition» *Engineering Applications of Neural Networks*, **744**, pp. 570–582 (2017).
- [9] D. Makris, M. Kaliakatsos-Papakostas, and K. L. Kermanidis «DeepDrum: An Adaptive Conditional Neural Network for Generating Drum Rhythms» (2018).
- [10] D. Makris, M. Kaliakatsos-Papakostas, I. Karydis, and K. L. Kermanidis «Conditional Neural Sequence Learners for Generating Drums’ Rhythms» *Neural Computing and Applications*, **31**, pp. 1793–1804 (2019).
- [11] D. Makris, G. Zixun, M. Kaliakatsos-Papakostas, and D. Herremans «Conditional Drums Generation using Compound Word Representations» in *11th International Conference on Artificial Intelligence in Music, Sound, Art and Design*, pp. 179–194 (2022).
- [12] I.-C. Wei, C.-W. Wu, and L. Su «Generating Structured Drum Pattern Using Variational Autoencoder and Self-Similarity Matrix» in *20th International Society for Music Information Retrieval Conference*, pp. 847–854 (2019).
- [13] I. Sutskever, O. Vinyals, and Q. V. Le «Sequence to Sequence Learning with Neural Networks» *Advances in Neural Information Processing Systems*, **27** (2014).
- [14] B. Haki and S. Jordà «A Bassline Generation System Based on Sequence-to-Sequence Learning» in *International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 204–209 (2019).
- [15] G. Percival and G. Tzanetakis «Streamlined Tempo Estimation Based on Autocorrelation and Cross-Correlation with Pulses» *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, **22**, pp. 1765–1776 (2014).
- [16] B. L. Welch «The Significance of the Difference Between Two Means when the Population Variances are Unequal» *Biometrika*, **29**, pp. 350–362 (1938).

***Μονάδα Προσομοίωσης Ενισχυτή Ηλεκτρικής Κιθάρας  
Τεχνολογίας Λυχνίας Κενού Βασισμένη Σε MOSFET:  
Συγκριτική Αξιολόγηση Μέσω Ακροάσεων Και Ανάλυσης  
Αντικειμενικών Κριτηρίων***

Γεώργιος Θ.  
Παπαθεοδώρου  
g.papathodorou@uoi.gr

Λουκάς Β.  
Χαδέλλης  
loukas@uop.gr

Γεώργιος Μ.  
Καλλίρης  
gkal@jour.auth.gr

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα κύκλωμα προενισχυτή που βασίζεται στην τεχνολογία Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), το οποίο μιμείται την ποιότητα του ήχου που παράγεται από προ-ενισχυτές λυχνίας κενού σε ενισχυτές ηλεκτρικής κιθάρας. Τα σήματα εξόδου του προενισχυτή αναλύονται και συγκρίνονται με τα σήματα εξόδου που προέρχονται από έναν δημοφιλή combo ενισχυτή κιθάρας λυχνίας υπό τις ίδιες συνθήκες οδήγησης σήματος. Η σύγκριση αποκάλυψε αξιοσημείωτες ομοιότητες όσον αφορά στη ποιότητα της παραγόμενης παραμόρφωσης του ήχου μεταξύ του προενισχυτή MOSFET και του ενισχυτή λυχνίας. Οι δοκιμές ακρόασης που διεξήχθησαν επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και σύγκρισης των σημάτων εξόδου.*

***A MOSFET Based Guitar Pedal Emulator Of A Tube  
Guitar Amplifier: Comparative Evaluation Through  
Listening Tests And Analysis Of Objective Criteria***

**ABSTRACT**

*This paper presents a preamplifier circuit based on Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) technology, which emulates the quality of the sound produced by vacuum tube amplifiers used for electric guitars. The preamplifier output signals are analyzed and compared to output signals coming from a popular combo tube guitar amplifier under the same signal driving conditions. The comparison revealed noticeable similarities as far as overdriven or distorted sound quality is concerned between the MOSFET emulator and the original tube amplifier. The listening tests conducted confirmed the results of the analysis and comparison of the output signals.*

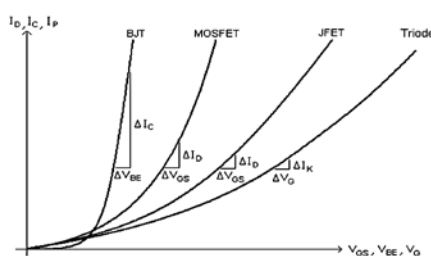
**Εισαγωγή**

Οι ενισχυτές κιθάρας λυχνίας κενού προτιμώνται σε σχέση με τους αντίστοιχους στερεάς κατάστασης, για τον ζεστό - γεμάτο αρμονικές ήχο που παράγουν. Ωστόσο, το υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης, σε συνδυασμό με τις μεγάλες φυσικές διαστάσεις, το σημαντικό βάρος καθώς και τα προβλήματα που εμφανίζουν όταν

απαιτείται η συχνή μετακίνησή τους, καθιστούν τη χρήση τους σχεδόν απαγορευτική για τον περιοδεύοντα μουσικό. Για να καλυφθεί το κενό, παρέχονται συστήματα μοντελοποίησης σε μορφή «πεντάλ» που βασίζονται σε αναλογικά ηλεκτρονικά στερεάς κατάστασης. Τα συστήματα αυτά αποτελούν την πρώτη επιλογή των κιθαριστών για την παραγωγή του ήχου λυχνίας κενού, λόγω της προσιτής τιμής, του μικρού φυσικού μεγέθους και του χαμηλού βάρους, αλλά λόγω και της μη ψηφιοποίησης του σήματος. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες συσκευές αποτελούν εμπορικά προϊόντα, η μέθοδος ανάλυσης και υπολογισμού των τιμών των στοιχείων του κυκλώματος δεν παρέχεται για δημόσια χρήση. Το τελευταίο αποτέλεσε το κίνητρο για την προσπάθεια εξεύρεσης μίας μεθόδου σχεδιασμού μίας μονάδας προσομοίωσης του «ήχου λυχνίας» με χρήση αναλογικών ηλεκτρονικών στερεάς κατάστασης, αλλά και την υλοποίησή της. Το υπόλοιπο της εργασίας είναι διατεταγμένο ως εξής. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική της βασικής μονάδας ενίσχυσης όπως και το προτεινόμενο κύκλωμα (ΠΚ) ήχου. Στη δεύτερη ενότητα περιλαμβάνεται η αξιολόγηση του ΠΚ και στην τρίτη παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

## 1. Αρχιτεκτονική του κυκλώματος

Μια σύγκριση των καμπυλών διαγωγιμότητας  $g_m$  ( $g_m = \Delta I / \Delta V$ ) των BJT, JFET, MOSFET και Τριοδικής λυχνίας (Triode) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Καμπύλες διαγωγιμότητας BJT, MOSFET, JFET and Triode Tube [1]

Για καθεμία από τις καμπύλες, η αλλαγή στην τάση ελέγχου ( $\Delta V$ ) είναι η ίδια, αλλά η προκύπτουσα αλλαγή στο ρεύμα ( $\Delta I$ ) είναι μεγαλύτερη για το BJT και μικρότερη για το MOSFET, το JFET και την Triode Tube, καθιστώντας την λυχνία την πιο γραμμική συσκευή, ακολουθούμενη από τα FET και μετά το BJT. Για το ΠΚ, το BJT καθίσταται ακατάλληλο αφενός γιατί είναι εξαιρετικά μη γραμμικό, ενώ αφετέρου, σε αντίθεση με την λυχνία, είναι συσκευή οδηγούμενη από ρεύμα. Όσον αφορά το JFET, είναι σαφώς η καταλληλότερη συσκευή για την προβλεπόμενη χρήση, λόγω των λειτουργικών ομοιοτήτων που παρουσιάζει με την λυχνία [1]. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πολυάριθμα σχέδια κυκλωμάτων προσομοίωσης της λυχνίας με αυτό, πράγμα που αποτέλεσε τον κύριο λόγο αποκλεισμού του. Το MOSFET, χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές διακοπτικών κυκλωμάτων καθώς και σε ενισχυτές ισχύος. Ωστόσο, ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του, όπως η οδήγησή του από τάση, η υψηλή του διαθεσιμότητα και το χαμηλό του κόστος (σε σύγκριση με τα αντίστοιχα - Tube, JFET), καθώς και η βούλησή μας να

πειραματιστούμε με τη χρήση του σε ενισχυτές μικρού σήματος, μας οδήγησαν στο να το χρησιμοποιήσουμε ως τη συσκευή ενίσχυσης για το ΠΚ. Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού εφαρμόστηκαν πρακτικές μέθοδοι, οι οποίες ωστόσο προτείνονται στη βιβλιογραφία, ενώ οι σχεδιαστικές αρχές που ακολουθήθηκαν βασίστηκαν σε αυτές ενός ευρέως γνωστού ενισχυτή λυχνίας, του Fender Blues Junior IV (FBJIV). Το τελευταίο έγινε ώστε να καταστεί αποτελεσματικότερη η διαδικασία αξιολόγησης μέσω συγκρίσεων των παραγόμενων σημάτων όπως και της χροιάς του ήχου.

### *1.1 Βασική μονάδα ενίσχυσης*

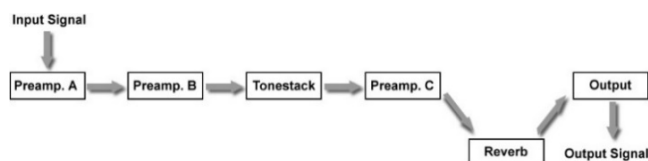
Η βασική μονάδα ενίσχυσης σχεδιάστηκε ως ενισχυτής τάξης Α. Η τοπολογία κοινής πηγής (CS) επιλέχθηκε για την πόλωση του τρανζίστορ, χρησιμοποιώντας έναν διαιρέτη τάσης για την DC πόλωση της πύλης. Για την τροφοδοσία του κυκλώματος (VDD) χρησιμοποιούνται 9 Volts DC ενώ το σημείο λειτουργίας (σημείο Q) του τρανζίστορ ορίστηκε να βρίσκεται στο μέσο της γραμμής φόρτου. Ο υπολογισμός των τιμών των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται για την πόλωση της πύλης γίνεται σύμφωνα με το [3], ενώ σύμφωνα με το [4], η τάση στην εκροή πρέπει να είναι περίπου ίση με το μισό της τάσης τροφοδοσίας και η τιμή της αντίστασης πηγής (RS) επιλέγεται ώστε να δημιουργείται πτώση τάσης VRS ίση με  $1/10 * VDD$ . Όσον αφορά τον υπολογισμό των πυκνωτών ζεύξης μεταξύ των σταδίων, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο Thevenin. Η RTHEV είναι ίση με την αντίσταση εισόδου RIN ( $RTHEV = RIN$ ) του σταδίου που ακολουθεί. Η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή ζεύξης επιλέγεται έτσι ώστε σε σύγκριση με την αντίσταση Thevenin (RTHEV), να θεωρείται βραχυκύκλωμα. Με βάση εμπειρικό κανόνα, αυτό συμβαίνει όταν η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή είναι μικρότερη ή ίση με το ένα δέκατο του RTHEV [4].

### *1.2 Τοπολογία κυκλώματος*

Η βασική μονάδα ενίσχυσης χρησιμοποιείται για το σχηματισμό ενός cascade ενισχυτή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, το σύστημα αποτελείται από έξι στάδια (Preamp - A, B, Tonestack, Preamp C, Reverb και Output) συνδεδεμένα σε σειρά. Preamp. A: Το στάδιο εισόδου χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του ασθενούς σήματος εισόδου χωρίς να το παραμορφώνει. Preamp. B: Το στάδιο όπου, όταν υπερτροφοδοτείται, δημιουργείται παραμόρφωση τύπου λυχνίας. Το σήμα εισέρχεται μέσω ενός ποτενσιόμετρου (VOLUME) το οποίο προσαρμόζει το πλάτος της τάσης του. Tonestack: Το στάδιο παθητικού φίλτρου. Preamp. C: Στάδιο ενίσχυσης του σήματος χωρίς δημιουργία παραμόρφωσης. Reverb: Ψηφιακό κύκλωμα που προσομοιώνει τη λειτουργία αντήχησης ελατηρίου (spring reverb). Output: Στάδιο εξόδου υλοποιημένο ως ακόλουθος πηγής χωρίς να ενισχύει το σήμα. Χρησιμοποιείται ως κύκλωμα προσαρμογής της αντίστασης εξόδου. Όπως προαναφέρθηκε, η παραγωγή της επιθυμητής παραμόρφωσης πραγματοποιείται στο στάδιο Preamp B, όταν αυτό υπερροδοτείται. Για την δημιουργία της παραμόρφωσης και συνεπώς την παραγωγή κατάλληλων αρμονικών στην έξοδο απαιτείται μετατόπιση της θέσης του σημείου λειτουργίας (σημείο Q) του τρανζίστορ. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη πυκνωτή παράκαμψης της αντίστασης πηγής (RS) του τρανζίστορ, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό το κέρδος του σταδίου και οδηγώντας



το σε μη γραμμικές περιοχές λειτουργίας. Επιπλέον, ο συνδυασμός των δύο στοιχείων (αντίσταση πηγής, πυκνωτής παράκαμψης) ορίζει ένα παθητικό φίλτρο πρώτης τάξης που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα τονικά χαρακτηριστικά του ΠΚ. Η επιλογή των ακριβών τιμών των στοιχείων αυτών πραγματοποιήθηκε μετά από δοκιμές μέσω επαναληπτικής διαδικασίας σύγκρισης των παραγόμενων από το ΠΚ και τον FBIV κυματομορφών και προσπάθειας ταύτισής τους.

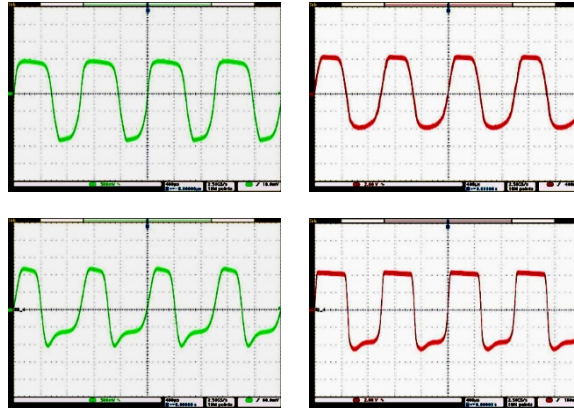


Σχήμα 1.2 Στάδια του κυκλώματος και η διαδρομή του σήματος [2]

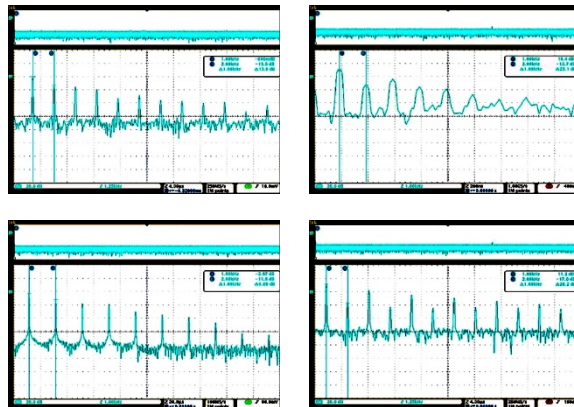
## 2. Αξιολόγηση

### 2.1 Αξιολόγηση μέσω σύγκρισης κυματομορφών και φασμάτων εξόδου

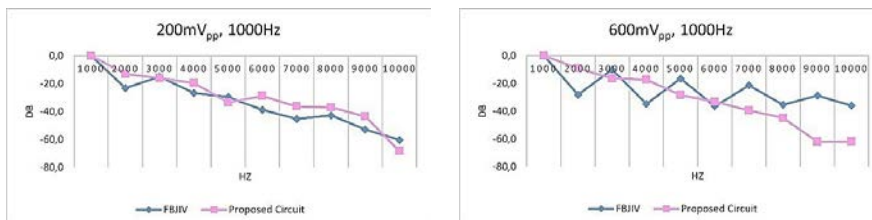
Ημιτονοειδές σήμα πλάτους 100mVpp, 200mVpp και 600mVpp σε συχνότητες 100Hz, 600Hz και 1000Hz χρησιμοποιείται ως σήμα εισόδου. Αρχικά, οι κυματομορφές εξόδου καταγράφονται και συγκρίνονται οπτικά, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού των σημαντικών ομοιοτήτων, αλλά και των διαφορών. Για εξοικονόμηση χώρου, μόνο οι κυματομορφές εξόδου, τα αντίστοιχα φάσματα τους και γραφήματα κανονικοποιημένων αρμονικών για σήμα εισόδου 200mVpp και 600mVpp και συχνότητα 1000Hz επιλέχθηκαν για να παρουσιαστούν. Για πλάτος σήματος εισόδου 100 mVpp και όλες τις συχνότητες, και οι δύο συσκευές παραμορφώνουν ελαφρά χωρίς να ψαλιδίζουν το σήμα, παρουσιάζοντας σχεδόν γραμμική συμπεριφορά. Για πλάτος σήματος εισόδου 200 mVpp και συχνότητα 100 Hz, οι κυματομορφές είναι πανομοιότυπες. Λόγο αυτού, τα γραφήματα αυτά δεν παρουσιάζονται εδώ. Για πλάτος σήματος εισόδου 200 mVpp και συχνότητες 600 Hz και 1000 Hz, εντοπίζονται διαφορές κυρίως στις θετικές κορυφές των κυματομορφών (Σχήμα 2.1, 1η σειρά). Ειδικότερα, η κυματομορφή από τον ενισχυτή (Σχήμα 2.1, 1η σειρά - δεξιά στήλη) παρουσιάζει σχεδόν σκληρό ψαλιδισμό, παρόμοιο με αυτόν από τρανζίστορ όταν υπεροδηγείται, ενώ η κυματομορφή που παράγεται από το ΠΚ (Σχήμα 2.1, 1η σειρά - αριστερή στήλη) φαίνεται να είναι μαλακά ψαλιδισμένη, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που θα γινόταν από έναν ενισχυτή λυχνίας κενού. Λόγω αυτής της ασυμμετρίας – Σχήμα 2.3, (αριστερό γράφημα: 200mVpp,1000Hz) οι καμπύλες δεν ταιριάζουν στη σημαντική δεύτερη αρμονική (2000Hz), με το ΠΚ να υπερέχει σε αυτό το σημείο με μια 2η αρμονική περίπου 10,1dB υψηλότερη από αυτή που παράγεται από τον FBIV. Οι ίδιες υψηλές τιμές εμφανίζονται στην εύηχη 3η (3000Hz), ενώ στην απόλυτα εύηχη 4η (4000Hz) αρμονική [5] ο ενισχυτής υστερεί σε σχέση με το ΠΚ κατά περίπου 7,1dB. Στην 5η (5000Hz) παρατηρείται σχετική ταύτιση και από αυτό το σημείο μέχρι τη 10η (10000Hz) οι καμπύλες κινούνται περίπου παράλληλα με την 6η και την 8η αρμονική του ΠΚ να υπερτερούν αυτών που παράγονται είναι τον FBIV κατά 10 και 5,8 dB αντίστοιχα.



Σχήμα 2.1 Κυματομορφές εξόδου: Σήμα εισόδου: 200mVpp (1η σειρά), 600mVpp (2η σειρά) @ 1000Hz. Αριστερά: το ΠΚ, δεξιά: FBIV



Σχήμα 2.2 Ανάλυση FFT εξόδου: Σήμα εισόδου: 200mVpp (1η σειρά), 600mVpp (2η σειρά) @ 1000Hz. Αριστερά: το ΠΚ, δεξιά: FBIV



Σχήμα 2.3 Κανονικοποιημένες τιμές αρμονικών στοιχείων για σήμα εισόδου 200mVpp (αριστερά) και 600mVpp (δεξιά) συχνότητας 1000Hz

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι για ένα σήμα εισόδου 200 mVpp το ΠΚ αποδίδει τον «ήχο λυχνίας», καθώς όλες οι κρίσιμες αρμονικές (οι 2η, 3η και η 4η) είναι παρούσες και παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι κυματομορφές και τα γραφήματα για σήμα εισόδου πλάτους 600mVpp. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις σχετικά με την κυματομορφή στο Σχήμα 2.1 (2η σειρά) ισχύουν και για τις άλλες κυματομορφές (100Hz και 600Hz), που δεν παρουσιάζονται εδώ. Η κυματομορφή από τον FBIV (Σχήμα 2.1, 2η σειρά - δεξιά) είναι συμμετρικά και έντονα κομμένη με αποτέλεσμα την παραγωγή περιττών αρμονικών, ενώ η κυματομορφή από το ΠΚ (Σχήμα 2.1, 2η σειρά - αριστερή) παρουσιάζει ασυμμετρία μεταξύ των θετικών και αρνητικών κορυφών, ενώ δεν υπάρχει ψαλιδισμός, κάτι που οδηγεί στην παραγωγή άρτιων αρμονικών - Σχήμα 2.3 δεξιά: 600mVpp, 1000Hz. Όσον αφορά τις καμπύλες του ΠΚ, η 2η και η 4η αρμονική υπερβαίνουν τις αντίστοιχες 2η και 4η αρμονική του FBIV κατά περισσότερο από 17 dB ενώ η 3η και η 5η καταστέλλονται κατά 6 έως 12 dB. Τα περισσότερα 2η και 4η αρμονικά στοιχεία του FBIV εμφανίζονται σε χαμηλότερες τιμές ενώ τα περιττά ενισχύονται. Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή και εμφανίζεται όταν το σήμα εισόδου υψηλού πλάτους εφαρμόζεται σε έναν ενισχυτή λυχνίας κενού [6].

## 2.2 Αξιολόγηση μέσω τεστ ακρόασης ηχητικών αποσπασμάτων

Η επιτυχής εξομοίωση του ήχου λυχνίας φαίνεται να επιβεβαιώνεται από την αξιολόγηση μέσω τεστ ακρόασης που διεξήχθησαν και στις οποίες έλαβαν μέρος 14 έμπειροι κιθαρίστες και μηχανικοί ήχου. Πραγματοποιήθηκε ηχογράφηση δύο αποσπασμάτων, ένα με μελωδικό περιεχόμενο και ένα με ρυθμικό. Σε κάθε απόσπασμα το περιεχόμενο εκτελέστηκε σε τρεις διαφορετικές περιοχές της ταστιέρας, κοντά στα κλειδιά, κοντά στο 12ο τάστο και κοντά στη βάση του λαιμού, σε τρία διαφορετικά επίπεδα έντασης χτυπήματος των χορδών, ελαφρύ, μεσαίο και σκληρό. Τα αποσπάσματα που καταγράφηκαν χρησιμοποιήθηκαν ως σήμα εισόδου σε τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς (Σ) ενισχυτή – ΠΚ. Σ1: Σήμα εισόδου στον FBIV. Σ2: Στην κύρια είσοδο του ενισχυτή Marshall DSL40C (MDSL40C) μέσω του ΠΚ. Σ3: Στην είσοδο RETURN του MDSL40C, μέσω του ΠΚ. Για καθένα από τους παραπάνω συνδυασμούς πραγματοποιήθηκε ηχογράφηση, προκειμένου να παραχθούν τα τελικά ηχητικά αποσπάσματα που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία αξιολόγησης. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα ηχητικά αποσπάσματα με τα αντίστοιχα διακριτικά (A,B,REF,G,H,I,J) και τις ρυθμίσεις των ενισχυτών BIV και MDSL40C και του ΠΚ που χρησιμοποιούνται κατά τις ηχογραφήσεις.

Πίνακας 2.1 Τα ηχητικά αποσπάσματα με τα αντίστοιχα διακριτικά και τις ρυθμίσεις των ενισχυτών FBIV και MDSL40C καθώς και του ΠΚ

Ρυθμίσεις FBIV, MDSL40C, ΠΚ: Bass, Middle, Treble = 50%, Master = 25%, Reverb = OFF, <b>Volume = 50%</b>	
A	Μελωδικό με τον FBIV. Το σήμα απευθείας στην είσοδο
B	Μελωδικό με τον MDSL40C. Το σήμα στην RETURN μέσω του ΠΚ
REF	Μελωδικό με το MDSL40C. Το σήμα απευθείας στην κύρια είσοδο
Ρυθμίσεις BIV, MDSL40C, ΠΚ: Bass, Middle, Treble = 50%, Master = 25%, Reverb = OFF, <b>Volume = 100%</b>	

G	Μελωδικό με τον FBIV. Το σήμα απευθείας στην κύρια είσοδο
H	Μελωδικό με τον MDL40C. Το σήμα στην RETURN μέσω του ΠΚ
I	Ρυθμικό με τον FBIV. Το σήμα απευθείας στην κύρια είσοδο
J	Ρυθμικό με τον MDL40C. Το σήμα στην RETURN μέσω του ΠΚ

Οι συμμετέχοντες, δίχως να έχουν καμία πληροφόρηση σχετικά με την προέλευση των αποσπασμάτων, απάντησαν σε ερωτήσεις σχετικά με την ομοιότητα των ηχητικών αποσπασμάτων καθώς και σε ερωτήσεις που εξετάζουν την αντίληψη των ακροατών για τον λεγόμενο «ήχο λυχνίας». **Πόσο μοιάζουν το Α και το Β;** Η πλειοψηφία των ακροατών (10 ακροατές) δήλωσε ότι τα αποσπάσματα ακούγονται πολύ όμοια ή απολύτως όμοια, ενώ οι υπόλοιποι δεν εξέφρασαν ξεκάθαρη άποψη. Είναι προφανές ότι οι ακροατές δεν παρατήρησαν ιδιαίτερες διαφορές στον τόνο του ήχου που προέρχεται από τον FBIV και το ΠΚ συνδεδεμένο στην RETURN είσοδο του MDL40C. **Ποιο απόσπασμα έχει ηχογραφηθεί σε ενισχυτή κιθάρας με προενισχυτή λυχνίας;** Με αυτήν την ερώτηση εξετάζεται η αντίληψη των ακροατών για τον λεγόμενο «ήχο λυχνίας» καθώς και αν το απόσπασμα Β προσομοιώνει αυτόν τον ήχο. Έξι ακροατές επέλεξαν τα REF και Α που αντιστοιχούν σε εγγραφές που έγιναν με το σήμα εισόδου να διέρχεται από τον προενισχυτή των MDL40C και BIV αντίστοιχα. Ένα ενδιαφέρον γεγονός είναι ότι επτά ακροατές δήλωσαν ότι το απόσπασμα Β ηχογραφήθηκε σε έναν ενισχυτή με έναν προενισχυτή λυχνίας κενού. Το τελευταίο δείχνει ότι η χροιά του ήχου που παράγεται από το ΠΚ προσομοιώνει τη χροιά που παράγεται από λυχνία κενού. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτό το ερωτηματολόγιο οι συμμετέχοντες είχαν την ευκαιρία να επιλέξουν καμία, μία ή περισσότερες από μία απαντήσεις. **Τα Ι και J ακούγονται το ίδιο:** Δέκα ακροατές δήλωσαν ότι τα Ι και J δεν ακούγονται ίδια. Το τελευταίο ενισχύεται από το γεγονός ότι κανένας ακροατής δεν συμφώνησε έντονα με την άποψη ότι τα αποσπάσματα ακούγονται το ίδιο. Είναι σαφές ότι οι ακροατές αναγνώρισαν τον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο ψαλιδίζεται το σήμα στον FBIV και το ΠΚ όταν εφαρμόζεται σήμα μεγάλου πλάτους. **Το Ι προέρχεται από κύκλωμα τεχνολογίας τρανζίστορ:** Η γνώμη των ακροατών που καταγράφηκε δείχνει αβεβαιότητα. Τρεις διαφώνησαν, 8 δεν συμφώνησαν αλλά ούτε διαφώνησαν και τρεις συμφώνησαν. Είναι προφανές ότι για υψηλές τιμές σήματος, ο FBIV ψαλιδίζει σκληρά το σήμα, όπως θα έκανε ένας ενισχυτής τρανζίστορ. **Το J προέρχεται από προενισχυτή τεχνολογίας λυχνίας κενού:** Μόνο τέσσερις ακροατές διαφωνούν με την άποψη αυτή, αναγνωρίζοντας ότι το J προέρχεται από το ΠΚ. **Τα G και H ακούγονται όμοια:** Εννέα συμμετέχοντες δεν συμφώνησαν με την άποψη, ενώ μόνο τέσσερις συμφώνησαν με την άποψη ότι ακούγονται όμοια. Ο λόγος για αυτό είναι ο διαφορετικός τρόπος ψαλιδισμού που εφαρμόζεται από τις δύο συσκευές (FBIV, ΠΚ), για σήμα εισόδου μεγάλου πλάτους. **Το Η προέρχεται από κύκλωμα τεχνολογίας τρανζίστορ:** Αποκαλύπτεται ότι η πλειοψηφία των ακροατών (8 άτομα) δεν έχουν σχηματίσει σαφή εικόνα της προέλευσης του αποσπάσματος, το οποίο ηχογραφήθηκε με τη χρήση του ΠΚ. Επιπλέον, τέσσερις συμμετέχοντες διαφωνούν ή διαφωνούν ισχυρά με την άποψη ότι το απόσπασμα Η διαμορφώνεται από ένα κύκλωμα τρανζίστορ, ενώ επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι κανείς δεν συμφωνεί έντονα με αυτήν την άποψη. Αυτό δείχνει ότι για σήμα μεγάλου πλάτους το ΠΚ ψαλιδίζει με τρόπο που θα αναμενόταν από κύκλωμα λυχνίας κενού. **Το G προέρχεται από κύκλωμα τεχνολογίας λυχνίας κενού:** Η ερώτηση σχετικά με την προέλευση του αποσπάσματος G διερευνά τον

τρόπο με τον οποίο ο ενισχυτής FBJIV ψαλιδίζει για σήμα εισόδου μεγάλου πλάτους. Η επικρατούσα άποψη κινείται στην περιοχή από την αβεβαιότητα έως την έντονη διαφωνία. Μόνο τρεις συμμετέχοντες συμφώνησαν, διακρίνοντας τον ήχο της λυχνίας, ενώ κανένας δεν συμφώνησε απόλυτα με τον ισχυρισμό ότι το G προέρχεται από ένα κύκλωμα λυχνίας κενού.

### 3. Συμπεράσματα

Η διαδικασία αξιολόγησης οδήγησε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Το ΠΚ στις περισσότερες περιπτώσεις συμπεριφέρεται παρόμοια με έναν ενισχυτή λυχνίας. Για χαμηλό και μεσαίο σήμα εισόδου, οι παραγόμενες κυματομορφές και τα αντίστοιχα φάσματα δείχνουν ότι η παραμόρφωση που παράγεται από τις δύο συσκευές (FBJIV, ΠΚ) παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες. Ωστόσο, σε μια συγκεκριμένη περίπτωση το ΠΚ καταφέρνει να ξεπεράσει την συμπεριφορά του ενισχυτή στην παραγωγή και κυριαρχία άρτιων αρμονικών. Όταν εφαρμόζονται σήματα εισόδου μεγάλου πλάτους, η φασματική ανάλυση δείχνει ότι το ΠΚ συνεχίζει να ψαλιδίζει μαλακά το σήμα, με τρόπο που θα αναμενόταν από μία λυχνία κενού, ενώ αντίθετα ο ενισχυτής FBJIV παράγει σκληρό ψαλιδισμό παρόμοιο με αυτό που παράγεται από έναν ενισχυτή τρανζίστορ όταν αυτός υπεροδηγείται. Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από την αξιολόγηση μέσω τεστ ακρόασης. Οι απαντήσεις των ακροατών στις ερωτήσεις που τέθηκαν μέσω των ερωτηματολογίων δείχνουν αφενός ότι η πιστότητα του «ήχου λυχνίας» που προέρχεται από το ΠΚ είναι πολύ υψηλή, όταν εφαρμόζεται σήμα εισόδου μετρίου πλάτους. Όταν εφαρμόζεται σήμα εισόδου μεγάλου πλάτους, ο παραγόμενος ψαλιδισμός από τον FBJIV θα αναμενόταν από ένα κύκλωμα τεχνολογίας τρανζίστορ, ενώ αντίθετα ο ψαλιδισμός που παράγεται από το ΠΚ προσομοιώνει σε αυτόν που παράγεται από κύκλωμα τεχνολογίας λυχνίας κενού. Δοκιμαστικά αποσπάσματα διαθέσιμα για ακρόαση βρίσκονται στη διεύθυνση: <https://drive.google.com/drive/folders/1jlHam2zvp0zq0cKgUwUTQADYh82fEger?usp=sharing>

### 4. Αναφορές

- [1] Dailey, Denton J. 2013. Electronics for Guitarists, 2nd Ed. Springer. p. 163. ISBN 1461440874.
- [2] Papatheodorou, G. 2021. Study, design, construction, and evaluation of an analog electric guitar tube amplifier simulation unit, <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/52980>
- [3] Boylestad, L. Robert, Nashelsky Louis. 2013. Electronic Devices and Circuit Theory, 11th Ed. Prentice Hall. p. 434. ISBN 9780132622264
- [4] Globig, J., 2015. A practical approach to designing MOSFET amps for a specific gain. In Proceedings of the 122 ASEE Annual Conference and Exposition, Seattle, WA, USA, pp. 26.84.1 - 14.
- [5] Hadellis, L. 2010. Sound Technology: Principles of Acoustics & Psychoacoustics, Sound & Analog Electronics, Digital Audio. Arakynthos University Publications
- [6] Keeports, D. 2017. The warm, rich sound of valve guitar amplifiers. Physics Education, 52(2), 025010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa57b7>

## **Συνολική Προτίμηση για Αμφιωτικά Ηχογραφημένα Ηχητικά Σήματα Μουσικής**

Μοιράγιας Γεώργιος  
Υποψήφιος  
Διδάκτορας  
ece7846@upnet.gr

Οικονόμου Κωνσταντίζα  
Προπτυχιακή Φοιτήτρια  
up1059422@upnet.gr

Μουρτζόπουλος Ιωάννης  
Καθηγητής  
mourjop@upatras.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Σκοπός της εργασίας είναι να ερευνηθεί η επίδραση τριών διαφορετικών χωρικών συστημάτων ηχητικής αναπαραγωγής (μονοφωνικό, στερεοφωνικό και πολυκαναλικό) στην αντιληπτική παράμετρο της ηχητικής εμπύθισης, στην ολική εμπειρία ακρόασης και στη συναισθηματική διέγερση των ακροατών. Πραγματοποιήθηκε πείραμα ακρόασης που ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να αξιολογήσουν αυτές τις παραμέτρους κατά την ακρόαση αμφιωτικά ηχογραφημένων κομματιών. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ηχητική εμπύθιση αμφιωτικά ηχογραφημένων μουσικών σημάτων μπορεί να μοντελοποιηθεί επαρκώς με το γραμμικό συνδυασμό απλών αμφιωτικών χαρακτηριστικών. Επίσης, υλοποιείται γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης (ΟΕΑ) που μελετά το βαθμό που οι αντιληπτικοί, γνωστικοί και συναισθηματικοί παράγοντες επηρεάζουν τη συνολική προτίμηση των ακροατών. Προκύπτει ότι η προτίμηση για το περιεχόμενο της μουσικής είναι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο την ΟΕΑ, ενώ σε μικρότερο βαθμό εξαρτάται από την χωρική ηχητική ποιότητα. Η συναισθηματική διέγερση των ακροατών δε βρέθηκε να σχετίζεται γραμμικά με την ΟΕΑ.*

### ***Overall listening experience for binaurally recorded music signals***

#### **ABSTRACT**

*The aim of the paper is to investigate the effect of three different spatial sound reproduction systems (mono, stereo and surround) on the perceptual parameter of envelopment, overall listening experience and emotional arousal of listeners. A listening experiment was conducted that asked participants to evaluate these parameters while listening to binaurally recorded music pieces. The results indicate that the envelopment of binaurally recorded musical signals can be adequately modelled adequately by the linear combination of binaural features. A linear model of the Overall Listening Experience (OLE) is also implemented that examines the extent to which perceptual, cognitive and affective factors influence the overall preference of listeners. It was found that the preference for music content dominates on OLE formation, while spatial sound quality affects OLE to a lesser extent. Emotional arousal was not found to be linearly related with OLE.*

## Εισαγωγή

Η αξιολόγηση της ποιότητας ηχητικών σημάτων/συστημάτων με βάση αντιληπτικές παραμέτρους ξεκίνησε με την ανάπτυξη των πρώτων αλγορίθμων συμπίεσης δεδομένων ήχου [1, 2, 3]. Αργότερα, αναπτύχθηκαν υψηλότερου επιπέδου μοντέλα πρόβλεψης της ηχητικής ποιότητας, βασισμένα σε αμφιωτικά μοντέλα ακρόασης, τα οποία λειτουργούν λαμβάνοντας υπόψην τόσο αντιληπτικούς όσο και γνωστικούς παράγοντες [4, 5]. Ένας πιο γενικός όρος να περιγραφούν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την προτίμηση, ειδικά κατά την ακρόαση ηχογραφημένης μουσικής, προτάθηκε από τους Schoeffler και Herre [6], οι οποίοι εισήγαγαν τον όρο Overall Listening Experience (Ολική Εμπειρία Ακρόασης). Κατά την αξιολόγηση της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης (ΟΕΑ) ζητείται από τους ακροατές να λάβουν υπόψην τους όλους εκείνους τους παράγοντες που επηρεάζουν την προτίμησή τους, σαν να βρίσκονταν σε πραγματικές συνθήκες ακρόασης. Σε πειράματα αξιολόγησης της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης σε αποσπάσματα μουσικών κομματιών με διαφορετικά επίπεδα υποβάθμισης εύρους ζώνης, βρέθηκε πως η προτίμηση για το περιεχόμενο των μουσικών κομματιών επηρεάζει κυρίως την ΟΕΑ και σε μικρότερο βαθμό οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη μείωση του εύρους ζώνης. Η μεγάλη εξάρτηση της ΟΕΑ από την προτίμηση του κάθε ακροατή για την μουσική αυτή κάθε αυτή των κομματιών, επιβεβαιώθηκε και από μεταγενέστερες έρευνες για διαφορετικά συστήματα ηχητικής αναπαραγωγής, π.χ. μονο/πολυ-καναλικά συστήματα [7], urmix και downmix αλγορίθμους [8] και τρισδιάστατα ηχητικά συστήματα [9].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση ενός αρχικού απλού μοντέλου για την πρόβλεψη της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης για αμφιωτικά ηχογραφημένα αποσπάσματα μουσικών κομματιών τα οποία έχουν αναπαραχθεί σε τρία διαφορετικά ηχητικά συστήματα: μονοφωνικά (Mono), στερεοφωνικά (Stereo) και πολυκαναλικά (Surround 5.0). Η Ολική Εμπειρία Ακρόασης εξαρτάται από γνωστικούς, αντιληπτικούς και συναισθηματικούς παράγοντες. Οι γνωστικοί παράγοντες αντιστοιχούν στην προτίμηση για το περιεχόμενο των μουσικών κομματιών. Οι αντιληπτικοί παράγοντες σχετίζονται με τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά του κομματιού ή/και του συστήματος παρουσίασης. Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες [10], η βασική αντιληπτική παράμετρος που διαφέρει μεταξύ των τριών προαναφερθέντων χωρικών συστημάτων είναι η Εμβύθιση (Envelopment). Επίσης, υλοποιείται ένα απλό μοντέλο πρόβλεψης της Εμβύθισης των κομματιών από παραμέτρους των αμφιωτικών σημάτων. Οι συναισθηματικοί παράγοντες σχετίζονται με το πως αισθάνεται ο χρήστης κατά την ακρόαση του κομματιού μέσω ενός συστήματος. Η παρούσα εργασία ασχολείται κυρίως με τα συναισθήματα που σχετίζονται με τη Συναισθηματική Διέγερση (Emotional Arousal), η οποία είναι μία από τις δύο διαστάσεις του κυκλικού μοντέλου συναισθημάτων [11]. Τέλος, προτείνεται ένα απλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης που προβλέπει την ΟΕΑ χρησιμοποιώντας ως εισόδους τους γνωστικούς, αντιληπτικούς και συναισθηματικούς παράγοντες που αναλύθηκαν προηγουμένως, ώστε να εντοπιστούν οι μεταξύ τους γραμμικές συσχετίσεις.

Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: Η Ενότητα 1 περιγράφει συνοπτικά την ανάλυση που ακολουθείται. Στην Ενότητα 2 περιγράφεται η πειραματική διαδικασία

και στην Ενότητα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τέλος, στην Ενότητα 4 γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας.

## 1. Μεθοδολογία

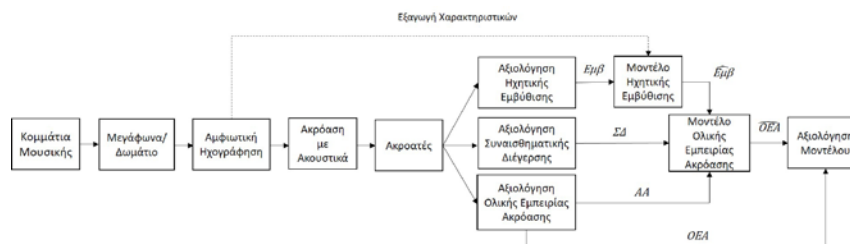
### 1.1 Επισκόπηση

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτήν την εργασία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Επιλέχθηκαν 5 κομμάτια, τα οποία αναπαρήχθησαν μέσω μεγαφώνων σε τρία διαφορετικά συστήματα αναπαραγωγής (μονοφωνικό, στερεοφωνικό και πολυκαναλικό 5.0) σε ημιανηχικό δωμάτιο και ηχογραφήθηκαν αμφιωτικά. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ακρόασης, οι συμμετέχοντες άκουσαν με ακουστικά τις αμφιωτικές ηχογραφήσεις και αξιολόγησαν την Ηχητική Εμβύθιση, την Συναισθηματική Διέγερση και την Ολική Εμπειρία Ακρόασης.

Δημιουργήθηκε γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης της Εμβύθισης (Εμβ), βασισμένο σε αμφιωτικά χαρακτηριστικά των σημάτων. Οι έξοδοι του παραπάνω μοντέλου συνδυάστηκαν γραμμικά με τις αξιολογήσεις της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης των ακροατών για το σύστημα αναφοράς (στερεοφωνικό σύστημα), που αποτελούν τις αξιολογήσεις (Αξιολόγηση Αναφοράς - AA) για την προτίμηση του περιεχομένου και με τη Συναισθηματική Διέγερση (ΣΔ) των ακροατών για τη δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης. Το συγκεκριμένο μοντέλο κάνει πρόβλεψη της ΟΕΑ για το μονοφωνικό και το πολυκαναλικό σύστημα αναπαραγωγής και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\widehat{OE\Delta} = b_0 + b_1 AA + b_2 (\widehat{E\mu\beta} - \widehat{E\mu\beta}_{AA}) + b_3 \Sigma\Delta + \varepsilon \quad (1.1)$$

Η διαφορά  $\widehat{E\mu\beta} - \widehat{E\mu\beta}_{AA}$  υποδεικνύει την μείωση ή την αύξηση την αντίληψης της εμβύθισης σε σχέση με την τιμή της εμβύθισης του στερεοφωνικού συστήματος αναπαραγωγής, που αποτελεί την αξιολόγηση αναφοράς.



Σχήμα 1.1 Επισκόπηση της δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης OLE

### 1.2 Μοντελοποίηση Εμβύθισης

Με βάση προηγούμενη έρευνα [12, 13] το μοντέλο πρόβλεψης της εμβύθισης που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε δύο χαρακτηριστικά αμφιωτικών σημάτων: το Interaural Cross Correlation (Διωτική Ετεροσυσχέτιση) (IACC) και την απόλυτη τιμή του Interaural Level Difference (Διωτική Διαφορά Στάθμης) (ILD):



$$IACC = \frac{\int_t^{t+t_{window}} p_L(t)p_L(t+\tau) dt}{\int_t^{t+t_{window}} p_L^2(t) dt \int_t^{t+t_{window}} p_R^2(t) dt} \quad (1.2)$$

$$|ILD| = \left| 20 \log \frac{E_{rms,L}}{E_{rms,R}} \right| \quad (1.3)$$

όπου  $p_L(t)$  και  $p_R(t)$  είναι τα αντίστοιχα σήματα του αριστερού και δεξιού αυτιού και  $E_{rms,L}$  και  $E_{rms,R}$  αντιστοιχούν στην ενεργό ισχύ των ίδιων σημάτων. Για τον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία απο την εργασία του [14]. Από τις κατανομές των χαρακτηριστικών που προέκυψαν, υπολογίστηκαν οι εξής στατιστικές στιγμές τους:  $IACC_{mean}$ ,  $IACC_{std}$  και  $|ILD|_{std}$ . Σύμφωνα με [15], χρησιμοποιήθηκε η τέταρτη δύναμη του  $IACC_{mean}$ . Έτσι, δημιουργήθηκε ένα γραμμικό μοντέλο για την πρόβλεψη της εμβύθισης για κάθε συνδυασμό κομματιού και συστήματος αναπαραγωγής, το οποίο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\widehat{E\mu\beta} = b_0 + b_1 IACC_{mean}^4 + b_2 IACC_{std} + b_3 |ILD|_{std} + \varepsilon \quad (1.4)$$

όπου οι συντελεστές  $b_i$  σε κανονικοποιημένη μορφή δείχνουν την επίδραση που έχει το κάθε χαρακτηριστικό στην πρόβλεψη της εμβύθισης και  $\varepsilon$  είναι το σφάλμα του μοντέλου.

## 2. Πειραματική Διαδικασία

### 2.1 Πείραμα Ακρόασης

Δύο πειράματα ακρόασης έλαβαν χώρα στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ένα δια ζώσης στο χώρο του εργαστηρίου της ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής του Πανεπιστημίου Πατρών (Πείραμα 1) και ένα εξ αποστάσεως (Πείραμα 2) με διαφορετικούς συμμετέχοντες σε καθένα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι συμμετέχοντες αξιολόγησαν την ηχητική εμβύθιση (Envelopment), τη συναισθηματική διέγερση (Arousal) και την Ολική Εμπειρία Ακρόασης (OEA). Επιλέχθηκαν 5 κομμάτια μουσικής από υψηλής ποιότητας ψηφιακές ηχογραφήσεις, διαθέσιμα τόσο σε στερεοφωνική όσο και σε πολυκαναλική (5.0) μορφή. Για τη δημιουργία των μονοφωνικών κομματιών, προστέθηκαν τα 2 κανάλια των αντίστοιχων στερεοφωνικών. Συνολικά, 15 κομμάτια (5 κομμάτια \* 3 συστήματα) αξιολογήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ακρόασης. Για την καταγραφή των αξιολογήσεων των ακροατών χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον webMUSHRA [16].

### 2.2 Αξιολόγηση Ηχητικής Εμβύθισης

Ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να αξιολογήσουν την Ηχητική Εμβύθιση, που αποτελεί χαρακτηριστικό της χωρικής ποιότητας του ήχου, για κάθε κομμάτι και κάθε σύστημα αναπαραγωγής. Η ηχητική εμβύθιση ορίζει σε τι βαθμό ο ήχος περιβάλλει τον ακροατή [17]. Η αξιολόγηση της εμβύθισης έγινε με κλίμακα από το -100 ως το

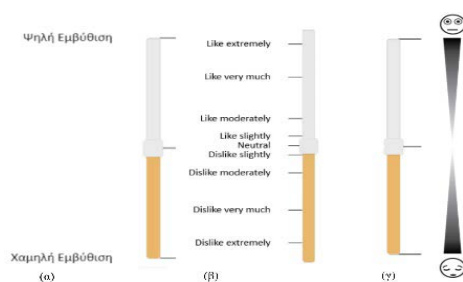
100 (Spatial Quality Scale), με το -100 να σημαίνει πάρα πολύ χαμηλή εμπύθιση και αντίστοιχα το 100 πολύ υψηλή (Σχήμα 2.1 (α)).

### 2.3 Αξιολόγηση Συναισθηματικής Διέγερσης

Στην αξιολόγηση της Συναισθηματικής Διέγερσης που ζητήθηκε από τους ακροατές, έπρεπε να αξιολογήσουν το πως αισθάνονται κατά την ακρόαση μουσικής με χρήση της κλίμακας Affective Slider για το Arousal [18], με το άνω άκρο της κλίμακας (+100) αντιστοιχεί σε συναισθήματα υψηλής διέγερσης (π.χ. ενθουσιασμός ή νευρικότητα), ενώ το κάτω (-100) σε συναισθήματα χαμηλής διέγερσης (π.χ. γαλήνη, ηρεμία ή βαρεμάρα) (Σχήμα 2.1 (β)).

### 2.4 Αξιολόγηση Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης

Για την αξιολόγηση της ολικής εμπειρίας ακρόασης ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να αξιολογήσουν τα κομμάτια στις τρεις διαφορετικές συνθήκες με βάση την ερώτηση "Πόσο σας αρέσει το κάθε κομμάτι μουσικής;". Έπρεπε να λάβουν υπόψιν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την προτίμησή τους, όπως το είδος μουσικής, την εξοικείωσή τους με το συγκεκριμένο κομμάτι, όπως κατά την ακρόαση μουσικής σε πραγματικές συνθήκες, συγκρίνοντας τα τρία συστήματα αναπαραγωγής. Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Modified Labeled Hedonic Scale (MLHS) [19] με τιμές από το -100 ως το 100 (Σχήμα 2.1 (γ)).



Σχήμα 2.1 Κλίμακες αξιολόγησης: (α) Εμβύθισης (Spatial Quality Scale), (β) Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης (Modified Labeled Hedonic Scale) και (γ) Συναισθηματικής Διέγερσης (Arousal Affective Slider)

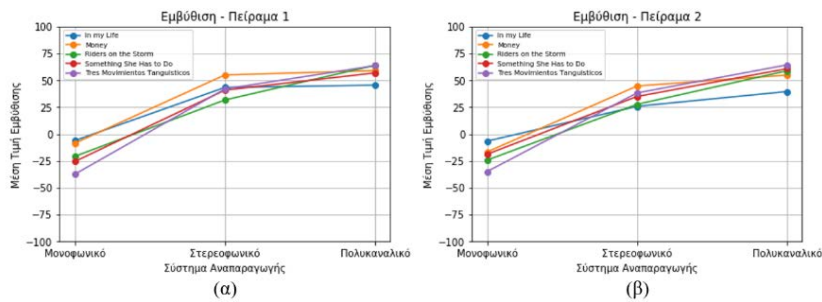
## 3. Ανάλυση

### 3.1 Στατιστική Ανάλυση

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων του πειράματος ακρόασης, έγιναν στατιστικές αναλύσεις και για τα 2 πειράματα. Για την εμπύθιση και την ολική εμπειρία ακρόασης έγινε ανάλυση two-way repeated measures ANOVA. Για τη συναισθηματική διέγερση, η ανάλυση έγινε με Friedman non parametric test [20], αφού παρατηρήθηκε ότι οι αξιολογήσεις ότι δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Επιπλέον, για την εμπύθιση έγινε σύγκριση των δύο δειγμάτων που αντιστοιχούν στα δύο πειράματα με 3 Way ANOVA.

### 3.1.1 Εμβύθιση

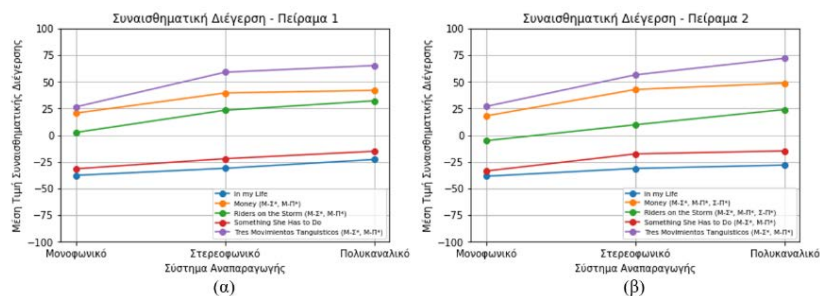
Στο Πείραμα 1, τα αποτελέσματα της ανάλυσης two way repeated measures ANOVA έδειξαν ότι για την για την εμβύθιση υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές με βάση το σύστημα αναπαραγωγής ( $F(1.459, 55.444) = 136.124, p < .001, h_p^2 = 0.782$ ), το κομμάτι ( $F(4, 152) = 5.488, p < .001, h_p^2 = 0.126$ ) και την αλληλεπίδραση συστήματος και κομματιού ( $F(5.693, 216.348) = 6.166, p < .001, h_p^2 = 0.140$ ). Για το Πείραμα 2, τα αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκριση με βάση το σύστημα αναπαραγωγής  $F(1.368, 72.518) = 159.059, p < .001, h_p^2 = 0.750$ ), το κομμάτι ( $F(4, 212) = 3.879, p = .005, h_p^2 = 0.068$ ) και την αλληλεπίδραση των δύο παραγόντων ( $F(5.223, 276.803) = 6.739, p < 0.001, h_p^2 = 0.113$ ) είναι στατιστικά σημαντικά. Συγκρίνοντας τα δύο πειράματα, 1 και 2, προκύπτει ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην αλληλεπίδραση του συστήματος αναπαραγωγής, το μουσικό κομμάτι και τον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος (διά ζώσης ή εξ αποστάσεως) ( $F(2, 1365) = 0.297, p = 0.967$ ).



Σχήμα 3.1 Μέσες τιμές αξιολογήσεων Εμβύθισης για το Πείραμα 1 (α) και το Πείραμα 2 (β)

### 3.1.2 Συναισθηματική Διέγερση

Τα στατιστικά σημαντικά αποτελέσματα της Διέγερσης για κάθε κομμάτι μεταξύ των τριών συστημάτων απεικονίζονται στα υπομνήματα του Σχήματος 3.2 με αστερίσκο.

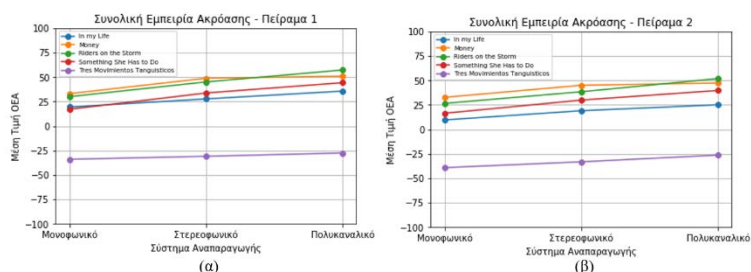


Σχήμα 3.2 Μέσες τιμές αξιολογήσεων Συναισθηματικής Διέγερσης για το Πείραμα 1 (α) και το Πείραμα 2 (β)

### 3.1.3 Ολική Εμπειρία Ακρόασης

Για την ΟΕΑ για το πείραμα 1, τα αποτελέσματα της ανάλυσης two-way repeated measures ANOVA ήταν στατιστικά σημαντικά με βάση όλους τους παράγοντες, συγκεκριμένα με βάση το σύστημα αναπαραγωγής ( $F(1.5, 56.982) = 28.887, p < 0.001, h_p^2 = .432$ ), το κομμάτι ( $F(2.599, 98.773) = 39.664, p < 0.001, h_p^2 = 0.511$ ) και την αλληλεπίδραση των δύο προηγούμενων παραγόντων ( $F(4.788, 181.927) = 3.165, p = 0.01, h_p^2 = 0.077$ ).

Για το Πείραμα 2, τα αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκριση με βάση το σύστημα αναπαραγωγής ( $F(1.342, 71.149) = 22.749, p < .001, h_p^2 = 0.300$ ) και το κομμάτι ( $F(2.816, 149.225) = 55.621, p < .001, h_p^2 = 0.512$ ) είναι στατιστικά σημαντικά. Όμως, στην αλληλεπίδραση των δύο δεν έχουμε στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $F(5.286, 280.113) = 1.997, p = 0.075, h_p^2 = 0.036$ ).



Σχήμα 3.3 Μέσες τιμές αξιολογήσεων Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης για το Πείραμα 1 (α) και το Πείραμα 2 (β)

### 3.2 Μοντελοποίηση Εμβύθισης

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αξιολογήσεις, και των δύο πειραμάτων, δημιουργείται γραμμικό μοντέλο την πρόβλεψη της ηχητικής εμβύθισης που περιγράφεται από την εξίσωση 1.3, και έχει την παρακάτω μορφή:

$$\widehat{E\mu\beta} = -1.171IACC_{mean}^4 - 0.899IACC_{std} + 0.743|ILD|_{std} \quad (3.1)$$

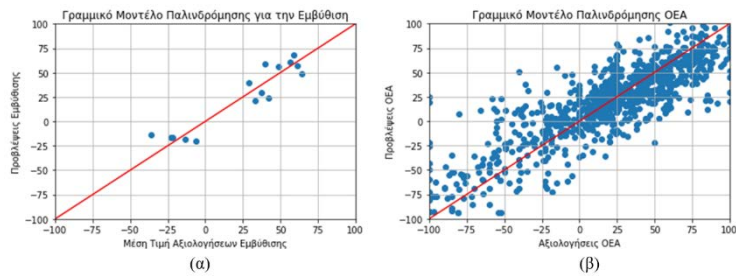
Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  ισούται με 90.3% και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4(α). Όσον αφορά τους συντελεστές, εύκολα συμπεραίνεται ότι η επίδραση του  $IACC_{mean}^4$  είναι η μεγαλύτερη, ακολουθεί το  $IACC_{std}$  και τη μικρότερη έχει το  $|ILD|_{std}$ . Λόγω της μεγάλης ακρίβειας του μοντέλου, οι έξοδοί του μπορούν να αντικαταστήσουν τις αξιολογήσεις των ακροατών.

### 3.3 Μοντελοποίηση Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης

Βάσει της Εξίσωσης 1.1 και κάνοντας χρήση το σύνολο των αξιολογήσεων από τα δύο πειράματα προκύπτει η Εξίσωση 3.2:

$$\widehat{OEA} = 0.797AA + 0.214(\widehat{E\mu\beta} - \widehat{E\mu\beta}_{AA}) \quad (3.2)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού του μοντέλου  $R^2$  είναι 71.9% και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4(β). Οι τιμές των συντελεστών των παραμέτρων κάνουν εμφανές πως το περιεχόμενο του κομματιού (AA) έχει μεγαλύτερη επίδραση στην ΟΕΑ σε σχέση με την εμβύθιση ( $\widehat{E\mu\beta} - E\mu\beta_{AA}$ ).



Σχήμα 3.4 Γραφήματα Παλινδρόμησης για την Εμβύθιση (α) και την ΟΕΑ (β)

#### 4. Συζήτηση - Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκε ένα απλό μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της εξατομικευμένης προτίμησης για αμφιωτικά ηχογραφημένα αποσπάσματα μουσικής. Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων ακρόασης έδειξαν πως τόσο η Εμβύθιση όσο και η Ολική Εμπειρία Ακρόασης αυξάνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών αναπαραγωγής. Η Συναισθηματική Διέγερση εξαρτάται λιγότερο από το σύστημα αναπαραγωγής, αλλά είναι εμφανής η μεγάλη συσχέτισή της με το περιεχόμενο του κομματιού. Εμπειρικά επιλεγμένα αμφιωτικά χαρακτηριστικά εξήχθησαν από τις ηχογραφήσεις και υλοποιήθηκε ένα υψηλής ακρίβειας μοντέλο για την πρόβλεψη της Εμβύθισης.

Αν και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, όπως τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν, είναι απλά, προσφέρει μια χρήσιμη οπτική στους παράγοντες που επηρεάζουν την προτίμηση κατά την ακρόαση αμφιωτικά ηχογραφημένων μουσικών κομματιών. Από το μοντέλο που παρουσιάστηκε, είναι εμφανές η μεγάλη επίδραση των γνωστικών παραγόντων (AA) στην Ολική Εμπειρία Ακρόασης, ενώ οι σχετικές διαφορές στην αντιληπτική παράμετρο της Εμβύθισης την επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό. Η Συναισθηματική Διέγερση (ΣΔ) δε φαίνεται να έχει γραμμική σχέση με την Ολική Εμπειρία Ακρόασης, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχει μεταξύ τους συσχέτιση. Η περαιτέρω έρευνα των μηχανισμών που σχηματίζουν την προτίμηση των ακροατών και η ανάπτυξη πιο σύνθετων μοντέλων της Ολικής Εμπειρίας Ακρόασης θα προσφέρει εργαλεία στους μηχανικούς για το σχεδιασμό και την παρουσίαση ηχητικών σημάτων που να δημιουργούν τη μέγιστη προτίμηση στους ακροατές.

#### 5. Αναφορές

[1] Thiede, T., Treurniet, W. C., Bitto, R., Schmidmer, C., Sporer, T., Beerends, J. G., and Colomes, C. «PEAQ-The ITU standard for objective measurement of

perceived audio quality» *Journal of the Audio Engineering Society*, **48(1/2)**, pp. 3–29 (2000).

[2] Beerends, J. G., Schmidmer, C., Berger, J., Obermann, M., Ullmann, R., Pomy, J., and Keyhl, M., «Perceptual objective listening quality assessment (POLQA), the third generation ITU-T standard for end-to-end speech quality measurement part I—Temporal alignment» *Journal of the Audio Engineering Society*, **61(6)**, pp. 366–384, (2013).

[3] Conetta, R., Brookes, T., Rumsey, F., Zielinski, S., Dewhirst, M., Jackson, P., Bech, S., Meares, D., George, S. «Spatial audio quality perception (part 2): a linear regression model» *Journal of the Audio Engineering Society*, **62(12)**, pp. 847–860, (2013).

[4] Blauert, J. and Jekosch, U. «A layer model of sound quality» *Journal of the Audio Engineering Society*, **60(1/2)**, pp. 4–12, (2012)

[5] Raake, A. and Blauert, J. «Comprehensive modeling of the formation process of sound-quality» in *2013 Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, pp. 76–81 (2013)

[6] Schoeffler, M. and Herre, J., «About the impact of audio quality on overall listening experience» in *Proceedings of Sound and Music Computing Conference*, pp. 48–53 (2013)

[7] Schoeffler, M., Conrad, S., and Herre, J., «The influence of the single/multi-channel-system on the overall listening experience» in *Audio Engineering Society Conference: 55th International Conference: Spatial Audio*, Audio Engineering Society (2014)

[8] Schoeffler, M., Adami, A., and Herre, J., «The influence of up-and down-mixes on the overall listening experience » in *Audio Engineering Society Convention 137*, Audio Engineering Society (2014)

[9] Schoeffler, M., Silzle, A., and Herre, J. «Evaluation of spatial/3D audio: Basic audio quality versus quality of experience » *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, **11(1)**, pp. 75–88 (2016)

[10] Francombe, J., Brookes, T., Mason, R., Woodcock, J., et al. «Evaluation of spatial audio reproduction methods (part 2): analysis of listener preference» *Journal of the Audio Engineering Society*, **65(3)**, pp. 212–225 (2017)

[11] Russell, J. A. «A circumplex model of affect» *Journal of personality and social psychology*, **39(6)**, 1161 (1980)

[12] Supper, B., «An onset-guided spatial analyser for binaural audio» University of Surrey (United Kingdom) (2005)

[13] Dewhirst, M., Conetta, R., Rumsey, F., Jackson, P., Zielinski, S., George, S., Bech, S., and Meares, D., «QESTRAL (part 4): test signals, combining metrics, and the prediction of overall spatial quality» in *Audio Engineering Society Convention 125*, Audio Engineering Society (2008)

[14] Soulodre, G. A., “New objective measures of listener envelopment,” in *18th Int. Congr. On Acoust. IV*, pp. 2465–2468 (2004)

[15] Klockgether, S. and van de Par, S., “A model for the prediction of room acoustical perception based on the just noticeable differences of spatial perception,” *Acta Acustica united with Acustica*, **100(5)**, pp. 964–971 (2014)

[16] Schoeffler, M., Bartoschek, S., Stöter, F.-R., Roess, M., Westphal, S., Edler, B., and Herre, J., «webMUSHRA—A comprehensive framework or web-based listening tests» *Journal of Open Research Software*, **6(1)** (2018)

[17] George, S., Zielinski, S., Rumsey, F., Jackson, P., Conetta, R., Dewhirst, M., Bech, S. «Development and validation of an unintrusive model for predicting the sensation of envelopment arising from surround sound recordings» *Journal of the Audio Engineering Society*, **58(12)**, pp.1013-1031 (2011).

[18] Betella, Alberto, and Verschure, F.M. «The affective slider: A digital self-assessment scale for the measurement of human emotions.» *PloS one*, **11.2** (2016)

[19] Zacharov, N., Volk, C., and Stegenborg-Andersen, T., «Comparison of hedonic and quality rating scales for perceptual evaluation of high-and intermediate quality stimuli» in *Audio Engineering Society Convention 143* (2017)

[20] M. Friedman, «The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance» *Journal of the american statistical association*, **32-200**, pp. 675–701 (1937)

## ***Καταγραφή συνηθειών ακρόασης μουσικής στην Ελλάδα***

Δήμητρα Φλούδα  
Μεταπτυχιακό Τμήμα  
Σπουδών Ακουστικού  
Σχεδιασμού &  
Ψηφιακού Ήχου,  
Σχολή Εφαρμοσμένων  
Τεχνών, Ελληνικό  
Ανοικτό Πανεπιστήμιο  
[dimiflou@hotmail.com](mailto:dimiflou@hotmail.com)

Λουκάς Χαδέλλης  
Καθηγητής, Τμήμα  
Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών &  
Μηχανικών  
Υπολογιστών,  
Πανεπιστήμιο  
Πελοποννήσου,  
[loukas@uop.gr](mailto:loukas@uop.gr)

Ιωάννης Μουρτζόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών & Μηχανικών  
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο  
Πατρών, Διευθυντής  
Προγράμματος Σπουδών  
Μεταπτυχιακού Προγράμματος  
Σπουδών Ακουστικού Σχεδιασμού  
& Ψηφιακού Ήχου, Σχολή  
Εφαρμοσμένων Τεχνών, Ελληνικό  
Ανοικτό Πανεπιστήμιο  
[mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Αντικείμενο της παρούσας έρευνας ήταν να καταγράψει και να ταξινομήσει έπειτα από τη συγκέντρωση και επεξεργασία 5252 δειγμάτων, όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες που σχετίζονται με τις συνηθισμένες ακρόασης μουσικής στην Ελλάδα, ένα θέμα το οποίο δεν είχε τύχει ολοκληρωμένης ακαδημαϊκής μελέτης, όπως προέκυψε έπειτα από ενδελεχή βιβλιογραφική έρευνα.*

*Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω της δημιουργίας και της διανομής ενός εξαιρετικά διευρυμένου πρωτότυπου ερωτηματολογίου, ώστε να αποτυπώσει το δυνατόν περισσότερες παραμέτρους που σχετίζονται τόσο με το ίδιο το μουσικό υλικό όσο και τα μέσα και βέβαια και τον ίδιο τον ακροατή.*

### ***Registering music listening habits in Greece***

#### **ABSTRACT**

*The present research aims to record and classify as much information as possible related to music listening habits in Greece after gathering and processing 5252 samples. As it emerged after a thorough literature research, this issue had not yet received a comprehensive academic study.*

*This research has been carried out through the creation and distribution of a highly expanded original questionnaire, in order to capture as many parameters as possible, related to both the musical material itself and the media and of course also the listener himself.*



## Εισαγωγή

*Επιμέρους στόχοι της έρευνας ήταν να μελετηθεί το μουσικό προϊόν, ως φυσικό φαινόμενο, το μουσικό περιεχόμενο ως αντικειμενικά μετρήσιμο και αναπαραγόμενο από διαφορετικά μέσα, όπως και κάτω από το υποκειμενικό πρίσμα των ακροατών, αισθητικό και μη, να διερευνηθούν τα μέσα πρόσβασης στο μουσικό προϊόν όπως και το προφίλ και οι προτιμήσεις του ακροατή μουσικής στην Ελλάδα.*

*Ειδικότερα να αποτυπωθούν οι συνήθειες ακρόασης ανά ηλικιακή ομάδα και προφίλ ακροατή, το κατά πόσο η ίδια η ηχητική ποιότητα ακρόασης παίζει ή όχι καθοριστικό ή και μικρότερο ρόλο στην επιλογή πηγής, μέσου και είδους ακρόασης μουσικής.*

*Να αναζητηθεί με ποια μέσα πραγματοποιείται η ακρόαση, ποιός ο καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή πηγής και μέσου ακρόασης, καθώς και του ίδιου του μουσικού προϊόντος (π.χ. η ευκολία πρόσβασης, φορητότητας, «μόδα» κοκ.).*

*Ακόμη, να ερευνηθεί κατά πόσο ο ακροατής έχει εμπειρία πάνω σε εξελεγχμένες μορφές ακρόασης, κατά πόσο οι συνήθειες της ακρόασης πιθανώς επηρεάζουν την ίδια τη μουσική βιομηχανία. Δευτερευόντως διερευνήθηκε εάν υπάρχει γνώση των ορίων ασφαλείας έντασης (volume) στις μουσικές ακρόασεις και θέματα που σχετίζονται με τη νομοθεσία όσον αφορά την ένταση αναπαραγωγής (volume) σε δημόσιο και ιδιωτικό χώρο.*

*Κατά πόσο ο ακροατής στην Ελλάδα επενδύει και κατά πόσο ή όχι σε συνδρομητικές ψηφιακές πλατφόρμες online streaming και downloading, εάν προτιμά αναλογικές ή ψηφιακές πηγές αναπαραγωγής καθώς και εάν επενδύει σε συναυλίες, online concerts, προϊόντα merchandise καθώς και συμβατικά, πέρα των καθαρά ψηφιακών μουσικά προϊόντα.*

*Τέλος, ερευνήθηκαν τα ευρήματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή της έρευνας, τα οποία ανά πεδίο συσχετίζονται και με αντίστοιχες έρευνες που έχουν διεξαχθεί και σε άλλες χώρες.*

### 1. Μεθοδολογία της υλοποίησης

Τα στάδια της μεθοδολογίας της έρευνας περιέλαβαν το στοχευμένο σχεδιασμό κατάλληλου ερωτηματολογίου, την οργάνωση και τη πραγματοποίηση της διανομής του ερωτηματολογίου, τη δημιουργία μιας βάσης συλλογής δεδομένων των συμμετεχόντων και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και τέλος την ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων.

#### 1.1 Σχεδιασμός – Σύνθεση Ερωτηματολογίου

Το ερωτηματολόγιο διαμορφώθηκε ώστε να είναι σύντομο και ταυτόχρονα περιεκτικό, η συμπλήρωσή του να μη απαιτεί πολύ χρόνο και ταυτόχρονα να μη θυσιάζεται η επιστημονικότητά του στο βωμό της απλότητας. Χρησιμοποιήθηκε ένα περιβάλλον με intuitive interface και adaptive-responsive design, ώστε να είναι προσβάσιμο εύκολα και από συσκευή κινητού τηλεφώνου (Google Forms) [1]. Τα περισσότερα ερωτήματα είναι πολλαπλής επιλογής, κλειστού τύπου, άλλοτε με μια μοναδική απάντηση και άλλοτε με περισσότερες. Όπου χρειάστηκε διαβάθμιση,

χρησιμοποιήθηκε η Likert Scale 5 βαθμίδων [2], ως διαπιστευμένο ψυχομετρικό εργαλείο.

### 1.2 Διανομή του ερωτηματολογίου

Η διανομή του ερωτηματολογίου πραγματοποιήθηκε αποκλειστικά ψηφιακά λόγω συνθηκών Covid. Η κοινοποίηση του link έγινε σε social media, blog μουσικής και μουσικής τεχνολογίας, μουσικά περιοδικά, μαθητές και φοιτητές ανά την Ελλάδα, με προτροπή και περαιτέρω κοινοποιήσεων. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση δειγμάτων παρατηρήθηκε στα χρονικά διαστήματα αμέσως μετά από κοινοποίηση σε social media και συγκεκριμένα σε ομάδες του Facebook.

### 1.3 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Η δημιουργία βάσης συλλογής δεδομένων, σύμφωνα με τις αρχές προστασίας των προσωπικών δεδομένων, πραγματοποιήθηκε στην εφαρμογή Google Forms (raw δεδομένα σε μορφή πίνακα excel). Η καταχώρηση, η επεξεργασία, η ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου IBM SPSS Statistics 27 [3]. Η αποτύπωση σε πίνακες, εικόνες και διαγράμματα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των Microsoft Excel και SPSS Statistics.

## 2. Κατανομή – Δημογραφικά στοιχεία της έρευνας

Προκύπτει σχεδόν κανονική-γκαουσιανή κατανομή στο πληθυσμιακό δείγμα. Η πλειοψηφία των ανήκει στις ηλικιακές ομάδες 26-35 και 36-45 ετών. Ακολουθούν οι ομάδες 19-25 και 56-65 ετών που αποτελούν σχεδόν το 30% και έπονται οι υπόλοιπες ομάδες σε μικρό ποσοστό. Η αναλογία αυτή παρατηρείται και όσον αφορά την ενασχόληση ή μη με τη μουσική ή/και ήχο (Σχήμα 2.1). Στο παράρτημα παρατίθενται ενδεικτικά σχήματα των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που ακολουθούν.



Σχήμα 2.1 Κατανομή πληθυσμιακού δείγματος συσχετισμένη και με την ενασχόληση με τη μουσική ή και τον ήχο

## 3. Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

### 3.1 Παράγοντες σχετικοί με την ακρόαση μουσικής

Σχεδόν το 50% (47.7%), πραγματοποιεί ακρόαση μουσικής για πάνω από 6 ώρες την εβδομάδα και μόνο ένα 3% από 0 έως 1 ώρα.

Ως δημοφιλέστερο μουσικό στυλ αποτυπώνεται η ροκ μουσική με ποσοστό 52.55%, ακολουθεί η έντεχνη ελληνική μουσική με ποσοστό 36.18% και με ποσοστά λίγο μικρότερα από 20% η Jazz, η Κλασική, η Pop, η Ελληνική Λαϊκή και η Electronic και έπονται τα υπόλοιπα μουσικά στυλ (Σχήμα 3.1). Τα ποσοστά αυτά συμφωνούν με τις αναφορές από τα επίσημα album sales charts της IFPI [4] για την Ελλάδα.

Όσον αφορά την αναζήτηση νέας μουσικής και νέων κυκλοφοριών, ποσοστό πάνω από το 50%, δηλώνει ότι ανάμεσα σε άλλες επιλογές εμπιστεύεται εφαρμογές ή πλατφόρμες που προτείνουν σχετικό μουσικό περιεχόμενο με αυτό που ήδη έχει επιλεγεί (53.73%) και τα social media (53,24%). Ακολουθούν το ραδιόφωνο (46.34%), καθώς και παραδοσιακοί (προ διαδικτύου κυρίως) τρόποι, όπως από φίλους και γνωστούς (32.94%) και το διαδικτυακό ραδιόφωνο (26.83%).

Πάνω από το 50% ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για πολύ καλή ηχητική ποιότητα καθώς και σωστή ένταση στην πραγματοποίηση μιας ιδανικής ακρόασης. Το 75% δηλώνει εξοικειωμένο με ορολογία σχετική με την υψηλή ηχητική ποιότητα.

Ένα 35% φαίνεται να έχει εμπειρία ακρόασης κάποιας πολυκαναλικής (πέραν της στερεοφωνίας) μορφής ακρόασης [3D audio, spatial audio, κ.ό.κ από οικιακή διάταξη Home Theater, κάποια πλατφόρμα, κινηματογραφική προβολή, κονσόλα παιχνιδιού, περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας ή αμφιωτική (binaural) αναπαραγωγή με ακουστικά].

### 3.2 Δαπάνες που σχετίζονται με ακρόαση μουσικής

Σχεδόν το 50% των ακροατών, δε δαπανά ετησίως καθόλου χρήματα για αγορά συμβατικών μέσων για ακρόαση μουσικής (cd, δίσκους, κασέτες κλπ) και πολύ μικρό ποσοστό από 30 ευρώ και πάνω.

Όσον αφορά τις δαπάνες για την αγορά εισιτηρίων, τα ποσοστά είναι αρκετά ισοκατανεμημένα σε όλες τις κλίμακες, από καθόλου έως πάνω από 100 ευρώ.

Η αγορά προϊόντων merchandise φαίνεται να μην είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στο ελληνικό κοινό · το 62.1% δε δαπανά καθόλου χρήματα για αυτό.

### 3.3 Μέσα ακρόαση μουσικής

Η μεγάλη πλειοψηφία (75.8%), προτιμά τον Η/Υ του ή το laptop του και ακολουθεί πολύ κοντά η χρήση της συσκευής κινητού τηλεφώνου (67.54%). Ακολουθούν το ραδιόφωνο αυτοκινήτου και το ραδιόφωνο (συνολικά και τα δύο σε ποσοστό πάνω από 70%), το ηχοσύστημα αυτοκινήτου και το πικάπ σε ποσοστά περί του 15%. (Σχήμα 3.2)

Η μεγάλη πλειοψηφία χρησιμοποιεί τα προεγκατεστημένα στην εκάστοτε συσκευή ηχεία (ποσοστό 57.7%). Ένας στους τέσσερις χρησιμοποιεί ηχεία με ειδική συχνοτική απόκριση. Ένας στους δέκα απάντησε ότι χρησιμοποιεί τα ηχεία των οικιακών πολυκαναλικών διατάξεων τύπου “Home Cinema”.

Όσον αφορά τα ακουστικά, σχεδόν οι μισοί ακροατές (51%) δήλωσαν ότι κατά κύριο λόγο επιλέγουν απλά ακουστικά που έχουν στη διάθεσή τους, συμπεριλαμβανομένων των ακουστικών των συσκευών των κινητών τους τηλεφώνων (τύπου hands free). Ένα 32% χρησιμοποιεί ειδικά headphones με

κατάλληλη συχνοτική απόκριση. Ένας στους δέκα χρησιμοποιεί ειδικά headphones με κατάλληλη συχνοτική απόκριση επαγγελματικών προδιαγραφών και σχεδόν ένας στους είκοσι το headset που διαθέτει και για το gaming.

Πάνω από το 65% επηρεάζεται στην επιλογή του μέσου ακρόασης από το χαρακτηριστικό της φορητότητας πολύ ή πάρα πολύ.

Το κόστος αγοράς, συντήρησης και χρήσης ενός μέσου επηρεάζει μέτρια έναν στους τρεις ενώ σε ποσοστό περίπου 40% συνολικά οι ακροατές επηρεάζονται πολύ και πάρα πολύ από τους παράγοντες αυτούς.

Ποσοστό 32.4% δηλώνει ότι η επιλογή του μέσου από το οποίο κυρίως πραγματοποιεί ακρόαση δεν ταυτίζεται καθόλου με το τι είναι δημοφιλές και προβάλλεται σαν τάση. Ακολουθεί ένα 25.4% το οποίο δηλώνει μέτρια επηρεασμένο στην επιλογή μέσου ακρόασης μουσικής από αυτό τον παράγοντα. Ακολουθούν όσοι δήλωσαν ότι επηρεάζονται λίγο (25%), όσοι επηρεάζονται πολύ (11%) και πάρα πολύ (6.1%).

Όσον αφορά τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις στα μέσα και τους τρόπους ακρόασης, το 33% απάντησε ότι το επηρεάζουν μέτρια, ένα 28.1% πολύ, το 15.6% πάρα πολύ, το 14.2% λίγο και ένα 9% καθόλου.

Μεγάλο ποσοστό των ερωτηθέντων (39.5%) απάντησε ότι επηρεάζεται πολύ, κι ένα 24.9% πάρα πολύ από την ηχητική ποιότητα που προσφέρει μια συσκευή, ακόμη κι όταν αυτή δεν προορίζεται κυρίως και αποκλειστικά για αυτή τη χρήση (π.χ. η αγορά μιας τύπου Smart Tv).

### *3.4 Ακρόαση μουσικής μέσω πλατφορμών/εφαρμογών*

Η μεγάλη πλειοψηφία των συμμετεχόντων, σε ποσοστό 86.2% κάνει χρήση των πλατφορμών (online streaming, downloading και το ιντερνετικό ραδιόφωνο) και μόλις ένα 13.8% δεν τις χρησιμοποιεί. Οι δημοφιλέστερες από αυτές είναι το YouTube Music (70.37%), το Spotify (49.83%), το Soundcloud (10.93%), το Bandcamp (9.71%), το TikTok (8%), το iTunes (5.39%) και το Apple Music (4.86%) (Σχήμα 3.3). Για τις έξι δημοφιλέστερες πλατφόρμες και σε σύγκριση με χώρες που αποτελούν αγορές-κλειδιά, όπως είναι οι ΗΠΑ, η Αγγλία, η Γαλλία και η Ινδία, η Ελλάδα ακολουθεί κάποιες «τάσεις» αλλά όχι όλες, σύμφωνα με την έρευνα του YouGov.co.uk [5].

Όσον αφορά το κατά πόσο το εύκολο μενού, το intuitive interface και το adaptive responsive design επηρεάζουν την επιλογή μιας πλατφόρμας, το 40% δηλώνουν ότι επηρεάζονται πολύ και το 35.3% πάρα πολύ (Σχήμα 3.4).

Ο παράγοντας δημοτικότητα συνολικά της πλατφόρμας που επιλέγεται επηρεάζει σε μέτριο και μικρό βαθμό την πλειοψηφία των ακροατών.

Μεγάλο ποσοστό (42.2%), απάντησε ότι ο παράγοντας της περιεκτικότητας μιας πλατφόρμας σε αντιπροσωπευτικό μουσικό δείγμα είναι πάρα πολύ καθοριστικός και ένα 36.4% πολύ καθοριστικός. Για ένα ποσοστό 15.1% μέτρια καθοριστικός, για το 4.1% λίγο και για το 2.2% καθόλου!

Όσον αφορά τον τρόπο από τον οποίο πραγματοποιείται η ακρόαση από τις διάφορες μουσικές πλατφόρμες, το 39% δήλωσε ότι κατά κύριο λόγο χρησιμοποιεί όλες τις δυνατότητες (δημιουργώντας δικές του λίστες αναπαραγωγής, επιλέγοντας από έτοιμες λίστες αναπαραγωγής που αυτόματα δημιουργούνται από τις εφαρμογές και αφήνει τις εφαρμογές να δημιουργήσουν για αυτούς τυχαίες λίστες αναπαραγωγής σύμφωνα με αλγόριθμους που καταγράφουν προτιμήσεις και

ιστορικό ακροάσεων (ποικίλλει η μέθοδος ανάλογα με την κάθε εφαρμογή). Ακολουθούν πολύ κοντά όσοι επιλέγουν να δημιουργούν τις δικές τους λίστες αναπαραγωγής στις διάφορες πλατφόρμες που χρησιμοποιούν, επιλέγοντας δηλαδή αποκλειστικά οι ίδιοι τη μουσική που θα ακούσουν σε ποσοστό 37.6%. Το 11.3% αφήνει τις εφαρμογές να διαμορφώσουν γι αυτό τυχαίες λίστες αναπαραγωγής, ένα 10.8% επιλέγει να ακούσει μουσική από ήδη έτοιμες λίστες που υπάρχουν δημιουργημένες από τις πλατφόρμες ή από άλλους χρήστες και τέλος ένα 1.2% επιλέγει να ακούει ολόκληρα album ή να ψάχνει ακούγοντας κάποιο κομμάτι.

Η μεγάλη πλειοψηφία των χρηστών των πλατφορμών επιλέγουν αποκλειστικά τις δωρεάν παρεχόμενες υπηρεσίες (63.9%). Ποσοστό 31.6% επιλέγει κατά περίπτωση και τα δύο είδη υπηρεσιών και μόλις το 4.6% χρησιμοποιεί αποκλειστικά συνδρομητικές/επί πληρωμή υπηρεσίες.

### *3.5 Ακρόαση μουσικής μέσω πλατφορμών/εφαρμογών τύπου torrent*

Ποσοστό 43,5% δηλώνει ότι δεν πραγματοποιεί χρήση των υπηρεσιών τύπου torrent. Εξίσου μεγάλο ποσοστό 40,9% δηλώνει ότι τις χρησιμοποιεί και τέλος ακολουθεί ένα 15,7% που δε γνωρίζει είτε αν κάνει χρήση αυτών των υπηρεσιών είτε τι είναι αυτές οι υπηρεσίες εν γένει.

Το 69,5% δηλώνει γνώση σχετικά με το καθεστώς νομιμότητας που διέπει τις πλατφόρμες τύπου torrent και το 30,5% όχι. Το 27,4% μάλιστα δήλωσε ότι επηρεάζεται μέτρια από αυτόν τον παράγοντα νομιμότητας, το 24,8% καθόλου, το 18% λίγο, το 15% πάρα πολύ και το 14,8% πολύ.

Ένα ποσοστό 28,3% πιστεύει πως επηρεάζεται η μουσική βιομηχανία και η βιωσιμότητα των καλλιτεχνών με τη χρήση torrent πάρα πολύ, ένα 26,3% μέτρια, ένα 23,9% πολύ.

Κάποια από τα πιο επίσημα στοιχεία που αφορούν την Ελλάδα και την πειρατεία στη μουσική εν γένει, δίδονται μέσω του φορέα της Ευρωπαϊκής Ένωσης EUIPO - European Union Intellectual Property Office, παρατηρητήριο των πνευματικών δικαιωμάτων που συλλέγει μεταξύ άλλων μέσω της βάσης δεδομένων MAVICE στοιχεία για την παραβίαση της κείμενης νομοθεσίας σε θέματα πνευματικής ιδιοκτησίας, περιλαμβάνοντας και τον τομέα της μουσικής, και για τα 27 πλέον κράτη-μέλη (28 με την Αγγλία προ Brexit). Στην έκθεση της EUIPO για τα έτη 2017-2018 [Online Copyright Infringement in the European Union, Music, Films and TV (2017-18), Trends and Drivers (2019)], διαφαίνονται μεταξύ άλλων ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος και τα ποσοστά παραβίασης στον τομέα της μουσικής με τέσσερις διαφορετικές μορφές: streaming, downloading, torrent και ripper.

Αποτυπώνεται φθίνουσα πτωτική τάση αναφορικά με την πειρατεία στη μουσική με τις διάφορες μορφές που μπορεί να πραγματοποιηθεί. Παρότι παρατηρείται μια κλιμακούμενη μείωση στη χρήση αυτών των υπηρεσιών τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα μεταξύ άλλων 17 χωρών κυρίως της Νότιας και Ανατολικής Ευρώπης, στην 9η θέση, συνεχίζει να βρίσκεται πάνω από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, σε όλες τις μετρήσεις. Σε αυτές τις 18 χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, η φθίνουσα πορεία είναι πιο αργή σε σχέση με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο. [6]

### *3.6 Απαιτήσεις για ικανοποιητική ακρόαση*

Όσον αφορά την ιδιωτική ακρόαση μουσικής, μεγάλο ποσοστό (63%) αναφέρει ότι το να πραγματοποιεί ακρόαση του μουσικού στυλ της αρεσκείας του είναι καθοριστικός παράγοντας ιδανικής ακρόασης. Ακολουθεί η σωστή ένταση (volume) ανάλογη της περιστάσεως (57.06%), η απουσία θορύβου από άλλες πηγές (ομιλίες, οικιακός ή αστικός θόρυβος κλπ) (49.01%). Έπονται η ύπαρξη κατάλληλης ψυχικής διάθεσης (42.40%), το κατάλληλο ηχοσύστημα και ηχητική εγκατάσταση μελετημένα τοποθετημένα στο χώρο της ακρόασης (38.5%), το να προέρχεται η ακρόαση από μουσικά αρχεία υψηλής ηχητικής ποιότητας (34.12%), το να υπάρχει ηχητική διαύγεια και δυνατότητα διάκρισης των επιμέρους ηχητικών συστημάτων (20.98%). Αυτοί οι τρεις παράγοντες είναι αρκετά αλληλένδετοι, γιατί η ύπαρξη, και ειδικά η απουσία του ενός επηρεάζει την ποιότητα των υπολοίπων. Η ύπαρξη ιδιωτικού χώρου για αναπόσπαστη ακρόαση (π.χ. ξεχωριστό δωμάτιο σε) επιλέχθηκε ως σημαντικός παράγοντας από το 20.66%. Ένα 7.58%, δήλωσε ότι μια ιδανική για αυτούς ακρόαση γίνεται με πολύ δυνατή ένταση (volume) μουσικής.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις για ικανοποιητική ακρόαση ζωντανής μουσικής με φυσική παρουσία στο χώρο, τρεις στους τέσσερις επέλεξαν ως καθοριστικότερο παράγοντα την ύπαρξη κατάλληλων ηχοσυστημάτων και ηχητικών εγκαταστάσεων ορθά τοποθετημένων στο χώρο. Ακολουθεί ο παράγοντας της επίτευξης καλής οπτικής επαφής με τη μουσική σκηνή από κάθε ακροατή (61.71%). Το 37.05% θέλει ισορροπημένη ένταση (volume) σε σχέση με την περίσταση και το 30.16% ηχητική διαύγεια και δυνατότητα διάκρισης των επιμέρους ηχητικών στοιχείων. Πολύ σημαντικός παράμετρος θεωρείται από το 29.07% η απουσία του φαινομένου καθυστέρησης του ήχου σε σχέση με την εικόνα. Ακολουθούν με κοντινά ποσοστά η απουσία θορύβου από τα ηχεία (26.73%), από ανθρώπινη δραστηριότητα (24.47%) και από μηχανήματα στο χώρο (23.06%). Έπονται όσοι επέλεξαν ως βασικό κριτήριο την απόδοση του μουσικού περιεχομένου από το μουσικό σχήμα που ακούνε ζωντανά πιστά παρόμοια με αυτό της ηχογράφησης (14.09%). Η απουσία θορύβου που να οφείλεται σε φυσικά φαινόμενα (12.07%), καταδεικνύει ότι ειδικά σε open air events, έχει γίνει αισθητή η όχληση από την έλλειψη πετασμάτων που αποκόπτουν π.χ. τον αέρα στα μικρόφωνα της σκηνής. Κι εδώ ένα μικρό αλλά όχι αμελητέο ποσοστό ακροατών (5.24%) επιθυμεί πολύ δυνατή ένταση (volume) για μια ικανοποιητική ζωντανή ακρόαση. Η μερίδα αυτή τελικά αποδεικνύεται αρκετά μικρή, δίνοντας όμως ένα σοβαρό στίγμα. Εξάλλου, όπως στη μελέτη των παραμέτρων της ικανοποιητικής ιδιωτικής ακρόασης μουσικής, η δυνατότητα της επιλογής αυτής της παραμέτρου δόθηκε για να διερευνηθεί το κατά πόσο σε αρκετούς από τους συμμετέχοντες το να ακούν αρκετά δυνατά συγγέεται με το ότι ακούν ποιοτικά.

### *3.7 Ασφαλής ακρόαση και όχληση*

Όσον αφορά τα όρια ασφαλείας στην ένταση (volume) αναπαραγωγής από διάφορες συσκευές και περιφερειακά, τα οποία δίνει ο κατασκευαστής στις προδιαγραφές, το 53.9% τα γνωρίζει ενώ το 46.1% όχι.

Στο ερώτημα της συχνής αίσθησης όχλησης από έκθεση σε δυνατή ένταση (volume) αναπαραγωγής, το 52.8% των συμμετεχόντων αποκρίθηκε θετικά. Ακολούθως διερευνώνται ίσως κάποιες από τις επιπτώσεις αυτής της έκθεσης. Οι συμμετέχοντες ερωτήθηκαν εάν έχουν υποστεί παροδική ή μόνιμη βλάβη στην ακοή τους λόγω έκθεσης σε υπερβολική ένταση (volume) στο οικιακό τους περιβάλλον ή

σε δημόσιο χώρο. Το 19.7%, δηλώνει ότι έχει υποστεί κάποια παροδική βλάβη, ένα 14.5% πιθανολογεί ότι μπορεί να του έχει συμβεί και δυστυχώς υπάρχει ένα 3.1% που έχει υποστεί μόνιμη επιβεβαιωμένη βλάβη από αυτό το λόγο!

Στην ερώτηση περί γνώσης ύπαρξης σχετικής νομοθεσίας που να αφορά και το επιτρεπόμενο όριο έντασης αναπαραγωγής ήχου (volume) στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση, το 52.2% αποφάνθηκε ότι γνωρίζει σχετικά, ενώ ποσοστό 47,8% αγνοεί το πλαίσιο. Τέλος, ζητήθηκε η προσωπική εκτίμηση για το εάν η νομοθεσία που διέπει και την ένταση (volume) αναπαραγωγής μουσικής τηρείται ή όχι στην Ελλάδα, στους ιδιωτικούς αλλά και σε δημόσιους χώρους. Αποτέλεσμα ήταν η μεγαλύτερη μερίδα των συμμετεχόντων στην έρευνα (59.6%) να δηλώνει ότι θεωρεί ότι η νομοθεσία δεν τηρείται.

#### 4. Μελλοντική εργασία

Η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη. Έχει γίνει η καταγραφή και η πρωτογενής ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για περαιτέρω στατιστική ανάλυση, επεξεργασία και ετεροσυσχετίσεις ώστε να προκύψουν περισσότερα και ειδικότερα ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα. Το πλήρες κείμενο που αφορά την έρευνα είναι διαθέσιμο στο αποθετήριο του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.[7]

#### 5. Αναφορές

[1] Google Forms, <https://www.google.com/forms/about/>

[2] Brown, J. D. (2000). What issues affect Likert-scale questionnaire for questionnaire formats?, *Shiken: JALT Testing & Evaluation SIG Newsletter*, Vol 4 (No1) April 2000, pp 27 – 30. <https://hosted.jalt.org/test/PDF/Brown7.pdf>

[3] IBM SPSS Statistics 27, <https://www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software>

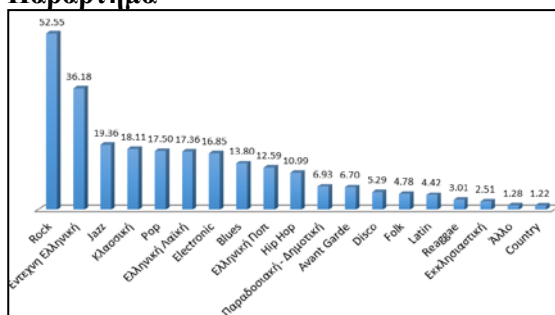
[4] IFPI (International Federation of the Phonographic Industry), <https://www.ifpi.gr/index.html>

[5] Nguyen, H. (2021). The most popular music streaming platforms in key markets globally, YouGov, <https://today.yougov.com/topics/media/articles-reports/2021/03/19/services-used-streammusic-poll>

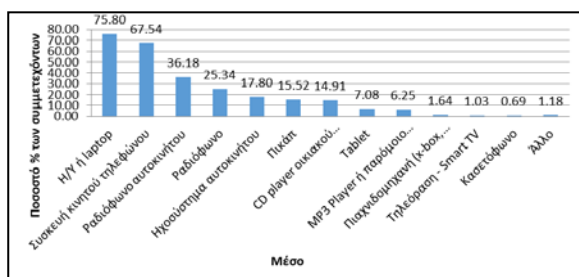
[6] EUIPO, Online Copyright Infringement in the European Union, Music, Films and TV (2017-18), Trends and Drivers (November 2019), <https://euiipo.europa.eu/ohimportal/el/web/observatory/online-copyright-infringement-ineu>

[7] Φλούδα, Δ. (2021). *Καταγραφή συνηθειών ακρόασης μουσικής στην Ελλάδα* (διπλωματική εργασία), Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Τμήμα Εφαρμοσμένων Τεχνών, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος, Πάτρα. <https://apothesis.eap.gr/handle/repo/52956>

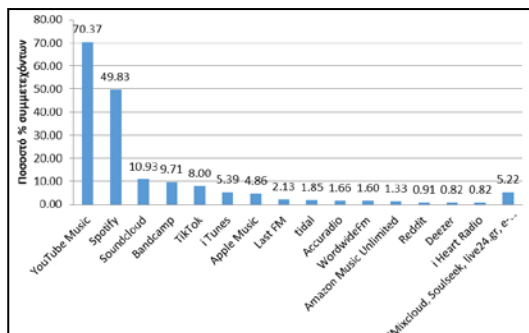
## Παράρτημα



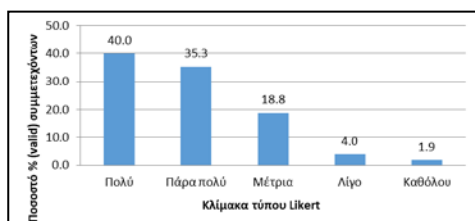
Σχήμα 3.1 Αποτύπωση προτίμησης μουσικού στυλ (genre) σε ποσοστιαία κλίμακα



Σχήμα 3.2 Αποτύπωση προτίμησης μέσου ακρόασης μουσικής



Σχήμα 3.3 Αποτύπωση προτίμησης πλατφόρμας online streaming, downloading και internetικού ραδιοφώνου



Σχήμα 3.4 Αποτύπωση επιρροής κριτηρίων επιλογής μιας πλατφόρμας (εύκολο μενού, το intuitive interface και adaptive responsive design)



## ***Computational model for multiple acoustic levitation points with an ultrasonic plane wave and a grid of reflecting surfaces***

Spyros Polychronopoulos

Current affiliation: Informatics and Telecommunications  
Department, National and Kapodistrian University of  
Athens, Zografou 161 22, Athens, Greece

This work's affiliation: Informatics Department, University  
of Sussex, Falmer, Brighton, BN1 9QJ, UK

### **ABSTRACT**

*Since the first levitation of an object with sound, almost a century ago, acoustic levitation is still a rather active field of research; mainly because there are no constraints regarding the levitated object's material and because of the manipulation precision. These two aspects are enabling several applications both for lab experiments and for human-computer interaction apparatus. The two broadly used techniques involve standing waves and focusing the acoustic energy in specific locations, with one or more arrays of phased ultrasonic transducers. However, by putting the first one into practice the levitation points are in predefined positions and with the second one each acoustic trap is getting weaker as a new one is being introduced. Here we introduce a method combining the above techniques by adopting one transducer or a single phased array and a grid of reflecting surfaces with various heights. Our method is using numerical optimization techniques to optimize the reflecting surfaces' heights to form multiple levitation points at given locations. By combining the emitted with the reflected sound pressures the acoustic field gets stronger and more capable of levitating multiple objects.*

### ***Υπολογιστικό μοντέλο για ακουστική αιώρηση πολλαπλών σωμάτων με υπερήχους και συστοιχία ανακλαστικών επιφανειών***

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Από την πρώτη αιώρηση ενός αντικειμένου με ήχο, σχεδόν πριν από έναν αιώνα, η ακουστική αιώρηση εξακολουθεί να είναι ένα αρκετά ενεργό πεδίο έρευνας κυρίως επειδή δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το υλικό του ανυψούμενου αντικειμένου και λόγω της ακρίβειας χειρισμού. Αυτές οι δύο πτυχές επιτρέπουν πολλές εφαρμογές τόσο για εργαστηριακά πειράματα όσο και για συσκευές αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής. Οι δύο ευρέως διαδεδομένες τεχνικές περιλαμβάνουν στάσιμα κύματα και εστίαση της ακουστικής ενέργειας σε συγκεκριμένα σημεία, με μία ή περισσότερες*

*συστοιχίες από ηχεία υπερήχων που έχουν τη δυνατότητα να έχουν διαφορετική φάση το καθένα. Ωστόσο, με την εφαρμογή της πρώτης, τα σημεία αιώρησης βρίσκονται σε προκαθορισμένες θέσεις και με τη δεύτερη ακουστική ενέργεια του κάθε σημείου αιώρησης εξασθενεί όταν εισάγεται ένα νέο σημείο. Εδώ εισάγουμε μια μέθοδο που συνδυάζει τις παραπάνω τεχνικές υιοθετώντας μια μονοφασική συστοιχία ηχείων υπερήχων και μια συστοιχία ανακλαστικών επιφανειών με διάφορα ύψη. Η μεθοδός μας χρησιμοποιεί τεχνικές αριθμητικής βελτιστοποίησης για τη βελτιστοποίηση των υψών των ανακλώμενων επιφανειών ώστε να σχηματίζονται πολλαπλά σημεία αιώρησης σε δεδομένες θέσεις. Συνδυάζοντας τις εκπεμπόμενες με τις ανακλώμενες ηχητικές πιέσεις, το ακουστικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο και πιο ικανό να για αιώρηση πολλαπλών αντικειμένων.*

## **Introduction**

The physics behind levitating and manipulating objects with acoustic waves has been explicitly explored<sup>1-5</sup> providing us with a satisfactory understanding of the phenomenon. Innovative applied works reveal new areas suitable for utilization; In biology, by the manipulation of yeast cells<sup>6</sup>, levitating small living animals<sup>7</sup>, using levitated drops for biophysical measurements<sup>8</sup>, sample delivery<sup>9</sup> and cell manipulation<sup>10</sup>. In chemistry, by levitating liquids<sup>11</sup>, for chemical analysis<sup>12,13</sup> and mixing in colliding levitated drops<sup>14</sup> and in gastronomy<sup>15</sup>. In human computer interaction; food delivery<sup>16</sup>, visualization<sup>17,18</sup> and interactive widgets<sup>19</sup>. Additionally, for wearable levitators incorporation of an electrostatic field can allow rotation of the levitated objects, producing mid-air displays<sup>20</sup>. A magnetic field can also be employed to wirelessly charge the levitated object, such as a light-emitting moving particle<sup>21</sup>.

The transducer-opposing reflector setup or transducer-opposing transducer setup, to obtain more stable traps, was one of the first methods to levitate objects with ultrasound<sup>22-24</sup>. However, it is still commonly used to manipulate, in one direction, one or more objects<sup>25-29</sup>. This approach is based on the creation of a standing wave where the nodes act as traps. Moreover, by either changing the transducers' phases<sup>30,31</sup> or by changing their amplitudes<sup>25</sup> the nodes, and therefore the levitated objects, move in a single axis. By amending both transducers' phases and amplitudes one or more objects can be manipulated in 3D<sup>32</sup>. However, until now, there is not extensive research for the same set of transducers to control more than one trap. The objects, implementing the standing wave method, can levitate at set distances of half a wavelength ( $\lambda/2$ ) between them and by changing the phase of the transducers they can move altogether to the same direction at the same speed<sup>20</sup>.

Two new methods made the levitation of an object larger than the wavelength possible. The first method brought about the levitation of a polystyrene bead approximately  $2\lambda$  in diameter, in an acoustic trap, by exploring the angular momentum that acoustic vortices can transfer<sup>33</sup>. The second method involves creating a standing wave between the transducer and object. By implementing the

second method scientists managed to levitate in the near-field large sized planar objects<sup>34,35</sup>. Although the wavelength limit, regarding the size of the levitated object, was broken, the original constrain of one individual trap per set of transducers, until now, remains. This is setting a barrier and not allowing the development of more innovative applications. In addition, the stability of the levitated object is always an issue<sup>36</sup>.

With the use of pre-manufactured, three-dimensional units (so called acoustic metamaterials), controlling the sound-field can be done with greater efficiency<sup>37</sup> and even enable the representation of shapes in 2D<sup>38</sup>. The aforementioned metamaterials are introducing specific phase delays on the acoustic wave and act as lenses that can focus or steer the wave. Our approach is also based on the phase delays that acoustic elements are introducing. However, the proposed reflecting grid of surfaces is adopting the acoustic energy coming from the reflections to create more stable and independent traps in selected positions.

Currently, the dominant method to create more than one independent trap at certain locations incorporates a phased array of transducers, where each set of transducers is responsible for one trap<sup>39</sup>. Nonetheless, a phased array requires the individual control of each transducer which requires elaborate and pricy electronics. Further, every new trap will weaken the strength and stability of the entire group of traps, as less transducers will contribute per trap. This seriously limits the maximum number of stable traps per array.

In the microworld an electronically controlled acoustic tweezer was used to demonstrate multiple Bessel function shaped traps by calculating the applied signals for each desired trap accordingly and then performing a linear superposition<sup>40</sup>. The acoustic tweezers consist of a circular 64-element ultrasonic array operating in the MHz region and they can manipulate polystyrene spheres in the  $\mu\text{m}$  region in diameter. However, this method can only be applied in small wavelengths signals and therefore manipulate small objects.

Here we propose a setup that maximizes the traps' strength, for an ultrasound field of any frequency, by adopting a grid of reflecting surfaces that is able to manipulate the generated pressure and shape the sound-field in order to create multiple levitation points. Adopting this method means that the transducers do not need to be connected to complicated electronics driving their phases and amplitudes as they only need to be in phase and emit, for better results, in their maximum power.

The computational method and the algorithm for the setup are described in detail. The first step is to introduce the physical parameters of the transducers, the reflecting grid and the positions of the levitated objects. From here the algorithm uses heuristic optimisation technique to calculate the optimal displacements for the grid of reflectors to be installed opposite the transducer or the array of transducers. Our goal is to shape the pressure field around certain points and create acoustic traps. The only functionable variables in this apparatus are the vertical displacements of the grid's reflectors. This is a nonlinear problem that requires global optimization. For nonlinear problems where finding an approximation of the global optimum is more important than finding a more precise local optimum, simulated annealing (SA) optimizer is preferable to alternatives, such as gradient descent. Thus, our algorithm is incorporating SA as it is a more suitable optimizer for our problem.

## 1. Method

An algorithm that calculates the optimized set of displacements for a grid of reflectors per input set of parameters is coded in Rust programming language. The output displacements are introduced in a MATLAB algorithm that simulates the signals and by discretizing the field calculates and plots the pressure field in 3D.

Firstly, the algorithm calculates the pressure at the chosen levitation points, as a factor of reflectors' displacements,  $Z_n$ . It should be noted here that, for simplification reasons, higher than second order reflections and attenuation due to distance or the reflections, were not considered. The above simplifications can be made and not significantly affect the accuracy of the simulation as we constrain the emission frequency in the ultrasound region, the reflecting surfaces been made from a non-absorptive/porous material and the reference distance from the transducer to the grid to be less than  $20\lambda$  ( $h < 20\lambda$ ). Further, it is assumed that the levitation points are above  $2\lambda$  from the transducer (vibrating plate with planar propagation) or the array of single phased transducers. Therefore, the emitted signal can be simulated as a plane propagated signal. The reflectors' were simulated as point sources with emissions' directivity<sup>41</sup>, emitting from their image location and utilizing the image source method<sup>42</sup>. Thus, the pressure at any position with (x, y, z) Cartesian coordinates can be calculated by equation (1):

$$p = \underbrace{p_0 e^{ikz}}_{\text{direct signal}} * \underbrace{p_0 \sum_{n=1}^{N^2} H_{(n)} e^{ikd_{im(n)}}}_{\text{reflection signals}} \quad (1)$$

Where  $p_0$  is the transducer's reference pressure,  $k$  is the wavenumber  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , \* denotes the convolution,  $N^2$  is the total number of reflecting surfaces,  $d_{im}$  is the distance from the image reflectors' positions to the traps' positions. The reflecting surfaces' directivity  $H$  is calculated by<sup>41</sup>:

$$H_{(n)} = \left| \text{sinc} \left( \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta_{(n)} \cos \varphi_{(n)} \right) \text{sinc} \left( \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_{(n)} \sin \varphi_{(n)} \right) \right| \quad (2)$$

Where:  $a$ ,  $b$  are the reflecting surfaces dimensions,  $\theta$  the azimuthal angle  $\theta_{(n)} = \arccos \left( \cos \frac{z-(h-z_{(n)})}{d_{re(n)}} \right)$  and  $\varphi$  the elevational angle  $\varphi_{(n)} = \arctan \left( \frac{y-y_{(n)}}{z-x_{(n)}} \right)$ , as shown in Figure 1. For  $d_{re}$  being the distance from the real reflectors' positions to the traps' positions.

Then the Gorkov's potential is calculated by equation<sup>2</sup> (3):

$$U = k_1 |p|^2 - k_2 \left( |p_x|^2 + |p_y|^2 + |p_z|^2 \right) \quad (3)$$

Where,

$k_1 = \frac{2\pi}{3} a_T^3 \kappa_0 (1 - \tilde{\kappa})$ ,  $k_2 = a_T^3 \pi \rho_0 \frac{2(\tilde{\beta}-1)}{2\tilde{\beta}+1}$ ,  $a_T$  is the trap's radius,  $\tilde{\kappa} = \frac{\kappa_p}{\kappa_0}$ , with  $\kappa_p$  and  $\kappa_0$  being the object's and the medium's compressibility factors, respectively and

$\tilde{\rho} = \frac{\rho_p}{\rho_0}$ , with  $\rho_p$  and  $\rho_0$  being the object's and the medium's densities, respectively and  $p_x, p_y$  and  $p_z$  are the first order derivatives of the pressure over x, y and z coordinates.

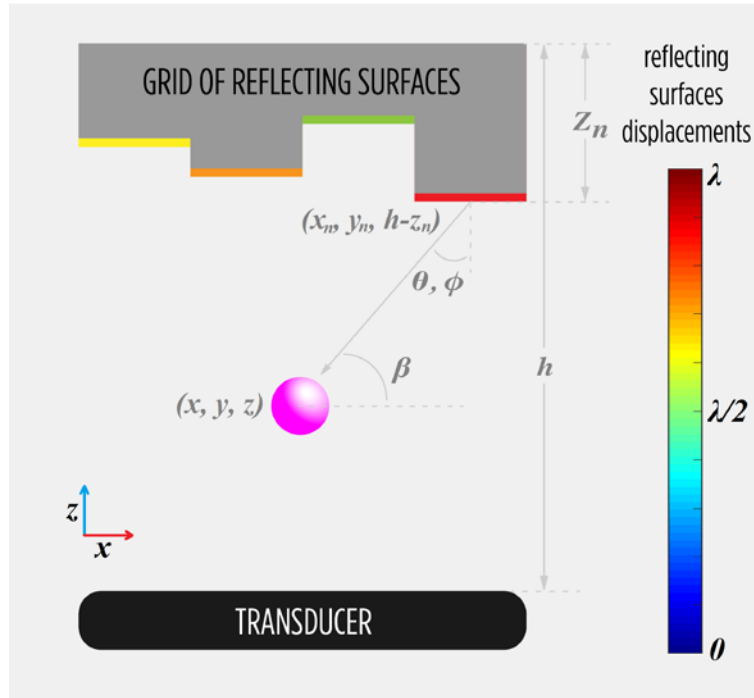


Figure 1. 2D representation of the proposed model showing a. the angles to calculate both the reflectors' directivity and their weighting, the reference distance between the transducer and the reflectors' and the grid's height displacements b. the transducer, the grid of reflecting surface and the sound waves.

### 1.1 Optimizer

We define a levitation point by constraining the summation of the absolute value of the pressure with the negative Laplacian of the Gorkov's potential at this point to be less than K. Assuming that the trap's diameter is significantly smaller than the sound-field's wavelength<sup>2</sup>, the value of K is dependant only on the levitated particles' and the medium's density. In this work we show computational results for the levitation of polystyrene beads in the air and therefore the factor K needs to be less than 400.

The brute-force calculation of the optimum reflectors' heights in order to create one or more acoustic traps is not computationally possible as there are an extensive number of permutations. As an example, even a small grid of  $4 \times 4$  reflectors and only 5 height displacement steps ( $z_n$ ) per reflector, the number of permutations is around  $10^{11}$ .

The method used to obtain the optimal reflectors' displacements in order to create acoustic traps at given locations is a SA algorithm<sup>43</sup>. SA is a nonlinear optimizer that

can approximate the global minimum of a given function, commonly known as the objective function. The simulation of annealing can be either executed by a solution of kinetic equations for density functions<sup>44</sup> or by using the stochastic sampling method<sup>45</sup>. The method used here is an adaptation of the Metropolis–Hastings algorithm, a Monte Carlo method to generate sample states of a thermodynamic system<sup>46</sup>. It is less computationally expensive to minimize a function rather than maximizing it; therefore, we minimize the negative function  $-f$  instead of maximizing the function  $f$ . In order to minimize the pressure, maximize the Laplacian of the Gorkov's potential and to ensure that the solution fulfils the levitation requirement for every selected position, the objective function formed is:

$$O_{(z_n)} = \sum_{m=1}^M (|p_{m(z_n)}| - \Delta U_{m(z_n)} + Q_{m(z_n)}) \quad (4)$$

Where  $M$  is the number of traps,  $\Delta U = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz}$  is the Laplacian of the Gorkov's potential, with  $U_{xx}$ ,  $U_{yy}$  and  $U_{zz}$  being the second order derivatives of the Gorkov's potential over x, y and z coordinates,  $Q$  is a function that equals zero when the requirement for levitation is fulfilled otherwise equals a large number ( $L$ ).

$$Q_{m(z_n)} = \begin{cases} 0, & \text{for } |p_{m(z_n)}| - \Delta U_{m(z_n)} < K \\ L, & \text{for } |p_{m(z_n)}| - \Delta U_{m(z_n)} \geq K \end{cases}$$

By adding  $Q$  function in equation (4), when the levitation requirement is not fulfilled the SA will look for another set of values as the objective function is not minimized.

### 1.2 Weighting

In order to optimize the random reflectors' displacement values ( $z_n$ ) that SA generates at every iteration and more efficiently track down the optimum set of candidates, we applied a weighting factor to each reflecting surface. The algorithm considering the effectiveness of each reflector to each trap and then averaging the results:

$$W = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M W_m \quad (5)$$

Where,

$$W_m = \begin{bmatrix} \widehat{\sin \beta_{m(1,1)}} & \cdots & \widehat{\sin \beta_{m(1,N)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{\sin \beta_{m(N,1)}} & \cdots & \widehat{\sin \beta_{m(N,N)}} \end{bmatrix}$$

for  $N \times N$  reflecting surfaces,  $\widehat{\sin \beta_{m(n)}} = \frac{(h+z_n)-z_m}{a_n}$  and the accent  $\widehat{\phantom{x}}$  denotes the normalization. The weighting representation example for a grid of  $16 \times 16$  reflecting surfaces with one and two traps in the middle and in symmetrical opposing positions from the middle of the grid, respectively, is shown in Figure 2.

The weighting, equation (5), is considered in order to optimize the generation of the random displacement values ( $z_n$ ) at every iteration of SA. The weighting factor denotes the likelihood to change the previous randomly generated displacement

value of each reflector, at every new iteration, and create a new set of random values.

The matrix  $R^q$  with  $N^2$  randomly generated set of values, one for each  $z_d$  reflector's displacement, from 0 to  $\lambda$  is coded as shown in coding formula (6).

$$R^q = \underbrace{\left[ \frac{R_\lambda + R_\lambda E_W}{2R_\lambda} \right]}_{\text{generate new set of values}} R_\lambda + \underbrace{\left[ J - \frac{R_\lambda + R_\lambda E_W}{2R_\lambda} \right]}_{\text{keep the previous set of values}} R^{q-1} \quad (6)$$

Where,  $q$  is the current iteration,  $R_\lambda$  is a matrix of  $N^2$  random elements from 0 to  $\lambda$ ,  $J$  is a  $N^2$  elements matrix of ones,  $R^0$  (at the first iteration) would be the training values which are small random numbers,  $E_W = \frac{R_1 - R_1 + \gamma}{\frac{R_1}{W} - \frac{R_1}{1-W} + \gamma}$ , for  $R_1$  been a matrix of  $N^2$  random elements from 0 to 1 and  $\gamma$  is a small constant value that ensures that the result will not be zero. The proposed model with the levitated objects creating a smiley face is shown in Figure 3.

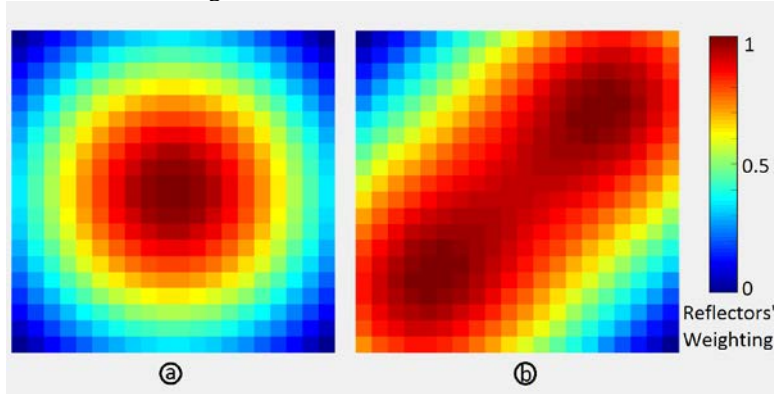


Figure 2. Weighting representation example for a grid of 16\*16 reflecting surfaces with a. one and b. two traps, in the middle and in symmetrical opposing positions from the middle of the grid, respectively.

### 1.3 Operation

After setting the traps locations, the number, the reference height ( $h$ ) and the dimensions of the grid's reflectors, the transducer's max emission pressure and frequency, the algorithm calculates the optimum displacements for the grid's reflecting surfaces. For the grid to be more effective, and also comply with the limitation raised in the method section, it should not be far from the transducer ( $<20\lambda$ ). It should be noted here that according to the Nyquist theorem, reconstructing a sound field of a specific frequency without artefacts will require the sound sources (in the proposed setup the reflecting surfaces) to be placed at a distance of less than half of the wavelength ( $\lambda/2$ ). Therefore, the maximum proposed dimensions for the reflectors would be  $\lambda/2 \times \lambda/2$ .

## 2. Results and discussion

This and the standing wave levitation methods are both limited; vertical distances between the traps must be a multiple of half of a wavelength ( $\lambda/2$ ). However, the advantage of our method is that in a horizontal distance of larger than  $5\lambda$  the set of vertical positions can be shifted up or down. In Figure 3 three different horizontal distances between the levitation points are shown as the vertical distance between the two points is set to 1mm. The distances between the levitation points are  $5\lambda$ ,  $4\lambda$  and  $3\lambda$  in Figures 3a, 3b and 3c, respectively. As the two levitation points are getting closer the required pressure fields, one for each trap, interfere and cancelling both levitation points.

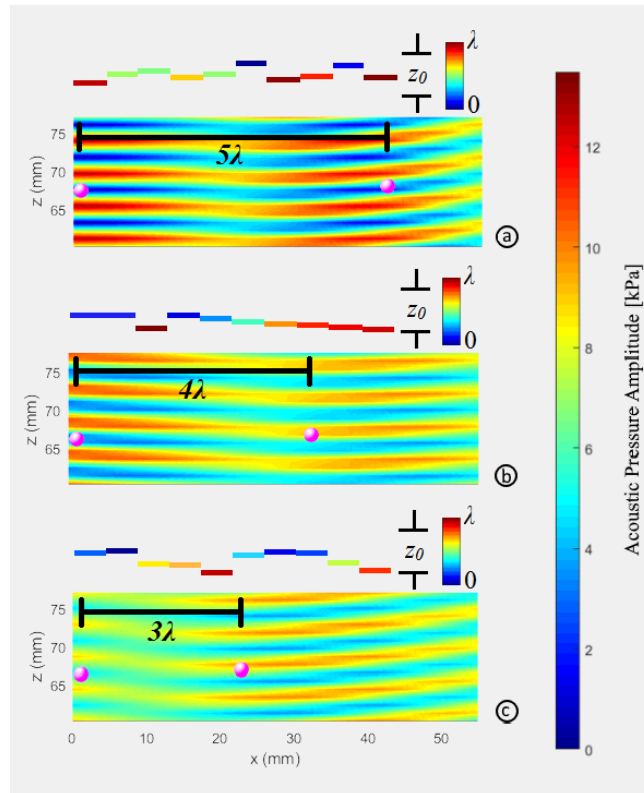
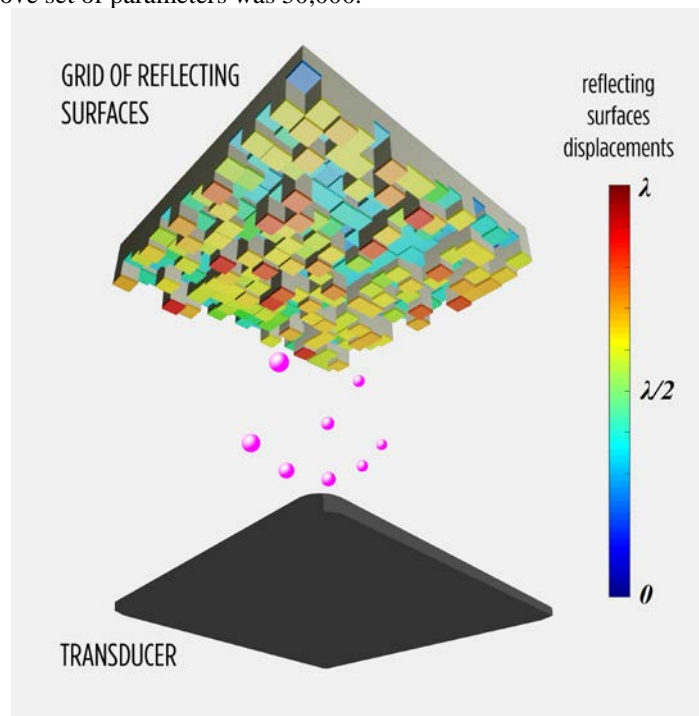


Figure 3. Pressure field and reflectors' displacements ( $z_0$ ) in a section of two traps with vertical distance 1mm and horizontal distance a.  $5\lambda$  b.  $4\lambda$  c.  $3\lambda$ . The interference between the two required pressure fields gets stronger as the levitation points get closer and cancelling each other out.

For the example shown here we used transducer's signal of 40kHz and the reflectors dimensions were set to  $a = b \approx 4.3\text{mm}$ . The reference distance from the transducer to the grid was set to  $h = 20\lambda \approx 171.5\text{mm}$ , the medium was set to air



and the levitated object was set to polystyrene sphere of 2mm in diameter. The number of traps was set to 8 forming a smiley face as shown in Figure 4. The number of reflecting surfaces was set to  $N^2=400$  (an array of  $20 \times 20$  reflectors), and the reference transducer pressure to  $p_0 = 6\text{kPa}$ . The number of traps, as well as the number of reflecting surfaces, play a significant role in the run-time of the algorithm. For example for a grid of  $N^2=400$  reflectors if there is a satisfactory solution ( $\sum_{m=1}^M Q_m(z_n) < K$ ) every new trap will delay the algorithm's run time approximately 4mins. SA's start temperature was set to 1000, the end temperature to 5 and the cooling down temperature step to 0.9999 and the number of iterations for the above set of parameters was 50,000.

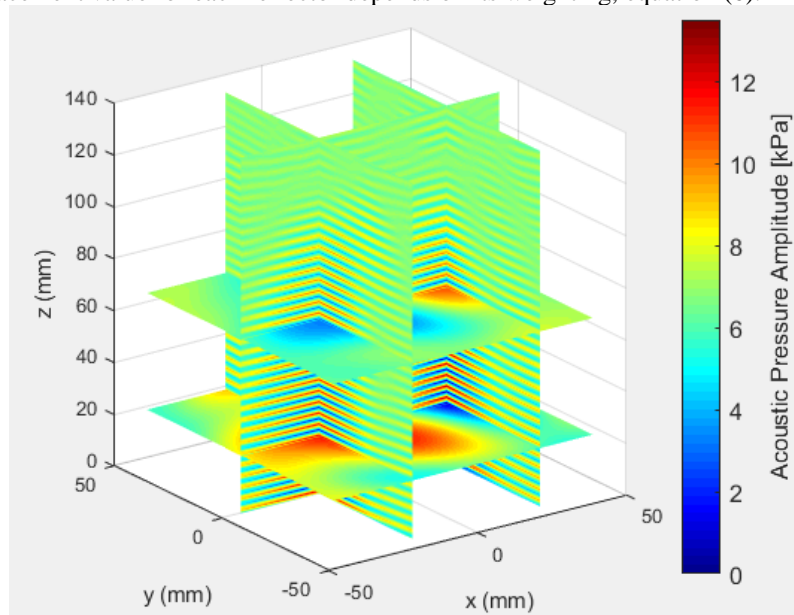


*Figure 4. 3D representation of the proposed model showing the transducer, the grid of 16x16 reflecting surfaces with various height displacements to create the acoustic traps in specific positions forming a smile with levitated polystyrene beads.*

The algorithm run on a computer with Windows 10 operating system, an AMD Ryzen 7 1700 eight core processor of 3GHz and 16GB of RAM. The SA optimizer implemented in Rust run 50,000 iterations in approximately 30mins for a  $20 \times 20$  grid of reflectors and 8 traps. The pressure field shown in Figures 3 and 5 is calculated with a MATLAB algorithm by calculating the absolute value of the pressure  $|p|$ , as described in equation (1), in a 3D discretized field with a  $\lambda/8$  discretization step. The relative pressure field in 3D is shown in Figure 5.

We here present an objective function, equation (4), that that can be introduced to any optimisation algorithm and find the optimal displacement values for a grid of reflectors, opposing a transducer, and create multiple independent acoustic traps in

the sound field. The objective function is formed in such a way in order to minimize the pressure, maximize the Laplacian of the Gorkov's potential and to ensure that the solution fulfils the levitation requirement for every selected position. Further, we optimize the random set of values the algorithm generates at each iteration. By taking into account the chosen levitation points we calculate the contribution of each reflecting surface in the creation of this set of traps and apply a weighting factor, equation (5). At each iteration the likelihood for the algorithm to generate a new displacement value for each reflector depends on its weighting, equation (6).



**Figure 5.** 3D representation of the pressure field and two traps located in  $x_1=26$ ,  $y_1=0$ ,  $z_1=23\text{mm}$  and  $x_2=-17$ ,  $y_2=0$ ,  $z_2=68\text{mm}$

### 3. Conclusion

Our proposed method, of a transducer and an opposing grid of reflectors with variable heights, is enabling the shaping of a strong pressure field and the creation of multiple independent levitation points. A static arrangement of levitated objects with only one transducer or an array of single phased transducers now becomes feasible by simply calculating the relevant reflectors' height displacements, 3D printing the reflectors' grid and installing it opposite the transducer(s). With our method there is no need for expensive and complicated electronics driving the transducers' phases and amplitudes to effectively shape the sound field for multiple levitation points.

Although we cannot calculate the reflectors' heights in real time at this point, we could predetermine various arrangements with levitated particles; and by pre-computing the relevant reflectors' heights, a dynamic grid of reflectors would manipulate the levitated objects independently in 3D. Therefore, configurations that change their shape over time could be formed bringing about the first acoustic levitation 3D display.

#### 4. References

1. Zhao, S. & Wallaschek, J. A standing wave acoustic levitation system for large planar objects. *Archive of Applied Mechanics* **81**, 123–139 (2011).
2. Bruus, H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip* **12**, 1014 (2012).
3. Xie, W. J. & Wei, B. B. Resonance shift of single-axis acoustic levitation. *Chinese Physics Letters* **24**, 135–138 (2007).
4. Mitri, F. G. Intrinsic acoustical cross sections in the multiple scattering by a pair of rigid cylindrical particles in 2D. *Journal of Physics D: Applied Physics* **50**, (2017).
5. Sommers, B. S. & Foster, J. E. Nonlinear oscillations of gas bubbles submerged in water: Implications for plasma breakdown. *Journal of Physics D: Applied Physics* **45**, (2012).
6. Hawkes, J. J., Cefai, J. J., Barrow, D. A., Coakley, W. T. & Briarty, L. G. Ultrasonic manipulation of particles in microgravity. *Journal of Physics D: Applied Physics* **31**, 1673–1680 (1998).
7. Xie, W. J., Cao, C. D., Lü, Y. J., Hong, Z. Y. & Wei, B. Acoustic method for levitation of small living animals. *Applied Physics Letters* **89**, 1–4 (2006).
8. Scheeline, A. & Behrens, R. L. Potential of levitated drops to serve as microreactors for biophysical measurements. *Biophysical Chemistry* **165–166**, 1–12 (2012).
9. Šrajer, V. & Schmidt, M. Watching proteins function with time-resolved x-ray crystallography. *Journal of Physics D: Applied Physics* vol. 50 Preprint at <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa7d32> (2017).
10. Wang, X., Gou, X., Chen, S., Yan, X. & Sun, D. Cell manipulation tool with combined microwell array and optical tweezers for cell isolation and deposition. *Journal of Micromechanics and Microengineering* **23**, (2013).
11. Lü, Y. J., Xie, W. J. & Wei, B. Observation of ice nucleation in acoustically levitated water drops. *Applied Physics Letters* **87**, 1–3 (2005).
12. Tuckermann, R., Puskar, L., Zavabeti, M., Sekine, R. & McNaughton, D. Chemical analysis of acoustically levitated drops by Raman spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **394**, 1433–1441 (2009).
13. Caccamo, M. T., Cannuli, A., Calabrò, E. & Magazù, S. Acoustic Levitator Power Device: Study of Ethylene-Glycol Water Mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **199**, (2017).
14. Chainani, E. T., Choi, W. H., Ngo, K. T. & Scheeline, A. Mixing in colliding, ultrasonically levitated drops. *Analytical Chemistry* **86**, 2229–2237 (2014).
15. Vi, C. T., Ablart, D., Arthur, D. & Obrist, M. Gustatory interface: the challenges of ‘how’ to stimulate the sense of taste. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCHI International Workshop on Multisensory Approaches to Human-Food Interaction* 29–33 (2017).
16. Vi, C. T. *et al.* TastyFloats : A Contactless Food Delivery System. *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces* 161–170 (2017) doi:10.1145/3132272.3134123.
17. Omirou, T., Marzo, A., Seah, S. A. & Subramanian, S. LeviPath. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15* 309–312 (2015) doi:10.1145/2702123.2702333.

18. Norasikin, M. A. *et al.* SoundBender: dynamic acoustic control behind obstacles. in *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* 247–259 (ACM, 2018).
19. Freeman, E., Anderson, R., Andersson, C., Williamson, J. & Brewster, S. Floating Widgets. *Proceedings of the Interactive Surfaces and Spaces on ZZZ - ISS '17* 417–420 (2017) doi:10.1145/3132272.3132294.
20. Sahoo, D. R. *et al.* JOLED: A Mid-air Display based on Electrostatic Rotation of Levitated Janus Objects. *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16* 437–448 (2016) doi:10.1145/2984511.2984549.
21. Uno, Y. *et al.* Luciola: A Millimeter-Scale Light-Emitting Particle Moving in Mid-Air Based On Acoustic Levitation and Wireless Powering: A Millimeter-Scale Light-Emitting Particle Moving in Mid-Air Based On Acoustic Levitation and Wireless Powering. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol. Article 1*, 1–17 (2017).
22. Brandt, E. H. Levitation in physics. *Science* 349–355 (1989).
23. Matsui, T., Ohdaira, E., Masuzawa, N. & Ide, M. Translation of an object using phase-controlled sound sources in acoustic levitation. *Japanese Journal of Applied Physics* **34**, 2771–2773 (1995).
24. Mitome, H. Ultrasonic levitation and accompanying acoustic streaming. *Japanese Journal of Applied Physics* **28**, 146–148 (1989).
25. Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A. & Poulidakos, D. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**, 12549–12554 (2013).
26. Xie, W. J., Cao, C. D., Lü, Y. J., Hong, Z. Y. & Wei, B. Acoustic method for levitation of small living animals. *Appl Phys Lett* **89**, 1–4 (2006).
27. Scheeline, A. & Behrens, R. L. Potential of levitated drops to serve as microreactors for biophysical measurements. *Biophys Chem* **165–166**, 1–12 (2012).
28. Lü, Y. J., Xie, W. J. & Wei, B. Observation of ice nucleation in acoustically levitated water drops. *Appl Phys Lett* **87**, 1–3 (2005).
29. Polychronopoulos, S. & Memoli, G. Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials. *Sci Rep* **10**, 1–10 (2020).
30. Freeman, E., Anderson, R., Andersson, C., Williamson, J. & Brewster, S. Floating Widgets. *Proceedings of the Interactive Surfaces and Spaces on ZZZ - ISS '17* 417–420 (2017) doi:10.1145/3132272.3132294.
31. Sahoo, D. R. *et al.* JOLED: A Mid-air Display based on Electrostatic Rotation of Levitated Janus Objects. *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16* 437–448 (2016) doi:10.1145/2984511.2984549.
32. Omirou, T., Marzo, A., Seah, S. A. & Subramanian, S. LeviPath. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15* 309–312 (2015) doi:10.1145/2702123.2702333.
33. Marzo, A., Caleap, M. & Drinkwater, B. W. Acoustic Virtual Vortices with Tunable Orbital Angular Momentum for Trapping of Mie Particles. *Physical Review Letters* **120**, 044301 (2018).
34. Yano, R., Aoyagi, M., Tamura, H. & Takano, T. Novel transfer method using near-field acoustic levitation and its application. *Japanese Journal of Applied Physics* **50**, 0–5 (2011).

35. Andrade, M. A. B., Okina, F. T. A., Bernassau, A. L. & Adamowski, J. C. Acoustic levitation of an object larger than the acoustic wavelength. *The Journal of the Acoustical Society of America* **141**, 4148–4154 (2017).
36. Andrade, M. A. B., Polychronopoulos, S., Memoli, G. & Marzo, A. Experimental investigation of the particle oscillation instability in a single-axis acoustic levitator. *AIP Adv* **9**, 35020 (2019).
37. Memoli, G. *et al.* Metamaterial bricks and quantization of meta-surfaces. *Nature Communications* **8**, 1–8 (2017).
38. Melde, K., Mark, A. G., Qiu, T. & Fischer, P. Holograms for acoustics. *Nature* **537**, 518–522 (2016).
39. Marzo, A. *et al.* Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications* **6**, 1–7 (2015).
40. Courtney, C. R. P. *et al.* Independent trapping and manipulation of microparticles using dexterous acoustic tweezers. *Applied Physics Letters* **104**, 1–5 (2014).
41. Fan, Y., Honarvar, F., Sinclair, A. N. & Jafari, M.-R. Circumferential resonance modes of solid elastic cylinders excited by obliquely incident acoustic waves. *The Journal of the Acoustical Society of America* **113**, 102–113 (2003).
42. Mintzer, D. Transient Sounds in Rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America* **21**, 463 (1949).
43. Ingber, L. Simulated annealing: Practice versus theory. *Mathematical and Computer Modelling* **18**, 29–57 (1993).
44. Khachaturyan, A., Semenovskaya, S. & Vainshtein, B. The thermodynamic approach to the structure analysis of crystals. *Acta Crystallographica Section A* **37**, 742–754 (1981).
45. Semenovskaya, S. V., Khachaturyan, K. A. & Khachaturyan, A. G. Statistical mechanics approach to the structure determination of a crystal. *Acta Crystallographica Section A* **41**, 268–273 (1985).
46. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. & Teller, E. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal Chemical Physics* **21**, 1087–1092 (1953).

## ***Επισκόπηση επί της ιχνηλασιμότητας της μονάδας watt στον αερόφερτο ήχο***

Σπύρος Μπρέζας  
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής  
Ελληνικό Μεσογειακό  
Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και  
Ακουστικής  
Ε. Δασκαλάκη, 71433, Ρέθυμνο  
sbrezas@hmu.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ακουστική ισχύς είναι μία σημαντική και ευρέως χρησιμοποιούμενη ακουστική ποσότητα. Μπορεί να προσδιοριστεί μέσω μετρήσεων ηχητικής πίεσης ή ηχητικής έντασης. Παρόλη τη δυνατότητα εφαρμογής αρκετών διαφορετικών μεθόδων προσδιορισμού, τα αποτελέσματα διαφέρουν μεταξύ τους, κυρίως λόγω των διαφορετικών θεωρητικών υποθέσεων. Η καθιέρωση της ιχνηλασιμότητας της μονάδας watt στον αερόφερτο ήχο, στοχεύει στην υπερκέραση των σύγχρονων ελλείψεων. Η εργασία εξηγεί την αλυσίδα των μετρήσεων που απαιτείται για την καθιέρωση της ιχνηλασιμότητας. Επίσης, παραθέτονται πιθανές βελτιώσεις των τρεχουσών μεθόδων. Πραγματοποιήθηκε έρευνα στα πλαίσια χρηματοδοτούμενου προγράμματος μετρολογίας. Η διερεύνηση που διεξήχθη περιλάμβανε θεωρητική μοντελοποίηση σε συνάρτηση με μετρήσεις, τόσο σε συνθήκες βαθμονόμησης όσο και επιτόπιες, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται. Εκτός από τις μετρήσεις και τις απαιτούμενες διορθώσεις, προσδιορίστηκε επίσης η σχετική αβεβαιότητα με ένα διαφανή προϋπολογισμό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε παράγοντας αβεβαιότητας εκτιμήθηκε ξεχωριστά, φανερώνοντας τη συμβολή του στη συνολική αβεβαιότητα.*

### ***Traceability of the unit watt: an overview in airborne sound***

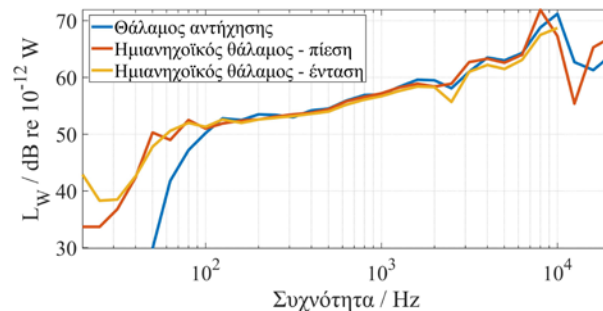
#### **ABSTRACT**

*Sound power is an important and widely used acoustic quantity. It can be determined by sound pressure or sound intensity measurements. Despite the applicability of a number of different sound power determination methods, the results deviate from one another, mainly due to the different theoretical assumptions. The establishment of traceability of unit watt in airborne sound aims at overcoming the up-to-date deficiencies. The study explains the measurement chain that is required for*

establishing the traceability. The potential improvements of the current sound power determination methods are discussed. A research was performed within a funded metrology programme. The performed investigation included theoretical modelling along with measurements in both calibration conditions and in situ, results of which are presented. Apart from measurements and the required corrections, the related uncertainty was also determined in a transparent budget. This means each uncertainty factor was individually estimated and its contribution to the combined uncertainty revealed.

## Εισαγωγή

Η εκπεμπόμενη ακουστική ισχύς είναι ποσότητα που περιγράφει τις ακουστικές ιδιότητες μίας πηγής και ως εκ τούτου είναι τεκμηριωμένη και χρησιμοποιείται ευρέως. Η χρήση της ηχητικής ισχύος ως δείκτης περιγραφής μίας ηχητικής πηγής δύναται να αποτελέσει ένα πλεονέκτημα για ένα πιο ήσυχο περιβάλλον με επαρκώς ενημερωμένους αγοραστές μηχανημάτων ή οικιακών συσκευών. Η σημαντικότητα της ηχητικής ισχύος αποτυπώνεται σε διάφορες ευρωπαϊκές οδηγίες, όπως στην οδηγία για χρήση εξοπλισμού σε εξωτερικούς χώρους [1]. Λόγω της μη δυνατότητας απευθείας μέτρησής της, η ηχητική ισχύς προσδιορίζεται με έμμεσες μεθόδους. Τα αποτελέσματα της ηχητικής ισχύος μετρούνται μέσω της ηχητικής πίεσης ή της ηχητικής έντασης. Η σειρά προτύπων ISO 3740 περιγράφει τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος μέσω μετρήσεων της ηχητικής πίεσης και η σειρά ISO 9614, μέσω μετρήσεων της ηχητικής ισχύος. Παρόλη τη γνώση που έχει αποκτηθεί για την ηχητική ισχύ, οι μετρήσεις επηρεάζονται από τις συνθήκες του ηχητικού πεδίου όπου πραγματοποιούνται. Επί του πρακτέου, μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων προσδιορισμού της ηχητικής ισχύος παρατηρούνται αποκλίσεις, παρά τη χρήση των πλέον σύγχρονων τεχνικών μέτρησης.



Σχήμα 1 Στάθμη ηχητικής ισχύος πηγής με τη χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων μέτρησης

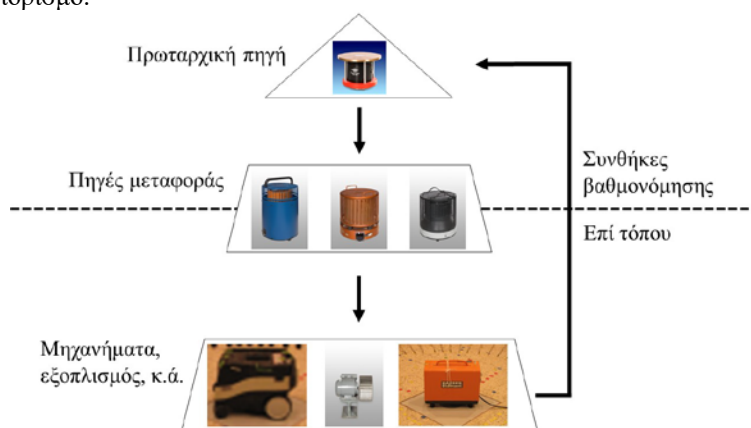
Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η στάθμη ηχητικής ισχύος μίας πηγής, η οποία προσδιορίστηκε μέσω της ηχητικής πίεσης και της ηχητικής έντασης σε διαφορετικά ακουστικά πεδία. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις για συχνότητες μικρότερες των 100 Hz. Ένα βασικό μειονέκτημα των τρεχουσών μεθόδων προσδιορισμού είναι ο περιορισμός εφαρμογής των μεθόδων σε χαμηλές συχνότητες (100 Hz για τη μέθοδο της ηχητικής πίεσης και 50 Hz για τη μέθοδο της ηχητικής έντασης).

Εκτός από την ηχητική ισχύ, η σχετική αβεβαιότητα που περιγράφεται στα πρότυπα αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Αυτό δεν επιτρέπει ούτε το διαχωρισμό των διαφορετικών συντελεστών της αβεβαιότητας ούτε την ποσοτική τους εκτίμηση.

## 1. Ιχνηλασιμότητα

Κεντρική ιδέα της παρουσιαζόμενης έρευνας αποτελεί μία καινούργια αντίληψη για τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος. Η αντίληψη είναι η αναφορά της επιτόπιας ηχητικής ισχύος μίας πραγματικής πηγής (π.χ. μηχανήμα, εξοπλισμός κ.ά.) στην ηχητική ισχύ της σε ελεύθερο πεδίο. Στη μετρολογία, αυτή η αναφορά περιγράφεται με την ιχνηλασιμότητα, η οποία ορίζεται ως η ιδιότητα ενός αποτελέσματος μέτρησης, όταν μπορεί να σχετιστεί με μία τιμή αναφοράς ακολουθώντας μία αδιάσπαστη αλυσίδα βαθμονομήσεων [2].

Στο σχήμα 1.1 απεικονίζεται η αλυσίδα της ιχνηλασιμότητας της μονάδας watt για αερόφερτο θόρυβο. Η ιχνηλασιμότητα περιλαμβάνει τρεις κατηγορίες πηγών. Η πρώτη είναι η πρωταρχική πηγή (ΠΠ), της οποίας η ηχητική ισχύς σε ελεύθερο πεδίο είναι γνωστή και αποτελεί την πηγή αναφοράς για όλες τις υπόλοιπες. Για αυτό το λόγο βρίσκεται σε ελεγχόμενες συνθήκες βαθμονόμησης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις πηγές μεταφοράς (ΠΜ), των οποίων η κύρια χρήση είναι η διάδοση (μεταφορά) της μονάδας από συνθήκες βαθμονόμησης σε πραγματικά περιβάλλοντα. Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τις πηγές, των οποίων η ηχητική ισχύς είναι υπό προσδιορισμό.



Σχήμα 1.1 Αλληλουχία ιχνηλασιμότητας για τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος σε αερόφερτο θόρυβο

Το εργαλείο για την καθιέρωση της ιχνηλασιμότητας είναι η μέθοδος αντικατάστασης (αναφέρεται επίσης και ως μέθοδος σύγκρισης), η οποία επιτρέπει τον προσδιορισμό της άγνωστης (ΑΓΝ) ηχητικής ισχύος μίας πηγής μέσω σύγκρισης με τη γνωστή (ΓΝ) ηχητική ισχύ μίας άλλης πηγής. Η μέθοδος αντικατάστασης χρησιμοποιείται ήδη στη μέθοδο της ηχητικής πίεσης [3]. Περιγράφεται από

$$L_{W,\Gamma N} = L_{W,A\Gamma N} + \overline{L_{p,\Gamma N}} - \overline{L_{p,A\Gamma N}} \quad (1.1)$$



όπου  $L_W$  είναι η στάθμη ηχητικής ισχύος και  $\overline{L_p}$  η ενεργειακή μέση στάθμη ηχητικής πίεσης για όλη τη διάρκεια και την επιφάνεια της μέτρησης.

## 2. Καινοτομίες ηχητικής ισχύος

Η χρήση της μεθόδου αντικατάστασης θα επιτρέψει την αναφορά της επιτόπιας στάθμης ηχητικής ισχύος στη στάθμη ηχητικής ισχύος σε ελεύθερο πεδίο. Φαινόμενα που επηρεάζουν τα αποτελέσματα στις χαμηλές συχνότητες, όπως το εγγύς πεδίο και συντονισμοί του χώρου, θα μπορούσαν να αποφευχθούν με τη χρήση της ηχητικής έντασης αντί της πίεσης. Για το λόγο αυτό, η μελέτη περιλαμβάνει και μετρήσεις ηχητικής έντασης, με την εξίσωση 1.1 να τροποποιείται στην

$$L_{W,GN} = L_{W,AGN} + \overline{L_{I,GN}} - \overline{L_{I,AGN}} \quad (2.1)$$

όπου  $\overline{L_I}$  η ενεργειακή μέση στάθμη ηχητικής έντασης για όλη τη διάρκεια και την επιφάνεια της μέτρησης.

Η υπέρβαση των παροντικών περιορισμών θα επιτρέψει τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος σε συχνότητες μικρότερες των 50 Hz. Για τη διεύρυνση της εφαρμογής της μεθόδου σε ηχητικές πηγές με τονικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιήθηκε και στενού εύρους συχνοτική ανάλυση (FFT, 3125 γραμμών).

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας στον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος είναι η κατευθυντικότητα της πηγής. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μέτρησης είναι η εικονική ημισφαιρική επιφάνεια μέτρησης [4], μέσω της περιστροφής της πηγής σε συνδυασμό με την κίνηση ενός μικροφώνου σε ένα κυκλικό τεταρτημόριο. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, μία ειδικά κατασκευασμένη συσκευή επέτρεψε μετρήσεις ηχητικής πίεσης ή έντασης σαρώνοντας μία πραγματική ημισφαιρική επιφάνεια.

Σε κάθε βήμα της ιχνηλασιμότητας, η αντίστοιχη αβεβαιότητα προσδιορίστηκε παράλληλα. Αυτός ο τρόπος προσδιορισμού μπορεί στο τέλος της μεθόδου να διαθέσει ένα διαφανή τρόπο υπολογισμού της αβεβαιότητας για τη στάθμη ηχητικής ισχύος, η οποία μπορεί γενικώς να περιγραφεί από την εξίσωση

$$u^2(L_{W,GN}) = u^2(L_{W,AGN}) + u^2(\overline{L_{p/I,GN}} - \overline{L_{p/I,AGN}}) \quad (2.2)$$

όπου  $u$  είναι η διασπορά της πιθανότητας κατανομής της ποσότητας εντός της παρένθεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η διαφορά των σταθμών ηχητικής πίεσης ή έντασης και όχι οι στάθμες ξεχωριστά [2]. Η υποσημείωση  $p/I$  σημαίνει ηχητική πίεση ή ηχητική ένταση.

## 3. Θεωρητικοί υπολογισμοί

Η μέθοδος της αντικατάστασης μελετήθηκε αρχικά θεωρητικώς [5]. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες ελεύθερου πεδίου και για γεωμετρίες που συμπεριλάμβαναν ένα ανακλαστικό επίπεδο. Για τις ανακλάσεις θεωρήθηκε διάδοση επίπεδων και σφαιρικών κυμάτων. Το πλήθος και η τοποθέτηση των δεκτών ήταν επίσης υπό διερεύνηση, όπως επίσης και ο υπολογιστικός χρόνος για τον

υπολογισμό της μέσης ενεργειακής στάθμης ηχητικής πίεσης και έντασης. Η αντικατάσταση περιλάμβανε πηγές ίδιας ή διαφορετικής τάξης. Τα ζεύγη γνωστής-άγνωστης πηγής ήταν: μονόπολο-μονόπολο, δίπολο-δίπολο και μονόπολο-δίπολο. Η θέση της πηγής με την άγνωστη ηχητική ισχύ μετατοπιζόταν είτε οριζοντίως είτε καθέτως συγκριτικά με τη σταθερή πηγή της γνωστής ηχητικής ισχύος. Η στάθμη ηχητικής ισχύος μετά την εφαρμογή της μεθόδου αντικατάστασης συγκρίθηκε με τη θεωρητική στάθμη σε ελεύθερο πεδίο με σκοπό τον εντοπισμό των περιορισμών της μεθόδου. Η εμπέδηση των ορίων ήταν ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας της μελέτης. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών υπολογισμών συνηγορούν στη χρήση της ηχητικής έντασης κατά τη μέθοδο της αντικατάστασης.

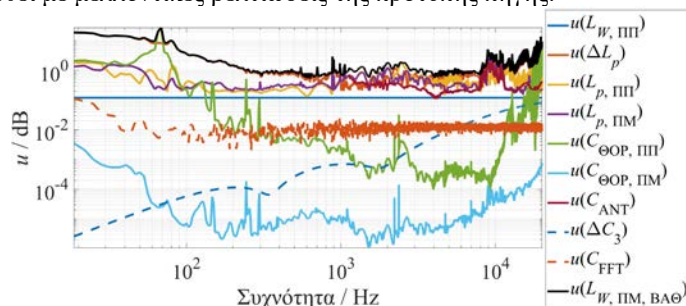
#### 4. Πειραματικοί υπολογισμοί

##### 4.1 Πηγές μεταφοράς σε συνθήκες βαθμονόμησης

Η συσκευή σάρωσης που προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση ηχητικής πίεσης και ηχητικής έντασης επί μίας ημισφαιρικής επιφάνειας μεταβαλλόμενης ακτίνας. Προσοχή δόθηκε για τη σταθερότητα της ανίχνευσης, το θόρυβο βάθους και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αντικατάστασης είναι η ακύρωση φαινομένων (λόγω του διαφορετικού προσήμου στις μέσες ενεργειακές στάθμες των εξισώσεων 1.1 και 2.1), τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα επηρέαζαν τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος (π.χ. ανακλάσεις από τη συσκευή σάρωσης).

Για την εφαρμογή της μεθόδου αντικατάστασης σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα, ως πηγές γνωστής ηχητικής ισχύος χρησιμοποιούνται αεροδυναμικές πηγές αναφοράς. Αυτό οδήγησε στη διερεύνηση χρήσης τέτοιων πηγών ως πηγές αναφοράς [6]. Αρχικά οι πηγές ελέγχθηκαν ότι πληρούσαν τις τρέχουσες πιστοποιημένες απαιτήσεις. Κατόπιν διερεύνησης και ανάλυσης, προσδιορίστηκε η στάθμη ηχητικής ισχύος των πηγών μεταφοράς σε συνθήκες βαθμονόμησης  $L_{W,PM,BA\theta}$  και η αντίστοιχη αβεβαιότητα  $u(L_{W,PM,BA\theta})$  σύμφωνα με το GUM [2]. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η συνδυασμένη αβεβαιότητα μαζί με τους επιμέρους παράγοντες που συνεισφέρουν σε αυτή για συχνοτική ανάλυση στενού ζωνικού εύρους. Σύμφωνα με τις σημειώσεις του σχήματος, οι παράγοντες: η αβεβαιότητα της στάθμης ηχητικής ισχύος της ΠΠ  $u(L_{W,PP})$ , η αβεβαιότητα της διαφοράς των μέσων ενεργειακών σταθμών πίεσης  $u(\Delta L_p)$ , η αβεβαιότητα της μέσης ενεργειακής στάθμης ηχητικής πίεσης της ΠΠ  $u(L_{p,PP})$  χωρίς διόρθωση θορύβου βάθους, η αβεβαιότητα της μέσης ενεργειακής στάθμης ηχητικής πίεσης της ΠΜ  $u(L_{p,PM})$  χωρίς διόρθωση θορύβου βάθους, η αβεβαιότητα λόγω του θορύβου βάθους κατά τη μέτρηση της ΠΠ  $u(C_{\theta OP,PP})$ , η αβεβαιότητα λόγω του θορύβου βάθους κατά τη μέτρηση της ΠΜ  $u(C_{\theta OP,PM})$ , η αβεβαιότητα λόγω της χρήσης του αντιανέμιου (για την καταστολή του ανέμου που προκαλείται κατά τη λειτουργία των πηγών μεταφοράς)  $u(C_{ANT})$ , η αβεβαιότητα της απορρόφησης από τον αέρα  $u(C_3)$  και η αβεβαιότητα λόγω της χρήσης του χρονικού παραθύρου κατά την ανάλυση FFT  $u(C_{FFT})$ . Σημειώνεται ότι για τις μετρήσεις της ΠΠ χρησιμοποιήθηκε τετραγωνικό παράθυρο και για τις πηγές μεταφοράς παράθυρο Hanning). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι παράγοντες με τη μεγαλύτερη συνεισφορά είναι αυτοί της διαφοράς των σταθμών και του θορύβου

βάθους κατά τη μέτρηση της ΠΠ. Ο πρώτος σχετίζεται με το εγγύς πεδίο και εναπομείναντες συντονισμούς του δωματίου μέτρησης, ενώ ο δεύτερος αναμένεται να βελτιωθεί με μελλοντικές βελτιώσεις της πρότυπης πηγής.



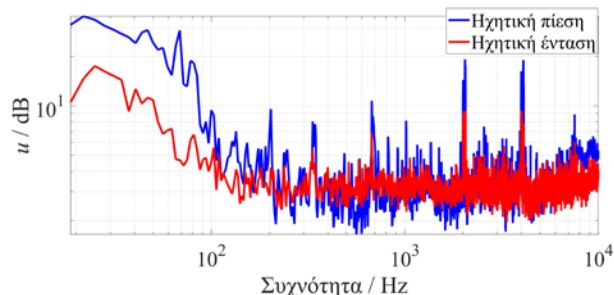
Σχήμα 4.1 Ανάλυση της αβεβαιότητας της στάθμης ηχητικής ισχύος των πηγών μεταφοράς σε συνθήκες βαθμονόμησης

#### 4.2 Πηγές μεταφοράς σε επιτόπιες συνθήκες

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται πως η στάθμη ηχητικής ισχύος των ΠΜ πρέπει να προσδιοριστεί σε συνθήκες βαθμονόμησης, αλλά και επί τόπου. Συνεπακολούθως, για την αλλαγή των συνθηκών πρέπει να εφαρμοστεί στους υπολογισμούς μία διόρθωση, η οποία θα σχετίζεται με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ηχητική ισχύ της ΠΜ. Αυτοί είναι η ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα περιστροφής της φτερωτής. Για την επίδραση κάθε παράγοντα πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις, από τις οποίες εξήχθησαν οι αντίστοιχοι διορθωτικοί παράγοντες [7]. Η προτεινόμενη διόρθωση παρέχει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με μία εναλλακτική διόρθωση [7].

#### 4.3 Πραγματικές πηγές σε επιτόπιες συνθήκες

Το τελευταίο στάδιο της ιχνηλασιμότητας είναι ο προσδιορισμός της στάθμης ηχητικής ισχύος πραγματικών πηγών (π.χ. μηχανήματα, εξοπλισμός κ.ά.). Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε μέσω ηχητικής πίεσης και ηχητικής έντασης. Η έρευνα εστίασε και στην επιφάνεια μέτρησης (διακριτά σημεία ή ανίχνευση) και στο περιβάλλον μέτρησης (δωμάτια διαφορετικού όγκου και απορρόφησης). Κάποιες από τις υπό μέτρηση πηγές είχαν τονικά συχνотικά χαρακτηριστικά. Η σύγκριση της στάθμης ηχητικής ισχύος μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου με τη στάθμη ηχητικής ισχύος προσδιορισμένης απευθείας μετά από μετρήσεις ηχητικής πίεσης και ηχητικής έντασης οδήγησε σε διαφορές άνω των 20 dB για συχνότητες μικρότερες των 60 Hz. Η μεγαλύτερη συμβολή στην αβεβαιότητα προκύπτει από τη διαφορά των μέσων ενεργειακών σταθμών της πραγματικής πηγής με την ΠΜ. Ο ίδιος παράγοντας έχει τη μεγαλύτερη συμβολή και στην περίπτωση μετρήσεων ηχητικής έντασης.



Σχήμα 4.2 Συνδυασμένη αβεβαιότητα της στάθμης ηχητικής ισχύος πραγματικών πηγών μετά από μετρήσεις ηχητικής πίεσης (μπλε) και ηχητικής έντασης (κόκκινο)

Έχοντας προσδιορίσει την αβεβαιότητα σε κάθε στάδιο της ιχνηλασιμότητας, η συνδυασμένη αβεβαιότητα για τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος των πραγματικών πηγών πραγματοποιήθηκε για μετρήσεις ηχητική πίεσης και ηχητικής έντασης και απεικονίζεται στο σχήμα 4.2. Η συχνοτική ανάλυση στενού ζωνικού εύρους αποκάλυψε ότι οι μετρήσεις ηχητικής πίεσης και ηχητικής έντασης χαρακτηρίζονται από παρόμοια αβεβαιότητα για συχνότητες άνω των 300 Hz. Για χαμηλότερες συχνότητες όμως, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ηχητικής έντασης χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη αβεβαιότητα συγκριτικά με αυτή των μετρήσεων ηχητικής πίεσης.

## 5. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει ένα πλήθος θεμάτων έρευνας που διεξήχθησαν με σκοπό την εγκαθίδρυση ιχνηλασιμότητας για τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος στην περίπτωση αερόφερτου θορύβου. Το κυρίως εργαλείο για την ιχνηλασιμότητα αναμένεται να είναι η μέθοδος της αντικατάστασης. Προς αποφυγή φαινομένων σε χαμηλές συχνότητες που σχετίζονται με την ηχητική πίεση, η μέθοδος αντικατάστασης εφαρμόστηκε και σε μετρήσεις ηχητικής έντασης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη για την επιρροή από παράγοντες, όπως η δειγματοληψία της επιφάνειας μέτρησης, η ύπαρξη ανακλαστικού επιπέδου και κατά κύριο λόγο, η τάξη της ηχητικής πηγής. Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν τη χρήση της ηχητικής έντασης και παρέχουν αποδεκτές αποκλίσεις από την ηχητική ισχύ σε ελεύθερο πεδίο, όταν οι πηγές είναι ίδιας τάξης. Σε αντίθετη περίπτωση, η απόκλιση αυξάνεται, ιδίως στις χαμηλές συχνότητες.

Για τους σκοπούς της έρευνας κατασκευάστηκε μία συσκευή σάρωσης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μέσης ενεργειακής στάθμης ηχητικής πίεσης και στάθμης ηχητικής έντασης, καθώς και για τη μέτρηση της κατευθυντικότητας των πηγών. Η συσκευή χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εκτίμηση της αβεβαιότητας κατά τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος των ΠΜ σε συνθήκες βαθμονόμησης. Οι ΠΜ προορίζονται προς χρήση και επί τόπου. Για το λόγο αυτό πρέπει να εφαρμοστεί μία διόρθωση λόγω της μεταβολής των συνθηκών μέτρησης. Επί τούτου εξετάστηκε η επίδραση των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας περιστροφής της φερωτής των πηγών. Η προτεινόμενη διόρθωση παρέχει μεγαλύτερη σύγκλιση συγκριτικά με μία

υπάρχουσα. Ενώ οι παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο κατά τον προσδιορισμό της στάθμης ηχητικής ισχύος επί τόπου, δε συμβαίνει το ίδιο με την αντίστοιχη αβεβαιότητα.

Τέλος, η μέθοδος της αντικατάστασης εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της στάθμης ηχητικής ισχύος πραγματικών πηγών σε ρεαλιστικά ηχητικά περιβάλλοντα για την ολοκλήρωση των βημάτων της ιχνηλασιμότητας. Η διακύμανση των αποτελεσμάτων συγκριτικά με την επιφάνεια μέτρησης, το περιβάλλον της μέτρησης και το συχνотικό περιεχόμενο της πηγής συνηγορεί στη χρήση της προτεινόμενης μεθόδου. Οι στάθμες ηχητικής ισχύος μετά την εφαρμογή της μεθόδου αντικατάστασης απέχουν λιγότερο από τις τιμές που θα επικρατούσαν σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου συγκριτικά με απευθείας προσδιορισμένες στάθμες. Η συνδυασμένη αβεβαιότητα επηρεάζεται κυρίως από τη διαφορά των σταθμών ηχητικής πίεσης ή ηχητικής έντασης. Η αβεβαιότητα της στάθμης ηχητικής ισχύος πραγματικών πηγών είναι χαμηλότερη στις χαμηλές συχνότητες στην περίπτωση μετρήσεων ηχητικής ισχύος, το οποίο αποτελεί την κύρια καινοτομία της προτεινόμενης μεθόδου.

## 6. Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Κοινού Έργου Έρευνας EMRP SIB56 SoundPwr. Το EMRP χρηματοδοτείται από κοινού από τις χώρες που συμμετέχουν σε αυτό εντός της Euramet και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

## 7. Αναφορές

[1] Οδηγία 2000/14/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 8ης Μαΐου 2000

[2] JCGM 100 «Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement» Joint Committee for Guides in Metrology (2008)

[3] ISO 3743-1:2010 «Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for small movable sources in reverberant fields - Part 1: Comparison method for a hard-walled test room», International Standardization Organization, Geneva (2010)

[4] ISO 3745:2012 «Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms», International Standardization Organization, Geneva (2012)

[5] S. Brezas, M. Schmelzer, V. Wittstock «Theoretical investigation on the sound power substitution method» Acta Acust. United Ac. **105**(3), pp 426-434 (2019)

[6] S. Brezas, V. Wittstock «Calibration of sound power sources: Current status and new developments» J. Acoust. Soc. Am. **149**(5), pp 3553-3564 (2021)

[7] S. Brezas, V. Wittstock «Study on the properties of aerodynamic reference sound sources» Acta Acust. United Ac. **105**(6), pp 960-969 (2019)

## Βελτιστοποίηση σχήματος για τον σχεδιασμό ιδιοφώνων και πειραματική διερεύνηση

Χρήστος Παναγιωτόπουλος  
pchr@hmu.gr

Σπύρος Κουζούπης  
skouzo@hmu.gr

Αθανάσιος Κρουονερίτης  
alphathetakr@gmail.com

Άγγελος Κόντος-Πανταζής  
Kontos\_A@hotmail.com

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο 74133, Κρήτη.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον σχεδιασμό ιδιόφωνων και ακουστικών σωλήνων. Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης με αξιοποίηση αριθμητικών μοντέλων της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και αντίστοιχων δεικτών ευαισθησίας που προκύπτουν από αυτή. Στόχος είναι ο καθορισμός του σχήματος ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αναλογία μερικών ιδιοσυχνοτήτων σε σχέση με την χαμηλότερη, θεμελιώδη, ιδιοσυχνότητα. Μια προφανής αξιοποίηση της μεθοδολογίας είναι η εφαρμογή στον σχεδιασμό επιμέρους τμημάτων μουσικών οργάνων όπως χαρακτηριστικά είναι τα πλήκτρα ξυλόφωνων και μεταλλόφωνων αλλά και των αντηχείων τους. Η μεθοδολογία είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε παραλλαγές του προβλήματος, όπως για παράδειγμα αυτό της χρήσης υλικών μεταβλητών ιδιοτήτων στο χώρο που καθορίζουν την κατανομή των ελαστικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών. Επιπλέον η δυνατότητα αυτοματοποίησης της μεθόδου την καθιστά ένα εν δυνάμει χρήσιμο εργαλείο για τεχνικούς και κατασκευαστές τέτοιων οργάνων. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προσπάθεια κατασκευής μιας δοκού με σχήμα που προκύπτει από την εν λόγω μεθοδολογία ενώ ακολούθησε η πειραματική διερεύνηση για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών και η σύγκρισή τους με τα αναμενόμενα, όπως υπολογίστηκαν από την παραπάνω μεθοδολογία.

## Shape optimization for idiophones design and experimental study

### ABSTRACT

*We present in this work a methodology for the design of idiophones, indicatively a vibrating beam or an acoustic tube. The methodology is based on optimization algorithms utilizing numerical models of the finite element method and their respective sensitivity indexes. Our target is the determination of the shape in order to obtain desired ratio of harmonics (eigenfrequencies) in respect to the fundamental one. An evident application of this current methodology is the implementation for the design of parts of musical instruments as distinctively are the keys of metallophones, xylophones and these of marimba, among others. The methodology can be easily adapted for the case of other similar problems as is the design of material distribution for appropriate stiffness and inertial properties arrangement. Furthermore, the chance of automatization of the current method, makes it a potential useful tool for technicians and instrument makers. In this current work an attempt to construct a beam of shape that arise of this approach has been accomplished and experimental modal analysis as been conducted in order to compare with theoretical results.*

### 1 Εισαγωγή

Τα ιδιόφωνα μουσικά όργανα είναι μελωδικά κρουστά τα οποία συνήθως συνίστανται από σκληρά υλικά όπως διάφορα μέταλλα, ξύλο ή και σύνθετα υλικά. Ειδικότερα αναφερόμαστε σε όργανα τα οποία φέρουν μια συλλογή από ράβδους οι οποίες όταν διεγερθούν μετά από κρούση παράγουν ένα απαλό, ευχάριστο και με σαφές τονικό ύψος ήχο, [1]. Κάποια από αυτά τα όργανα, όπως το σύγχρονο ξυλόφωνο, η μαρίμπα και το βιμπράφωνο έχουν τις νότες (ράβδους) διατεταγμένες με τον ίδιο τρόπο όπως τα πλήκτρα του πιάνου. Τέτοια όργανα πολλές φορές αποτελούν τμήμα του μέρους των κρουστών μιας συμφωνικής ορχήστρας. Εδώ μελετάμε δυναμικές ιδιότητες και τις ιδιαιτερότητες των δονήσεων εστιάζοντας σε μια μεμονωμένη ράβδο στην οποία θα αναφερόμαστε και με τις λέξεις μπάρα ή κλειδί ή πλήκτρο, πχ. της μαρίμπας. Επισημαίνουμε εδώ ότι διατηρούμε τη χρήση των λέξεων ράβδος και μπάρα που είθισται να χρησιμοποιούνται όταν αναφερόμαστε σε πλήκτρα ιδιόφωνων μουσικών οργάνων αλλά θα ήταν μάλλον καταλληλότερη η χρήση του όρου δοκός που αποδίδει καλύτερα, στο πλαίσιο της συνήθους δυναμικής των κατασκευών [2], την πραγματική δονητική συμπεριφορά των πλήκτρων αυτών. Κατά την κρούση του πλήκτρου μπορούν να διεγερθούν αξονικοί και στρεπτικοί τρόποι ταλάντωσης κατά κύριο λόγο όμως αυτοί που ανταποκρίνονται καλύτερα είναι οι εγκάρσιοι τρόποι οι οποίοι και συνεισφέρουν τα μέγιστα στην παραγόμενη ηχητική ενέργεια.

Το κούρδισμα των πλήκτρων τέτοιων οργάνων, όπως η μαρίμπα, μπορεί να σχεδιαστεί λαμβάνοντας απλά υπόψη μόνο την πρώτη ιδιοσυχνότητα της αντίστοιχης νότας ή να γίνει πιο σύνθετο όταν κανείς αποπειραθεί να σχεδιάσει το πλήκτρο έτσι ώστε να παρουσιάζει συγκεκριμένες ιδιομορφικές αναλογίες των επόμενων φυσικών τρόπων ταλάντωσης σε σχέση με την θεμελιώδη. Ενδεικτικά, μια ελεύθερη

πρισματική δοκός, σύμφωνα με τη θεωρία Euler–Bernoulli, παρουσιάζει ιδιομορφικές συχνοτικές αναλογίες  $1 : 2.757 : 5.404$ , ενώ ως πιο επιθυμητές σχέσεις θεωρούνται από επαγγελματίες κατασκευαστές αυτές που αποφέρουν ένα πιο ευήχο αποτέλεσμα, όπως οι αναλογίες:  $1:3:6$ , ή  $1:4:8$  ή η  $1:4:9$ . Πειράματα από συντεθειμένους ήχους έχουν αναδείξει ως κατάλληλη αναλογία αυτή των σχέσεων  $1:4:9.8$  (βλ. [1] και αντίστοιχες εκεί αναφορές).

Ο κατάλληλος σχεδιασμός πλήκτρων τα οποία να παρουσιάζουν επιθυμητές ιδιότητες, σε ότι αφορά τις ιδιομορφικές συχνοτικές αναλογίες, αποτελεί μια όχι τετριμμένη διαδικασία και μπορεί να επιτευχθεί με δύο τουλάχιστον τρόπους. Ο πρώτος αφορά τον γεωμετρικό καθορισμό του σχήματος μιας μη πρισματικής δοκού, ενώ ο δεύτερος θα ήταν η κατάλληλη κατανομή αδρανειακών και ελαστικών χαρακτηριστικών μέσω υλικών διαβαθμισμένων ιδιοτήτων (functionally graded materials). Επιπλέον συνδυασμός των δύο προηγούμενων τεχνικών θα μπορούσε εξίσου να λειτουργήσει. Εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με τον πρώτο τρόπο που αφορά τον γεωμετρικό καθορισμό. Ο σχεδιασμός όπως θα δούμε και πιο κάτω μπορεί να ιδωθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή αν και στο παρελθόν έχει παρουσιαστεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης [3], εδώ την αντιμετωπίζουμε με ένα συστηματικό τρόπο που εκμεταλλεύεται κατάλληλα την αριθμητική μέθοδο προσέγγισης των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να καταστεί χρήσιμη και για την αξιοποίηση αλγορίθμων ελαχιστοποίησης. Η μεθοδολογία που παρουσιάζουμε εδώ είναι μέρος ευρύτερης έρευνας και επιπλέον επιδέχεται περαιτέρω αυτοματοποίηση καθιστώντας την κατάλληλη ακόμα και για επαγγελματίες μη εξειδικευμένους σε αυτές τις μεθοδολογίες (π.χ. οργανοποιούς).

## 2 Μεθοδολογία

Στόχος μας είναι μια συστηματοποιημένη διαδικασία καθορισμού της γεωμετρίας πλήκτρων ώστε αυτά να πληρούν συγκεκριμένες ιδιομορφικές συχνοτικές αναλογίες. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να σχεδιάσουμε πλήκτρα ιδιόφωνων μουσικών οργάνων κουρδισμένα σε μια βασική νότα η οποία ακολουθείται από υπέρτονους κουρδισμένους έτσι ώστε να έχουν επιθυμητές αναλογίες σε σχέση με την βασική νότα. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης σχήματος με αντικειμενική συνάρτηση επί των ιδιοσυχνοτήτων του πλήκτρου και πιθανή συμπερίληψη κάποιων γεωμετρικών περιορισμών.

### 2.1 Εξισώσεις και η αριθμητική τους προσέγγιση

Η δονητική συμπεριφορά του πλήκτρου προσεγγίζεται εδώ από τις δυναμικές εξισώσεις της απόκρισης μιας δοκού βάσει των εξισώσεων της θεωρίας Timoshenko, η οποία λαμβάνει υπόψη δύο επιπλέον παραμέτρους σε σχέση με την απλούστερη προσέγγιση της δοκού Euler–Bernoulli, αυτή της επίπεδης διατομής αλλά όχι απαραίτητα κάθετης στον μέσο άξονα της δοκού κατά την παραμόρφωση, καθώς και αυτή της συμπερίληψης της στρωφικής αδράνειας στην κινητική



ενέργεια, δηλαδή

$$\kappa GA \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = w(x, t) \quad (1\alpha')$$

$$\kappa GA \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \psi \right) + EI \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \mu(x, t) \quad (1\beta')$$

όπου  $v$  η εγκάρσια μετατόπιση ενώ το  $\psi$  είναι ένα μέτρο για την κλίση της διατομής λόγω κάμψης. Επιπλέον συμπεριλαμβάνεται η παράμετρος  $\gamma_0$  που αφορά την διάτμηση καθώς:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \psi + \gamma_0. \quad (2)$$

Η εξωτερική διέγερση των δεξιά μελών των εξισώσεων δεν έχει ιδιαίτερη σημασία στην μελέτη μας που αφορά τα δυναμικά χαρακτηριστικά και άρα τις χαρακτηριστικές εξισώσεις. Είναι όμως απαραίτητη σε περιπτώσεις που εξετάζεται η απόκριση του πλήκτρου σε εξαναγκασμένη ταλάντωση [4]. Η παράμετρος  $\rho$  αφορά την πυκνότητα μάζας,  $A$  είναι το εμβαδό διατομής της δοκού,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  $G$  το αντίστοιχο μέτρο διάτμησης,  $I$  είναι η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού, ενώ τέλος  $\kappa$  είναι ένας γεωμετρικός συντελεστής που εξαρτάται από το σχήμα της διατομής. Οι πιο πάνω μεταβλητές εξαρτώνται από την θέση  $x$  επί του άξονα της δοκού.

Επειτα από διακριτοποίηση της εξίσωσης (1) με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και επιπλέον με παραδοχή ελεύθερων ταλαντώσεων, δύναται να γραφούν με την αλγεβρική μορφή της χαρακτηριστικής εξίσωσης του ιδιοπροβλήματος,

$$(K - \omega_i^2 M)\phi_i = 0 \quad (3)$$

όπου  $K$  και  $M$  τα μητρώα δυσκαμψίας και μάζας αντίστοιχα, ενώ  $\phi_i$  και  $\omega_i$  το ζεύγος του  $i$ -οστού ιδιοδιανύσματος (η διακριτή μορφή του φυσικού τρόπου ταλάντωσης) και της αντίστοιχης κυκλικής ιδιοσυχνότητας.

Αξίζει να επισημανθεί εδώ ότι για την περίπτωση των ακουστικών σωλήνων η διαδικασία είναι πανομοιότυπη και μπορεί να εκτελεστεί με τα ίδια υπολογιστικά εργαλεία. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση που λαμβάνεται υπόψη είναι αυτή της μονοδιάστατης κυματικής διάδοσης, γνωστής και ως εξίσωσης Webster [5].

## 2.2 Βελτιστοποίηση

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός πλήκτρου ως πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να δοθεί με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης,

$$f(\alpha) = c_m f_m(\alpha) + c_g f_g(\alpha) \quad (4)$$

η οποία αποτελείται από δυο μέρη, τον όρο  $f_m$  που αφορά στη στόχευση σχεδιασμού για επιθυμητές αναλογίες ιδιοσυχνοτήτων και το  $f_g$  που αφορά σε κάποιες γεωμετρικές συνθήκες, με αντίστοιχους βαρυτικούς συντελεστές  $c_m$  και  $c_g$ . Η παράμετρος  $\alpha$  περιέχει τις μεταβλητές σχεδιασμού. Η συνάρτηση  $f_m$  μπορεί να λάβει την μορφή,

$$f_m(\alpha) = \sum_{q=1}^Q c_{q1} \left( \frac{\omega_q}{\omega_1} - r_{q1} \right)^2 \quad (5)$$

όπου  $\omega_1$  η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα,  $Q$  ο συνολικός αριθμός των ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_q$  για τις οποίες θα επιχειρήσουμε να επιτύχουμε την αναλογία  $r_{q1}$  ως προς την θεμελιώδη. Επισημαίνεται ότι οι ιδιοσυχνότητες είναι συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού  $\alpha$ , δηλαδή  $\omega_i = \omega_i(\alpha)$ .

Για την αποτελεσματική επίλυση του προβλήματος υιοθετούμε αλγόριθμους που χρησιμοποιούν τις παραγώγους της αντικειμενικής συνάρτησης επί των μεταβλητών σχεδιασμού. Σε αυτούς τους αλγόριθμους ο γρήγορος και με ακρίβεια υπολογισμός των κλίσεων  $\frac{\partial f_m}{\partial \alpha}$  της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού είναι μεγάλης σημασίας. Με παραγωγή της εξ. (5) ως προς την παράμετρο σχεδιασμού  $\alpha$ , λαμβάνουμε,

$$\frac{\partial f_m}{\partial \alpha} = \frac{2}{\omega_1^3} \sum_{q=1}^M c_{q1} (r_{q1} \omega_1 - \omega_q) \left( \omega_q \frac{\partial \omega_1}{\partial \alpha} - \omega_1 \frac{\partial \omega_q}{\partial \alpha} \right) \quad (6)$$

όπου οι παράγωγοι  $\frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha}$  είναι οι δείκτες ευαισθησίας των ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_i$  επί της παραμέτρου  $\alpha$ . Για τον υπολογισμό των δεικτών ευαισθησίας χρησιμοποιούμε την εξ. (3) που μετά από κάποια επεξεργασία μπορεί να γραφτεί ως,

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial \alpha} = \frac{1}{2\omega_i m_i^*} \phi_i^T \left( \frac{\partial K}{\partial \alpha} - \omega_i^2 \frac{\partial M}{\partial \alpha} \right) \phi_i \quad (7)$$

όπου  $m_i^*$  η  $i$ -οστή γενικευμένη μάζα της αντίστοιχης ιδιομορφής, η οποία δίνεται από το γινόμενο  $\phi_i^T M \phi_i$ . Στην περίπτωση μας η παράμετρος σχεδιασμού μπορεί να ταυτιστεί με το ύψος της διατομής της δοκού σε κάθε σημείο  $x$  του άξονα της. Συνεπακόλουθα, οι παράγωγοι  $\frac{\partial K}{\partial h}$  και  $\frac{\partial M}{\partial h}$  μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με χρήση των μητρώων δυσκαμψίας και μάζας των επιμέρους πεπερασμένων στοιχείων της δοκού.

### 2.3 Ανάπτυξη πακέτων λογισμικού

Για την εφαρμογή των πιο πάνω αναπτύχθηκαν ενότητες λογισμικού με χρήση του SDE που είναι ένα περιβάλλον βασισμένο σε Java με δυνατότητες αριθμητικών υπολογισμών<sup>1</sup>. Το λογισμικό SDE αναπτύχθηκε, από τον πρώτο συγγραφέα της παρούσας εργασίας, κυρίως για να λειτουργήσει ως ένα περιβάλλον εργασίας και αξιοποίησης πακέτων υπολογιστικών μεθόδων σε Java (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος συνοριακών στοιχείων, κ.α.). Εδώ παρουσιάζονται οι βασικές ενότητες που χρησιμοποιήθηκαν ή και αναπτύχθηκαν για την παρούσα εργασία. Βασική, προϋπάρχουσα, ενότητα λογισμικού είναι αυτή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με δυνατότητα επίλυσης του ιδιοπροβλήματος διακριτοποιημένου συστήματος αλλά και υπολογισμό των δεικτών ευαισθησίας. Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης έγινε χρήση του αλγορίθμου Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno και συγκεκριμένα μέσω αξιοποίησης κατάλληλου λογισμικού σε Java<sup>2</sup> το οποίο λειτουργεί ως ένα περίβλημα στην πρωτότυπη FORTRAN έκδοση. Για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος δημιουργήθηκαν κατάλληλα σενάρια λογισμικού (scripts) στο περιβάλλον του SDE. Κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

<sup>1</sup>Symplegma project, <http://symplegma.org>

<sup>2</sup>Java wrapper for the Fortran lbfgs-b algorithm, [github.com/mkobos/lbfgsb\\_wrapper](https://github.com/mkobos/lbfgsb_wrapper)

### 3 Εφαρμογή και πειραματική διερεύνηση

Θα παρουσιάσουμε μια εφαρμογή όπου θα προσπαθήσουμε με την πιο πάνω μεθοδολογία να σχεδιάσουμε μια δοκό αλουμινίου διατομής μεταβλητού ύψους ορθογωνικής διατομής στον άξονα της δοκού. Ζητούμενο είναι ο καθορισμός του προφίλ της δοκού ώστε αυτή να παρουσιάζει ιδιοσυχνότητες με αναλογίες 1:4:9:8.

#### 3.1 Παραμετρική έκφραση της κατανομής του ύψους διατομής

Ένα πρώτο βήμα είναι η επιλογή του γενικού τύπου της γεωμετρίας του προφίλ. Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε ότι η κατανομή του ύψους της διατομής στο μήκος του άξονα της δοκού μπορεί να δοθεί ως μια πολυπαραμετρική συνάρτηση  $h(x)$ . Μια εναλλακτική λύση είναι η επιλογή κάποιας κατανομής που να αποδίδει κάποια γεωμετρία παρόμοια αυτών που απαντώνται στην πράξη. Ενδεικτικά εδώ γράφουμε μια παραβολική καμπύλη τριών παραμέτρων.

$$\frac{1}{a_0} h(x) = \begin{cases} 1 & , \text{αν } 0 \leq x \leq a_2 \\ \alpha_1 + \frac{1-\alpha_1}{\alpha_3^2 - 2\alpha_2\alpha_3 + \alpha_2^2} (x^2 - 2\alpha_3x + \alpha_3^2) & , \text{αν } a_2 < x \leq a_3 \\ a_1 & , \text{αν } a_3 < x \leq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

Σε αυτή τη περίπτωση οι παράμετροι σχεδιασμού είναι οι μεταβλητές  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  και  $\alpha_3$ , αφού η παράμετρος  $a_0$  δεν επηρεάζει τη συχνοτική αναλογία αλλά μόνο την τιμή της θεμελιώδους συχνότητας. Μία πιο γενική προσέγγιση είναι η προβολή της συνάρτησης  $h(x)$  πάνω σε μια βάση, με χρήση για παράδειγμα τριγωνομετρικών συναρτήσεων, γραμμικών συναρτήσεων, τμηματικά σταθερών συναρτήσεων ή και συναρτήσεων Chebyshev, μεταξύ άλλων. Η γενική μορφή μιας τέτοιας επιλογής μπορεί να γραφτεί ως:

$$h(x) = a_0 + \sum_{s=1}^S a_s \psi_s(x). \quad (9)$$

Στην περίπτωση της τμηματικά σταθερής διατομής οι συναρτήσεις  $\psi_i(x)$  μπορούν να γραφτούν με τη βοήθεια της συνάρτησης Heaviside  $H(x)$ , ως εξής,

$$\psi_s(x) = H[x - x_{s-1}] - H[x - x_s] \quad (10)$$

όπου  $x_s = s \Delta x$ . Το μήκος τμήματος θα είναι  $\Delta x = \frac{1}{S}$ , όπου  $S$  ο συνολικός αριθμός τμημάτων και όρων που χρησιμοποιούνται στην εξ. (9). Παρόμοια για τμηματικά γραμμική μεταβολή μπορούμε να γράψουμε,

$$\begin{aligned} \psi_s(x) &= (H[x - x_{s-1}] - H[x - x_s]) \frac{x - x_{s-1}}{\Delta x} \\ &+ (H[x - x_s] - H[x - x_{s+1}]) \frac{\Delta x - x - x_s}{\Delta x}. \end{aligned} \quad (11)$$

Τέλος για χρήση τριγωνομετρικών συναρτήσεων μπορούμε να γράψουμε,

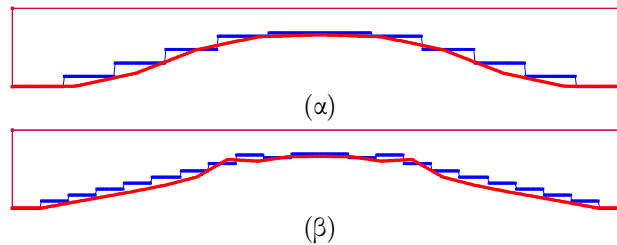
$$\psi_s(x) = \sin(s \pi x) \quad (12)$$

που αν και παρουσιάζουν θεωρητικό ενδιαφέρον θα είχαν κάποια δυσκολία εφαρμογής στην πράξη λόγω γεωμετρικών και κατασκευαστικών περιορισμών.

### 3.2 Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία δοκού και επίλυση

Αφού διακριτοποιήσουμε την δοκό σε  $N_e$  τον αριθμό, στοιχεία δοκού ίσου μήκους, με χρήση των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και αφού επιλέξουμε κατάλληλη ομάδα προφίλ (βλ. εξ. (8) και εξ. (10) έως (12) σε συνδυασμό με την εξ. (9)), μπορούμε να αποδώσουμε ένα ύψος διατομής σε κάθε ένα από τα στοιχεία με χρήση των παραμέτρων σχεδιασμού από τις πιο πάνω εξισώσεις. Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλύεται το ιδιοπρόβλημα της εξ. (5) και καθορίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά αλλά υπολογίζονται και οι δείκτες ευαισθησίας της εξ. (7), αμφότερα, στοιχεία απαραίτητα για την αλγοριθμική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Για την αριθμητική επίλυση θα θεωρήσουμε συμμετρική τη διατομή της δοκού ως προς τον κεντρικό άξονα της δοκού, μια παραδοχή που όπως επισημαίνεται και στην βιβλιογραφία (βλ. [3]), δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Ας σημειωθεί εδώ ότι η παραδοχή αυτή λαμβάνεται προς απλούστευση της διαδικασίας και δεν είναι απαραίτητο να ληφθεί. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζουμε έχουν εξαχθεί με χρήση 100 στοιχείων για την διακριτοποίηση. Για την περίπτωση που θεωρούμε μια τμηματικά σταθερή διατομή της δοκού, μελετάμε δύο περιπτώσεις όπου λαμβάνουμε 5 και 10 τμήματα, αντίστοιχα, από όπου θα αφαιρεθεί υλικό. Να σημειωθεί ότι έχει ληφθεί υπόψη η συμμετρία ως προς την μέση κατακόρυφη γραμμή. Είναι προφανές πως οι παράμετροι σχεδιασμού για το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα έχουν τον ίδιο αριθμό με τον αριθμό των επιμέρους βαθμίδων. Τα αποτελέσματα της γεωμετρίας παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1 με μπλε χρώμα ( $\alpha$ ) για 5 τμήματα και με κόκκινο ( $\beta$ ) για 10 τμήματα. Παρόμοια αποτελέσματα με πιο ομαλή μετάβαση του προφίλ λαμβάνουμε αν θεωρήσουμε τμηματικά γραμμική μεταβολή, τα οποία μπορούμε να δούμε στο ίδιο σχήμα (3.1).



Σχήμα 3.1 Μεταβολή του ύψους της διατομής της δοκού (α) πέντε και (β) δέκα βαθμίδων, για συχνοτικές αναλογίες (1:4:9:8), θεωρώντας: Τμηματικά σταθερά (μπλε) και τμηματικά γραμμικά (κόκκινα), υποχωρία.

### 3.3 Κατασκευή και πείραμα

Είναι σημαντικό να επισημανθεί, αν και προφανές από τα στοιχεία που έως τώρα παρουσιάσαμε, πως συνήθως η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης και άρα και της λύσης σχεδιασμού του πλήκτρου δεν είναι μονοσήμαντη. Όπως δείξαμε και στην προηγούμενη παράγραφο όλα τα σχήματα (τέσσερα στο σύνολο) στο Σχ. 3.1, παρουσιάζουν ίδιες συχνοτικές αναλογίες (αυτές της σχέσης 1:4:9:8).



Σχήμα 3.2 Η δοκός αλουμινίου 5 βαθμίδων που κατασκευάστηκε.

Ένα παρόμοιο προφίλ καθορίστηκε από τη διαδικασία βελτιστοποίησης και κατασκευάστηκε ως μια δοκός αλουμινίου πέντε βαθμίδων με ζεύγη ύψους, μήκους τα (10.0,52.1;7.5,50.1;6.6,49.5;4.0,50.1;3.2,99.1) σε χιλιοστά (βλ. και Σχήμα 3.2). Για την αναγνώριση των δυναμικών χαρακτηριστικών της δοκού παρουσιάζουμε αποτελέσματα μόνο από ανάλυση ακουστικού σήματος ύστερα από κρουστική διέγερση της δοκού. Για την εγγραφή της απόκρισης χρησιμοποιήθηκε πυκνωτικό μικρόφωνο (AKG P420), το σήμα οδηγήθηκε σε κάρτα ήχου (Yamaha UR22). Για τη συχνотική ανάλυση του σήματος έγινε απλή FFT επεξεργασία με επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα για τις συχνότητες όπως αναγνωρίστηκαν έπειτα από ανάλυση του ακουστικού σήματος παρουσιάζουν την αναλογία 1:4.03:9.91, τα οποία είναι πολύ κοντά στην επιθυμητή σχέση για την οποία σχεδιάστηκε η δοκός. Η απόκλιση εν μέρει οφείλεται και στην χειρωνακτική κατασκευή της δοκού η οποία είχε ως αποτέλεσμα μία σχετικά μικρή διαφοροποίηση των διαστάσεων σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι κάποια πιο ακριβή πειραματικά αποτελέσματα με χρήση κρουστικού σφυριού και καταγραφή επιταχύνσεων έχουν ήδη διεξαχθεί με ικανοποιητική συμφωνία με τα όσα παρουσιάζουμε εδώ.

#### 4 Αναφορές

- [1] Σπύρος Κουζούπης, «Θεωρητική μελέτη της χρήσης ράβδων σαν ιδιόφωνα μουσικά όργανα», 9ο Πανελλήνιο Συνέδριο «ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2018», 8–9 Οκτωβρίου 2018, Πάτρα.
- [2] Γεώργιος Δ. Μανώλης, Παναγιώτης Κ. Κολιόπουλος, Χρήστος Γ. Παναγιωτόπουλος *Δυναμική των Κατασκευών, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015.*
- [3] J. Petrolito, K.A. Legge, «Optimal undercuts for the tuning of percussive beams» *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), pp 2432–2437 (1997).
- [4] A. Chaigne, V. Doutaut, «Numerical simulations of xylophones. I. Time-domain modeling of the vibrating bars» *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(4), pp 539–557 (1997).
- [5] A. Chaigne, J. Kergomard, *Acoustics of musical instruments*, Springer, 2016.

## **Εφαρμογές Φωνονικών Μεταϋλικών σε Ακουστικές διατάξεις**

Νικόλαος Αραβαντινός-Ζαφείρης<sup>1</sup>, Μιχαήλ Σιγάλας<sup>2</sup>, Διονύσιος Κατερέλος<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Περιβάλλοντος, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Ζάκυνθος 29100, e-mail:

[nikosaravadinos@gmail.com](mailto:nikosaravadinos@gmail.com)

<sup>2</sup>Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 26504, e-

mail:[sigalas@upatras.gr](mailto:sigalas@upatras.gr)

<sup>3</sup>Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής-Ακουστικής και Μουσικών Οργάνων, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Ληξούρι 28200, e-mail:

[d.katerelos@gmail.com](mailto:d.katerelos@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν, θεωρητικά και πειραματικά, τρισδιάστατες δομές οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως Φωνονικά Μεταϋλικά και εμφανίζουν μεγάλα και πλήρη Φωνονικά Χάσματα κατά την διάδοση ακουστικών κυμάτων. Οι δομές αυτές δημιουργούνται από αέρα σε στερεό υλικό μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν πλήρη και μεγάλα Φωνονικά Χάσματα για όλες τις δομές που μελετήθηκαν. Παράλληλα μελετήθηκε και η περίπτωση στην οποία μία ατέλεια τοποθετείται στην δομή. Η ύπαρξη τέτοιων δομών, δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης πλήθους εφαρμογών όπως ακουστικά φίλτρα, ακουστική μόνωση, αισθητήρες καθώς και πηγές ήχου με έντονη κατευθυντικότητα.*

## **Applications of Acoustic Metamaterials on Acoustic devices**

### **ABSTRACT**

*In the present work, three-dimensional structures which can be considered as Phononic Metamaterials and exhibit large and complete Phononic Band Gaps during the propagation of acoustic waves were studied, theoretically and experimentally. These structures are created from air to solid material through 3D printing. The results showed complete and large Phononic Band Gaps for all structures studied. At the same time, the case in which an imperfection is placed in the structure was also studied. The existence of such structures enables the development of many applications such as acoustic filters, acoustic insulation, sensors as well as sound sources with strong directionality.*

## Εισαγωγή

Τα Φωνονικά Υλικά (ΦΥ) και τα Ακουστικά Μεταλλικά (ΑΜ) έχουν αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες βάση για αξιόπιστες και αποτελεσματικές λύσεις στον έλεγχο της διάδοσης ακουστικών και ελαστικών κυμάτων. Οι δομές αυτές έχουν ως βασική ιδιότητα την ύπαρξη Φωνονικών Χασμάτων (ΦΧ), δηλαδή περιοχών συχνοτήτων στις οποίες η διάδοση του μηχανικού κύματος (ελαστικού ή ακουστικού) αποκόπτεται ολοσχερώς από την δομή [1]. Και είναι σημαντικό πως, ανάλογα με τις διαστάσεις, το υλικό και την διάταξη των ΦΥ και ΑΜ, τα ΦΧ είναι δυνατόν να εμφανισθούν σε όλο το εύρος του Φωνονικού Φάσματος [2]. Η πρόσφατη ανάπτυξη πλήθους μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης έδωσε την δυνατότητα για ανάπτυξη τρισδιάστατων Φωνονικών Μεταλλικών με σύνθετες γεωμετρίες και εμφάνιση πλήρων και μεγάλων σε εύρος ΦΧ [3, 4]. Έχουν υπάρξει μάλιστα και σχετικές μελέτες στις οποίες, στην ίδια δομή, παρατηρείται η ταυτόχρονη εμφάνιση ΦΧ τόσο για ακουστικά όσο και για ελαστικά κύματα [5].

Στην διεθνή βιβλιογραφία έχει μελετηθεί εκτενώς τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά πλήθος τρισδιάστατων δομών με μεγάλα ΦΧ κυρίως για ελαστικά κύματα. Η μελέτη αντίστοιχων δομών σε ρευστά και κυρίως στον αέρα, μπορεί να διευρύνει σημαντικά το πεδίο και στα ακουστικά κύματα. Την διευρύνση δηλαδή στην μελέτη τρισδιάστατων δομών από αέρα μέσα σε ένα στερεό υλικό μήτρας οι οποίες εμφανίζουν μεγάλα ΦΧ σε ακουστικές συχνότητες. Η ύπαρξη τέτοιων δομών, που έχουν την ιδιότητα να αποκόπτουν τα ακουστικά κύματα σε τέτοιο εύρος, δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης πλήθους εφαρμογών στηριγμένες σε αυτήν την ιδιότητα όπως ακουστικά φίλτρα, ακουστική μόνωση, αισθητήρες καθώς και πηγές ήχου με έντονη κατευθυντικότητα.

Πρόσφατα μελετήθηκε τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, μία τρισδιάστατη δομή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως Φωνονικό Μεταλλικό (ΦΜ) και εμφανίζει μεγάλα ΦΧ κατά την διάδοση ακουστικών κυμάτων [6]. Οι δομή αυτή δημιουργήθηκε από αέρα σε στερεό υλικό μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Είναι στηριγμένη στην γνωστή συμμετρία του κυβικού εδροκεντρωμένου πλέγματος (Face Centered Cubic (FCC) lattice) από την Φυσική Στερεάς Κατάστασης και αποτελείται από σφαίρες αέρα σε διάταξη FCC οι οποίες είναι ενωμένες με κυλινδρικής διατομής αγωγούς από αέρα μέσα στο στερεό. Οι κυλινδρικοί αγωγοί έχουν κατεύθυνση κατά μήκος των διαγώνιων διευθύνσεων της κυβικής κυψελίδας και δομούν την πολύ γνωστή δομή Yablonovite. Αντίστοιχα, όταν η δομή από αέρα στο στερεό υλικό αποτελείται από σφαίρες σε διάταξη απλού κυβικού πλέγματος (Simple Cubic (SC) lattice) οι οποίες συνδέονται με κυλινδρικές ράβδους στην ίδια διάταξη τότε τα ΦΧ είναι επίσης μεγάλα και πλήρη [7].

### 1. Αποτελέσματα και συζήτηση

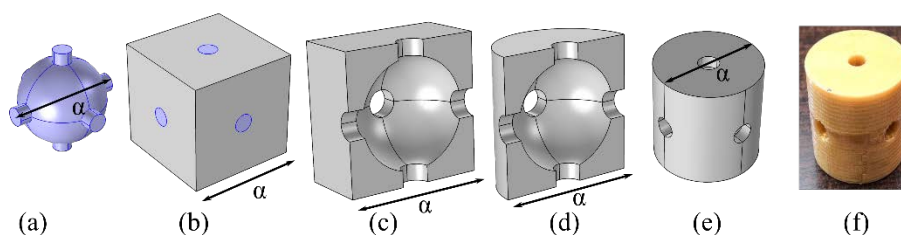
Στην παρούσα μελέτη διευρύνεται το πεδίο εφαρμογής της δομής σε διάταξη απλού κυβικού πλέγματος θεωρώντας ατέλειες εντός αυτής. Η δημιουργία επιπλέον κατάστασης εντός του ΦΧ λόγω της ατέλειας προβλέφθηκε θεωρητικά και μετρήθηκε και πειραματικά και ανοίγει δρόμους για πρόσθετες εφαρμογές των δομών αυτών στο πεδίο των ακουστικών διατάξεων.

Η θεωρητική μελέτη γίνεται με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στο πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics® και η πειραματική επιβεβαίωση στην ολοκληρωμένη διάταξη της Brüel & Kjaer στην οποία και μετρήθηκε η απώλεια ακουστικής διάδοσης (Sound Transmission Loss (STL)). Τα δείγματα, τα οποία στην συγκεκριμένη μελέτη αποτελούνται από τρεις θεμελιώδεις κυψελίδες, εκτυπώνονται με κατάλληλη διατομή ώστε να τοποθετηθούν στην πειραματική διάταξη.

### 1.1 Σχεδιασμός δομής και κατασκευή δειγμάτων

Η δομή η οποία θα μελετηθεί αποτελείται από σφαίρες αέρα σε διάταξη απλού κυβικού πλέγματος οι οποίες συνδέονται με κυλινδρικούς αγωγούς αέρα στην ίδια διάταξη. Η μοναδιαία κυψελίδα της δομής έχει κυβικό σχήμα ακμής  $a$  και φαίνεται στο Σχήμα 1.1(a). Όταν η δομή αυτή υλοποιηθεί σε στερεό υλικό τότε αντίστοιχα η μοναδιαία κυψελίδα της έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1.1(b) στο οποίο το μέρος από αέρα φαίνεται σε μπλε χρώμα και αντίστοιχα το στερεό υλικό σε γκρι χρώμα. Η ακμή της κυβικής μοναδιαίας κυψελίδας της δομής επελέγη ίση με 29 mm ( $a=29$  mm). Με την επιλογή αυτή επιτυγχάνονται δύο βασικού στόχοι. Ο πρώτος είναι ότι τα ΦΧ αναμένονται σε συχνοτική περιοχή που μπορεί να μετρηθεί από την πειραματική διάταξη και ο δεύτερος είναι ότι το μήκος της μοναδιαίας κυψελίδας είναι ίσο με την διάμετρο του σωλήνα της πειραματικής διάταξης.

Προκειμένου τα δείγματα να μετρηθούν στην πειραματική διάταξη εκτυπώνονται σε κυλινδρικό σχήμα διαμέτρου 29 mm και ύψους 29 mm. Ο σχεδιασμός του δείγματος της κυβικής μοναδιαίας κυψελίδας φαίνεται στο Σχήμα 1.1(c) και ο αντίστοιχος του κυλινδρικού δείγματος στο Σχήμα 1.1(d). Και στα δύο σχήματα φαίνεται το δείγμα κομμένο στην μέση για καλύτερη κατανόηση. Το σχέδιο του κυλινδρικού και το εκτυπωμένο δείγμα μιας μοναδιαίας κυψελίδας φαίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 1.1(e) και 1.1(f). Στην παρούσα μελέτη τα δείγματα περιείχαν τρεις μοναδιαίες κυψελίδες.

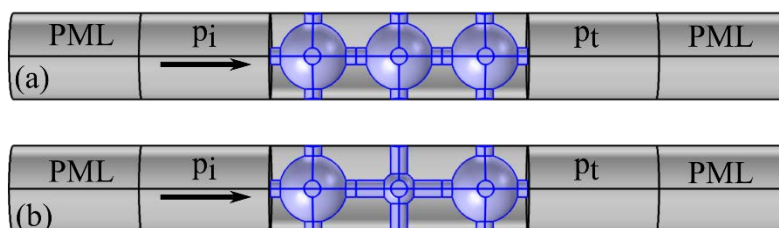


Σχήμα 1.1 (a) Η μοναδιαία κυψελίδα της δομής από αέρα, (b) Η δομή του Σχήματος (a) όταν τοποθετηθεί σε στερεό κύβο ακμής  $a$ . Στα (a) και (b) με μπλε χρώμα θεωρείται το μέρος της δομής από αέρα. (c) Το σχεδιασμένο κυβικό δείγμα της μοναδιαίας κυψελίδας της δομής το οποίο για καλύτερη κατανόηση φαίνεται η μεσαία διατομή του. (d) Το σχεδιασμένο κυλινδρικό δείγμα της μοναδιαίας κυψελίδας της δομής το οποίο για καλύτερη κατανόηση φαίνεται η μεσαία διατομή του. (e) Το σχεδιασμένο κυλινδρικό δείγμα της μοναδιαίας κυψελίδας της δομής (f) Το εκτυπωμένο κυλινδρικό δείγμα της μοναδιαίας κυψελίδας της δομής



### 1.2 Αριθμητική μέθοδος

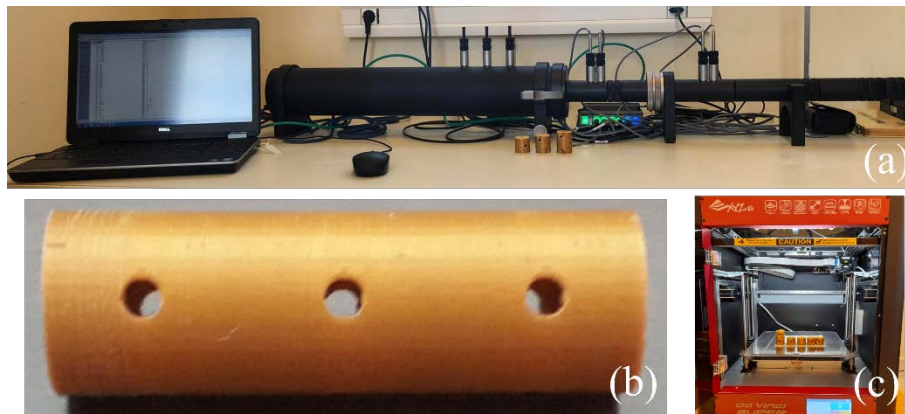
Για τους αριθμητικούς υπολογισμούς του STL χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method (FEM)) η οποία υλοποιείται στο πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics®. Ο σωλήνας ακουστικής εμπέδησης προσεγγίζεται από έναν κυλινδρικό σωλήνα της ίδιας διατομής. Στην μέση υπάρχει το εξεταζόμενο κάθε φορά δείγμα ενώ στην αρχή και στο τέλος υπάρχουν πλήρως απορροφητικές συνοριακές συνθήκες (Perfectly Matched Layers (PML)). Ένα εισερχόμενο ακουστικό κύμα θεωρείται στο ένα μέρος του σωλήνα (αρχική πίεση  $p_i$ ) ενώ μετά το δείγμα καταγράφεται η διαδιδόμενη ακουστική πίεση  $p_t$ . Η απώλεια διάδοσης υπολογίζεται από την σχέση  $STL = -20\log(p_t/p_i)$ . Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα αριθμητικά μοντέλα των δύο περιπτώσεων που μελετήθηκαν. Για κάθε μοντέλο εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Η απλή περίπτωση (Simple Model (SM)) και η περίπτωση στην οποία θεωρήθηκαν συνθήκες στενής περιοχής (Narrow Region Model (NRM)) στους κυλινδρικούς αγωγούς της δομής προκειμένου να βελτιωθεί η σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα στις χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση της απλής δομής (a) και της δομής με ατέλεια (b).

### 1.3 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη μέτρησης του STL ήταν το ολοκληρωμένο σύστημα Transmission Loss Tube Kit type 4206-T της Brüel & Kjær το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 1.3(a). Οι μετρήσεις έγιναν με τα πρότυπα ASTM E2611-09 [8]. Η πειραματική διαδικασία διευθυνόταν από το λογισμικό PULSE LabShop έκδοση 18.1 της Brüel & Kjær. Τα δείγματα, τα οποία εξωτερικά είναι όμοια και ο σχεδιασμός των οποίων αναλύθηκε, εκτυπώθηκαν στον εκτυπωτή «daVinci Super» της XYZ-Printing και μετρήθηκαν 5 φορές το καθένα. Τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζουν την μέση τιμή τους. Το τυπικό σφάλμα στις μετρήσεις ήταν μικρότερο από 2.5% δεικνύοντας πολύ καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων και επομένως αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Στα Σχήματα 1.3(b) και 1.3(c) φαίνονται αντίστοιχα ένα εκ των δειγμάτων και ο εκτυπωτής στον οποίο έγινε η εκτύπωση.



Σχήμα 1.3. (a) Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της ακουστικής απώλειας διάδοσης (Transmission Loss Tube Kit type 4206-T) της Brüel & Kjaer, (b) Το ένα εκ των εκτυπωμένων δειγμάτων, (c) ο εκτυπωτής «daVinci Super» της XYZ-Printing στον οποίο έγινε η εκτύπωση των τρισδιάστατων δειγμάτων.

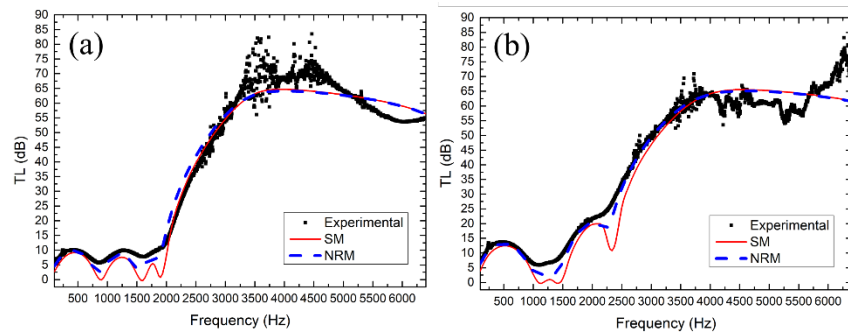
#### 1.4 Αποτελέσματα

Το ΦΜ που εξετάστηκε αποτελείται, όπως ήδη αναλύθηκε από σφαίρες αέρα σε διάταξη απλού κυβικού πλέγματος, οι οποίες συνδέονται με κυλινδρικούς αγωγούς στην ίδια διάταξη. Η ακτίνα των σφαιρών είναι  $R = 0.395\alpha$  και η ακτίνα των κυλινδρικών αγωγών  $r = 0.085\alpha$ , όπου  $\alpha = 29$  mm η πλεγματική σταθερά. Για την εξεταζόμενη διεύθυνση διάδοσης, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο Σχήμα 1.4(a), το θεωρητικά υπολογισμένο ΦΧ, όπως προέκυψε από τον υπολογισμό του διαγράμματος διασποράς, ήταν μεταξύ 1.84 kHz και 9.51 kHz [7]. Όπως είναι φανερό από την μέτρηση του STL η αύξηση στην τιμή του ταυτίζεται με την τιμή που είχε θεωρητικά προβλεφθεί σχετικά με την αρχή του ΦΧ. Παράλληλα, όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές του STL για την περίπτωση των τριών μοναδιαίων κυψελίδων που εξετάστηκαν εδώ είναι σημαντικά αυξημένες, ιδιαίτερα στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 3.0 kHz και 4.5 kHz, σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις με δύο μοναδιαίες κυψελίδες [7].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία έχει προστεθεί και ατέλεια στην δομή. Στην περίπτωση που εξετάστηκε η σφαίρα στην ενδιάμεση μοναδιαία κυψελίδα είχε ακτίνα ίση με  $R_d = 0.5R$ , όπως φαίνεται στην αναπαράσταση του αριθμητικού μοντέλου στο Σχήμα 1.2(b). Στην περίπτωση αυτή το αριθμητικό μοντέλο έδειξε μία κατάσταση εξαιτίας της ατέλειας στην συχνότητα των 2.35 kHz όπως φαίνεται στην αντίστοιχη καμπύλη με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 1.4(b). Η κατάσταση αυτή γίνεται αντιληπτή ως ένα μικρό τοπικό ελάχιστο στην καμπύλη του STL γύρω από αυτήν την συχνότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν αυτήν την κατάσταση λόγω της ατέλειας ως ένα ασθενές τοπικό ελάχιστο γύρω από την συχνότητα των 2.25 kHz όπως φαίνεται στα πειραματικά δεδομένα, με μαύρα τετράγωνα στίγματα, του Σχήματος 1.4(b).

Η απόκλιση μεταξύ του θεωρητικού μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι μικρότερη από 5% και οφείλεται στις ενδογενείς απώλειες της δομής. Αυτό γίνεται ξεκάθαρο όταν στο αριθμητικό μοντέλο θεωρηθούν συνθήκες

NRM στους κυλινδρικούς αγωγούς οπότε και τα αποτελέσματα βελτιώνονται σημαντικά τόσο για την περίπτωση της δομής χωρίς ατέλεια όσο και για την περίπτωση της δομής με ατέλεια όπως είναι φανερό από την διακεκομμένη μπλε καμπύλη στα διαγράμματα του Σχήματος 1.4.



Σχήμα 1.4. Πειραματικά αποτελέσματα (μαύρη καμπύλη) και αριθμητικοί υπολογισμοί (κόκκινη καμπύλη για το SM και μπλε διακεκομμένη καμπύλη για το NRM) για το ΦΜ που εξετάστηκε στην περίπτωση που δεν υπάρχει ατέλεια (a) και στην περίπτωση που υπάρχει ατέλεια (b).

## 2. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η περίπτωση ενός ΦΜ που αποτελείται από σφαίρες αέρα συνδεδεμένες με κυλινδρικούς αγωγούς σε διάταξη απλού κυβικού πλέγματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση στην οποία στο ΦΜ προστέθηκε ατέλεια. Η ατέλεια αυτή είχε ως συνέπεια της εμφάνιση επιπλέον κατάστασης εντός του ΦΧ η οποία και μετρήθηκε πειραματικά. Η ύπαρξη τέτοιων δομών, όπως αυτή που μελετήθηκε, που έχουν την ιδιότητα να αποκόπτουν τα ακουστικά κύματα σε τέτοιο εύρος, αλλά και επιπρόσθετα η δημιουργία καταστάσεων λόγω ατελειών εντός του ΦΧ, δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης πλήθους εφαρμογών στηριγμένες σε αυτές τις ιδιότητες όπως ακουστικά φίλτρα, ακουστική μόνωση, αισθητήρες καθώς και πηγές ήχου με έντονη κατευθυντικότητα.

## 3. Αναφορές

- [1] M. M. Sigalas and E. N. Economou, "Elastic and acoustic waves band structure", *Journal of Sound and Vibration* **158** (2), 377 (1992).
- [2] A. Khelif and A. Adibi, "Phononic Crystals. Fundamentals and Applications", Springer-Verlag New York (2016).
- [3] F. Lucklum and M. J. Vellekoop, "Bandgap engineering of three-dimensional phononic crystals in a simple cubic lattice", *Applied Physics Letters* **113**, 201902 (2018).
- [4] N. Aravantinos-Zafirios, F. Lucklum and M. M. Sigalas, "Complete phononic band gaps in the 3D Yablonovite structure with spheres", *Ultrasonics* **110**, 106265 (2021).

[5] O. R. Bilal, D. Ballagi, and C. Daraio. “Architected Lattices for Simultaneous Broadband Attenuation of Airborne Sound and Mechanical Vibrations in All Directions”, *Physical Review Applied* **10**, 054060 (2018).

[6] N. Aravantinos-Zafiris, M. M. Sigalas, and D. T. G. Katerelos, “Phononic metamaterial for efficient sound attenuation applications”, *Building Acoustics* **29**, 203 (2022).

[7] N. Aravantinos-Zafiris, M. M. Sigalas, and D. T. G. Katerelos, “Complete Acoustic Band Gaps in a three-dimensional phononic metamaterial with simple cubic arrangement”, Submitted to *Applied Acoustics* (Under Review).

[8] ASTM E2611-09: *Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method*, (American Society for Testing and Materials, New York, 2009).

## ***Αναλυτικές λύσεις για το πεδίο περίθλασης γύρω από ακμή πεπερασμένου μήκους***

Πέτρος Νικολάου                      Πηνελόπη Μενούνου  
Πανεπιστήμιο Πατρών,              Πανεπιστήμιο Πατρών,  
petros7nikolaou@gmail.com      menounou@upatras.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία προτείνονται δύο λύσεις για την περίθλαση σφαιρικού κύματος γύρω από ακουστικά σκληρή ακμή. Η πρώτη λύση είναι ολοκλήρωμα κατά μήκος της ακμής και σε αντίθεση με υπάρχουσες λύσεις: i) είναι απλή στον υπολογισμό ii) ομαδοποιεί τις 8 μεταβλητές του προβλήματος της περίθλασης από πεπερασμένη ακμή σε 2 μεταβλητές επιτρέποντας έτσι καλύτερη κατανόηση της φυσικής του προβλήματος και iii) επιτρέπει τον ορισμό και τον *a priori* υπολογισμό του κρίσιμου μήκους της ακμής μετά το οποίο μια ακμή μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ως άπειρη. Η δεύτερη λύση είναι αναλυτική προσέγγιση της πρώτης και δεν απαιτεί ολοκλήρωση κατά μήκος της ακμής πράγμα που την κάνει υπολογιστικά γρηγορότερη. Τέλος η προσεγγιστική λύση δεν έχει μεγάλη απόκλιση από την αναλυτική, ενώ σε υπολογισμούς ηχομείωσης η διαφορά των δύο δεν ξεπερνά τα 0.12dB.

### ***Analytical solutions for diffraction around finite edges***

#### **ABSTRACT**

*In this paper two solutions for the diffraction of a spherical wave around an acoustically hard edge are presented. The first solution is an integral along the edge. In comparison with other integral solutions, the presented solution: i) is easy to compute, ii) reduces the number of the independent variables of the finite diffraction problem from 8 to just 2, thus allowing better physical understanding of the problem, and iii) can be used for the definition and the a priori calculation of the critical length after which the edge can be considered to behave as an infinite edge. The second solution is an analytical approximation of the first solution and does not require integration along the edge, which makes it faster to calculate. Finally, the approximate solution does not yield considerable relative error compared to the analytical solution. In calculations of insertion loss the difference between the two solutions does not exceed 0.12dB.*

#### **Εισαγωγή**

Στην παρούσα εργασία μελετάται η περίθλαση ενός σφαιρικού κύματος από τις ακμές ενός ακουστικά σκληρού αντικειμένου. Στην πλειοψηφία τους οι υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις για το πεδίο περίθλασης μοντελοποιούν μια περιθλούσα ακμή ως ακμή άπειρου μήκους. Η προσέγγιση της άπειρης ακμής ωστόσο, δεν είναι ακριβής όταν το μήκος της ακμής είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με το μήκος κύματος. Στις περιπτώσεις αυτές το πραγματικό μήκος της ακμής πρέπει να ληφθεί υπόψιν στον

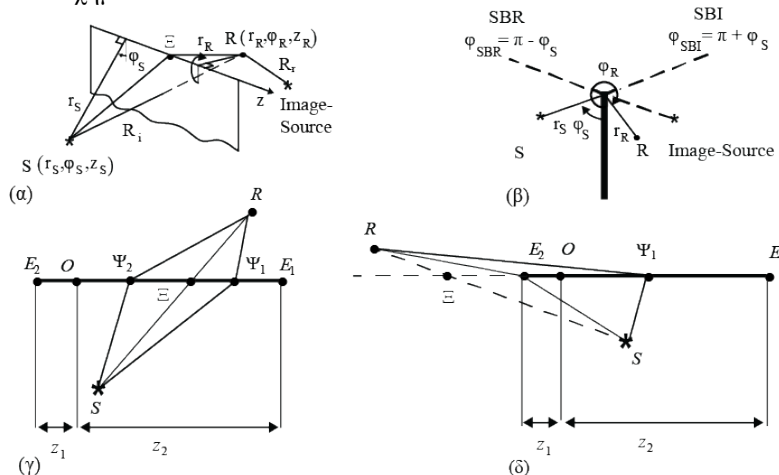
υπολογισμό της περίθλασης. Οι υπάρχουσες αναλυτικές λύσεις έχουν τη μορφή ολοκληρώματος κατά μήκος της ακμής [1] [2], με την πιο διαδεδομένη (σύμφωνα με όσα γνωρίζουν οι συγγραφείς) εκείνη των Svensson et al.[3] Οι υπάρχουσες λύσεις είναι κυρίως εργαλεία υπολογισμού περίθλασης από πεπερασμένη ακμή χωρίς να καταδεικνύουν χαρακτηριστικά της φυσικής του προβλήματος, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην Svensson et al., απαιτούνται προσεγγίσεις της υπό ολοκλήρωση ποσότητας πράγμα που αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο αυτών των λύσεων.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο λύσεις για το πεδίο περίθλασης πεπερασμένης ακμής. Η μία λύση είναι ολοκλήρωμα κατά μήκος της ακμής η οποία σε σύγκριση με τις υπάρχουσες λύσεις: i) βοηθάει στην κατανόηση της φυσικής του προβλήματος μειώνοντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος από 8 σε 2, ii) η μείωση μεταβλητών επιτρέπει τον a priori υπολογισμό του κρίσιμου μήκους της ακμής μετά το οποίο η ακμή μπορεί να θεωρηθεί άπειρη και iii) η υπό ολοκλήρωση ποσότητα έχει απλή μορφή και δε χρειάζονται προσεγγίσεις της κάτι που καθιστά τη νέα λύση υπολογιστικά γρηγορότερη σε σχέση με υπάρχουσες λύσεις. Η δεύτερη λύση είναι μία προσέγγιση της πρώτης, η οποία δεν απαιτεί ολοκλήρωση κατά μήκος της ακμής, διατηρεί σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της πρώτης λύσης και μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο ακόμα περισσότερο.

Η γεωμετρία του προβλήματος και η λύση για άπειρη ακμή παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 1, η νέα λύση για την πεπερασμένη ακμή στο κεφάλαιο 2, ο υπολογισμός του κρίσιμου μήκους στο κεφάλαιο 3. και η προσεγγιστική λύση που δεν απαιτεί ολοκλήρωση στο κεφάλαιο 4.

## 1. Γεωμετρία του προβλήματος – λύση άπειρης ακμής

Η γεωμετρία του προβλήματος περίθλασης από πεπερασμένη ακμή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1. Τρισδιάστατη γεωμετρία περιθλούσας ακμής (α), ακμή σε πλάγια όψη (β), ακμή σε κάτοψη με το σημείο αναφοράς  $\Xi$  πάνω στην ακμή (γ), ακμή σε κάτοψη με το σημείο αναφοράς  $\Xi$  έξω από την ακμή (δ).

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι κυλινδρικό και έχει την ευθεία φορέα της ακμής ως z-άξονα [Σχήμα 1 (α)]. Οι συντεταγμένες της πηγής  $S$  και του δέκτη  $R$  δίνονται από  $(r_s, \phi_s, z_s)$  και  $(r_r, \phi_r, z_r)$  αντίστοιχα. Το σύνορο σκιάς της πρόσπτωσης ονομάζεται  $SBI$ , το σύνορο σκιάς της ανάκλασης  $SBR$  και οι γωνιακές τους θέσεις φαίνονται στο Σχήμα 1 (β). Η πλάγια τομή μιας άπειρης ακμής είναι αρκετή για την μελέτη της περίθλασης γύρω από άπειρη ακμή. Για πεπερασμένες ακμές ωστόσο η κάτοψη της ακμής [Σχήματα 1 (γ),(δ)] είναι επίσης απαραίτητη. Για την μελέτη του προβλήματος στην κάτοψη επιλέγεται αυθαίρετα η αρχή του συστήματος συντεταγμένων  $O(0,0,0)$  κατά μήκος της ακμής  $z=0$  (κάτι που δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση της άπειρης ακμής). Οι θέσεις των άκρων της ακμής ορίζονται με βάση τη θέση τους ως προς το  $O$  ως  $E_1(0,0,z_1)$  και  $E_2(0,0,z_2)$ . Η συντομότερη διαδρομή από την πηγή στην ευθεία της ακμής και μετά στο δέκτη ονομάζεται διαδρομή αναφοράς,  $L = \sqrt{(r_s + r_r)^2 + (z_r - z_s)^2}$ . Το σημείο τομής της ευθείας φορέα της ακμής με την προβολή της συντομότερης διαδρομής από την πηγή μέχρι το δέκτη, ονομάζεται σημείο αναφοράς και συμβολίζεται με  $\Xi$ . Η θέση του πάνω στην ακμή είναι  $(0,0,z_\Xi)$ , όπου  $z_\Xi = (z_r r_s + z_s r_r) / (r_s + r_r)$ . Το σημείο αναφοράς μπορεί να βρίσκεται είτε πάνω στην ακμή [Σχήμα 1 (γ)] είτε εκτός της ακμής [Σχήμα 1 (δ)]. Τέλος, οι απευθείας αποστάσεις από τον δέκτη στην πηγή και από την πηγή είδωλο στο δέκτη [Σχήμα 1 (α),(β)] ονομάζονται  $R_i$  και  $R_r$  αντίστοιχα και δίνονται από  $R_{i,r} = \sqrt{r_s^2 + r_r^2 - 2r_s r_r \cos(\phi_r \mp \phi_s) + (z_r - z_s)^2}$ .

Για την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί η λύση για την άπειρη ακμή που έχει προταθεί σε προηγούμενη εργασία των συγγραφέων, [4]

$$P_{\text{infinite}} = P_{\text{infinite}}^i + P_{\text{infinite}}^r = -j \cdot \text{sign} \left( \cos \left( \frac{\phi_r - \phi_s}{2} \right) \right) \sqrt{\frac{1}{L(L+R_i)}} e^{j\omega L/c - j\pi/4} e^{-j\omega \tau_{lag}^i} \left[ \frac{1-j}{2} + jF \left( \sqrt{\frac{2}{\pi}} \omega \tau_{lag}^i \right) \right] - j \cdot \text{sign} \left( \cos \left( \frac{\phi_r + \phi_s}{2} \right) \right) \sqrt{\frac{1}{L(L+R_r)}} e^{j\omega L/c - j\pi/4} e^{-j\omega \tau_{lag}^r} \left[ \frac{1-j}{2} + jF \left( \sqrt{\frac{2}{\pi}} \omega \tau_{lag}^r \right) \right], \quad (1.1)$$

όπου  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα,  $j$  η φανταστική μονάδα και  $F$  το ολοκλήρωμα Fresnel  $F = \int_0^x \frac{\pi}{2} e^{ju^2} du$ . Ο όρος  $P_{\text{infinite}}^i$  σχετίζεται με το την πρόσπτωση ενώ ο όρος

$P_{\text{infinite}}^r$  σχετίζεται με την κατοπτρική ανάκλαση από την επιφάνεια που φωτίζεται από την πηγή. Οι παράμετροι  $\tau_{lag}^i = (L - R_i) / c$  και  $\tau_{lag}^r = (L + R_r) / c$  ( $c$  η ταχύτητα του ήχου) είναι συναρτήσεις των γωνιακών αποστάσεων του δέκτη από τα σύνορα σκιάς  $SBI$  και  $SBR$ , αντίστοιχα, καθώς και της ακτινικής απόστασης της πηγής και του δέκτη από την ακμή.

## 2. Αναλυτική λύση και κρίσιμο μήκος

Μια λύση για το πεδίο περίθλασης από πεπερασμένη ακμή στο πεδίο των συχνοτήτων μπορεί να παραχθεί από το μετασχηματισμό αντίστοιχης λύσης στο πεδίο του χρόνου που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενη δουλειά των συγγραφέων [4]. Συγκεκριμένα ο μετασχηματισμός Fourier της Εξ. (5.6) της αναφοράς [4] δίνει

$$P = \int_{\Xi E_1} \pm \int_{\Xi E_2} = P_1 \pm P_2 = q_1^i + q_1^r \pm q_2^i \pm q_2^r. \quad (2.1)$$

Η λύση απαιτεί δύο ολοκληρώσεις, μία κατά μήκος του τμήματος  $\Xi E_1$  ( $P_1$ ) και μία κατά μήκος του τμήματος  $\Xi E_2$  ( $P_2$ ). Το (-) αφορά την περίπτωση του Σχήματος 1 (δ) όπου το τμήμα  $\Xi E_2$  δεν ανήκει στην ακμή και άρα η συνεισφορά του πρέπει να αφαιρεθεί από τη συνεισφορά του  $\Xi E_1$  για το συνολικό αποτέλεσμα. Το ολοκλήρωμα  $P_1$  χωρίζεται σε δύο επιμέρους ολοκληρώματα  $q_1^i$  και  $q_1^r$ , τα οποία σχετίζονται με τα πεδία της πρόσπτωσης και της ανάκλασης αντίστοιχα. Παρομοίως το  $P_2$  χωρίζεται σε  $q_2^i$  και  $q_2^r$ . Τα επιμέρους ολοκληρώματα έχουν όλα την ίδια μορφή:

$$q_1^i = g^i \left[ \underbrace{2e^{is^i \Pi_1^i} \arctan(\sqrt{\Pi_1^i}) - 2iS^i \cdot \int_0^{\Pi_1^i} e^{is^i X} \arctan(\sqrt{X}) dX}_{H_1^i} \right] \quad (2.2)$$

$$g^i = \frac{-\text{sign} \left[ \cos \left( \frac{\phi_R - \phi_S}{\gamma} \right) \right] e^{i\omega L/c}}{4\pi\sqrt{\pi}\sqrt{L(L+R_i)}}, \quad X = \frac{\tau}{\tau_{lag}^i}, \quad S^i = \omega\tau_{lag}^i, \quad \Pi_1^i = \frac{\tau_1}{\tau_{lag}^i}$$

Για δεδομένες θέσεις πηγής-δέκτη, η μεταβλητή ολοκλήρωσης  $X$  μεταβάλλεται μόνο με την μεταβλητή  $\tau$ ,  $c\tau = \sqrt{(z-z_S)^2 + r_S^2} + \sqrt{(z-z_R)^2 + r_R^2}$ , η οποία εκφράζει το χρόνο που μεσολαβεί από την άφιξη του ήχου μέσω της συντομότερης διαδρομής (διαδρομής αναφοράς) και μέσω της διαδρομής που περνάει από ένα τυχαίο σημείο  $\Psi_1$  πάνω στην ακμή. Για λόγους συντομίας ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος επανακτινοβολίας. Το άνω άκρο της ολοκλήρωσης αντιστοιχεί στο άκρο  $E_1$  και στο μέγιστο χρόνο επανακτινοβολίας του τμήματος  $\Xi E_1$ ,  $\tau_1$ .

Το ολοκλήρωμα της Εξ. (2.2) δεν έχει απειρισμούς, συνεπώς δε χρειάζεται πυκνή διακριτοποίηση ούτε άλλη προσέγγιση της υπό ολοκλήρωση ποσότητας όπως για παράδειγμα στην μέθοδο Svensson et al.[3]. Το γεγονός αυτό δίνει στην Εξ. (2.2) υπολογιστικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

Η γραφική παράσταση του μέτρου  $|q_1^i|$  με μεταβαλλόμενο το μήκος της ακμής  $z_1$  (ή ισοδύναμα το μέγιστο χρόνο επανακτινοβολίας  $\tau_1$ ) χωρίζεται σε δύο περιοχές. Η πρώτη εντοπίζεται σε μικρά μήκη  $z_1$  και είναι μια περιοχή όπου το μέτρο  $|q_1^i|$  έχει γραμμική μορφή. Η δεύτερη περιοχή αφορά μεγαλύτερα μήκη  $z_1$  και σε αυτήν το μέτρο  $|q_1^i|$  έχει ταλαντωτική μορφή με μέση τιμή ίση με  $|q_1^i| = 0.5 |P_{infinite}^i|$ . Οι δύο



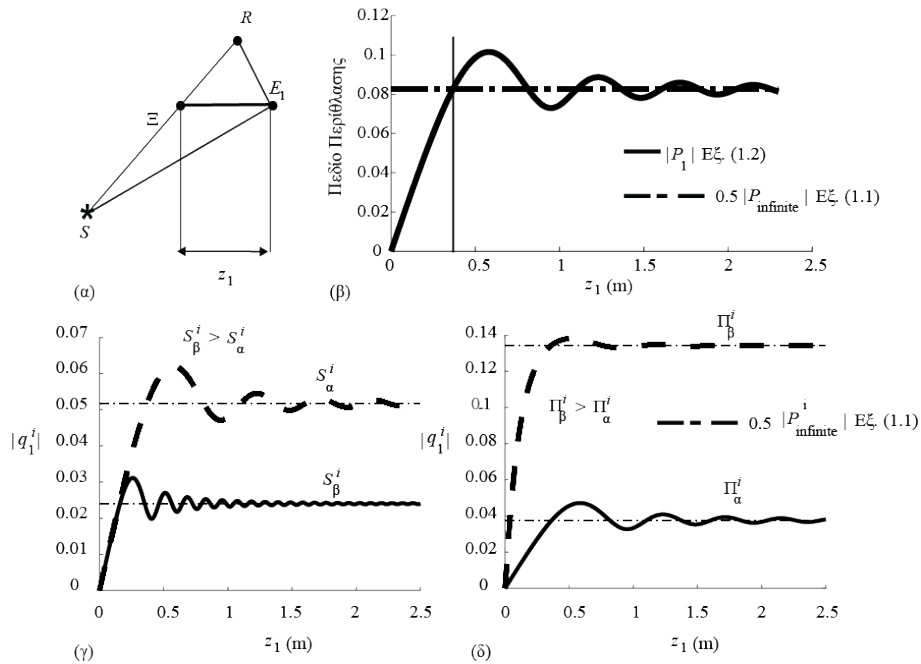
περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους στο σημείο όπου η λύση για την άπειρη ακμή  $0.5|P_{\infty}^i|$  τέμνει τη γραμμική περιοχή [Σχήμα 2(β)]. Το σημείο τομής αντιστοιχεί στο κρίσιμο μήκος μετά το οποίο η ακμή μπορεί να θεωρηθεί άπειρη.

Ο όρος  $q_1^i$  [Εξ. (2.2)] είναι γινόμενο δύο όρων τον  $g^i$  και τον  $H_1^i$ . Από αυτούς μόνο ο όρος  $H_1^i$  εξαρτάται από το μήκος της ακμής εφόσον περιέχει το χρόνο επανακτινοβολίας από το άκρο της ακμής  $E_1$ ,  $\tau_1$ , ενώ ο όρος  $g^i$  είναι ανεξάρτητος του μήκους της ακμής. Συνεπώς το πρόβλημα της πεπερασμένης ακμής καθορίζεται από τον όρο  $H_1^i$ . Ο όρος  $H_1^i$  συγκεντρώνει την εξάρτηση του προβλήματος από 8 μεταβλητές (συντεταγμένες δέκτη-πηγής, συχνότητα και μήκος ακμής) σε μόλις 2 μεταβλητές,  $S^i$  και  $\Pi_1^i$ . Παρακάτω εξηγείται η εξάρτηση του μέτρου  $|q_1^i|$  από τις μεταβλητές  $S^i$  και  $\Pi_1^i$ .

Η μεταβλητή  $S^i$  είναι συνάρτηση της συχνότητας, της απόστασης του δέκτη από το σύνορο σκιάς  $SBI$ , καθώς και των αποστάσεων πηγής και δέκτη από την ακμή. Μεγάλες τιμές του  $S^i$  παραπέμπουν σε μεγάλες συχνότητες και θέσεις δέκτη μακριά από το  $SBI$  και την ακμή, ενώ αντίθετα μικρές τιμές του  $S^i$  παραπέμπουν σε μικρές συχνότητες και δέκτες κοντά στην ακμή ή το σύνορο σκιάς  $SBI$ . Στο Σχήμα 2.1 (γ) απεικονίζεται το μέτρο  $|q_1^i|$  ως προς το μήκος της ακμής  $z_1$  για δύο διαφορετικά  $S^i$ . Στη γραφική παράσταση με το μεγαλύτερο  $S^i$  το κρίσιμο μήκος είναι μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο μικρότερο  $S^i$ . Ακόμα η γραφική παράσταση με το μεγαλύτερο  $S^i$  παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά μεγαλύτερης συχνότητας και ταχύτερης απόσβεσης σε σχέση με την γραφική παράσταση του μικρού  $S^i$ . Επίσης από ένα μήκος και μετά η γραφική παράσταση με το μικρότερο  $S^i$  έχει μεγαλύτερες τιμές από εκείνη με το μεγαλύτερο  $S^i$ . Τέλος παρατηρείται ότι η γραμμική περιοχή στις δύο γραφικές παραστάσεις έχει την ίδια κλίση.

Η μεταβλητή  $\Pi_1^i$  καθορίζει το πόσο μεγάλο είναι το τμήμα  $\Xi E_1$  σε σχέση με το πόσο κοντά είναι ο δέκτης στο σύνορο σκιάς. Το Σχήμα 2.1 (δ) απεικονίζει το μέτρο  $|q_1^i|$  ως προς το μήκος της ακμής  $z_1$  για δύο διαφορετικούς δέκτες έναν κοντά στο σύνορο σκιάς  $SBI$  και έναν μακριά από το σύνορο σκιάς. Για δεδομένο μήκος  $z_1$  και άρα δεδομένο  $\tau_1$ , ο δέκτης κοντά στο σύνορο σκιάς αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο  $\Pi_1^i$  ενώ ο δέκτης μακριά από το σύνορο σκιάς αντιστοιχεί σε μικρότερο  $\Pi_1^i$ . Η γραφική παράσταση με το μεγαλύτερο  $\Pi_1^i$  έχει μεγαλύτερο μέτρο  $|q_1^i|$  και ταλαντωτική συμπεριφορά μικρότερης συχνότητας και έντασης από ότι αυτή με το μικρότερο  $\Pi_1^i$ . Επιπλέον η γραμμική περιοχή της γραφικής παράστασης με το μικρότερο  $\Pi_1^i$  έχει μικρότερη κλίση σε σχέση με αυτήν του μεγαλύτερου  $\Pi_1^i$ . Το κρίσιμο μήκος δε διαφέρει ιδιαίτερα στις δύο γραφικές παραστάσεις είναι ωστόσο λίγο μεγαλύτερο στην γραφική παράσταση μεγαλύτερου  $\Pi_1^i$ . Όλες οι παραπάνω

παρατηρήσεις σχετικά με το μέτρο ισχύουν και για τη φάση του  $q_1^i$ . Ας σημειωθεί, ότι εξετάζονται τόσο το μέτρο όσο και η φάση, επειδή το  $q_1^i$  είναι μιγαδικό.



Σχήμα 2. Πεπερασμένη ακμή μόνο με τμήμα  $\Xi E_1$  (α). Πεδίο περίθλασης για την ακμή  $\Xi E_1$ ,  $\omega=2\pi 500$  (β).  $|q_1^i|$  για μεγάλο  $S^i$  [ $\omega=2\pi 5000$ ] και μικρό  $S^i$  [ $\omega=2\pi 500$ ] πηγή  $S(2m, \pi/2, 0)$ , δέκτης  $R(1m, 11\pi/6, 0)$  (γ).  $|q_1^i|$  για μεγάλα  $\Pi_1^i$  [ $S(2m, \pi/2, 0)$ ,  $R(1m, 11\pi/6, 0)$   $\omega=2\pi 500$ ] και για μικρά  $\Pi_1^i$  [ $S(2m, \pi/2, 0)$ ,  $R(1m, 11\pi/6, 0)$   $\omega=2\pi 500$ ]. (δ).

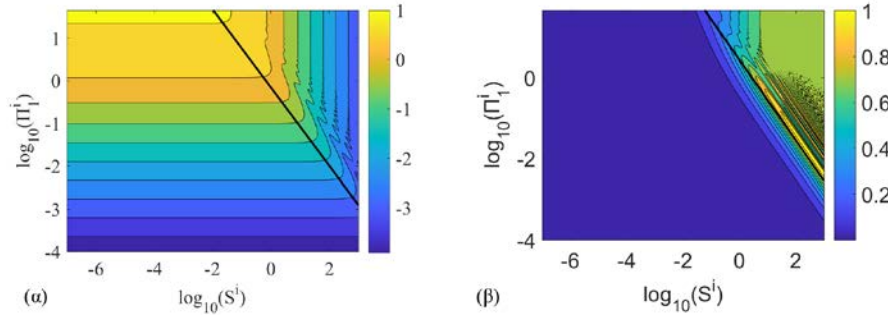
Το μήκος της ακμής εμφανίζεται έμμεσα στην Εξ. (2.2) μέσα από τον χρόνο επανακτινοβολίας  $\tau_1$ . Έτσι ορίζουμε ως κρίσιμους χρόνους επανακτινοβολίας  $\zeta_1^i$  και  $\eta_1^i$  τους χρόνους που αντιστοιχούν στα κρίσιμα μήκη για το μέτρο και τη φάση του  $q_1^i$ . Ο υπολογισμός των κρίσιμων χρόνων επανακτινοβολίας μπορεί να γίνει από την Εξ. (2.2) (βλέπε κεφάλαιο 3) και τα κρίσιμα μήκη προκύπτουν από αυτούς.

### 3. Υπολογισμός κρίσιμων χρόνων επανακτινοβολίας

Για τους κρίσιμους χρόνους επανακτινοβολίας  $\zeta_1^i$  και  $\eta_1^i$  τυπώνουμε ισοψείς μέτρου και φάσης (Σχήμα 3.1) του όρου που εξαρτάται από το μήκος της ακμής  $H_1^i$  ως προς  $S^i$  και  $\Pi_1^i$ . Στα δύο διαγράμματα ισοψών διακρίνονται δύο ευθείες γραμμές, οι οποίες διαχωρίζουν τις ισοψείς σε γραμμικές περιοχές και σε περιοχές

με ταλαντωτική συμπεριφορά. Αυτές οι δύο ευθείες καθορίζουν τους κρίσιμους χρόνους επανακτινοβολίας του μέτρου και φάσης. Από τις εξισώσεις των γραμμών αυτών προκύπτουν:

$$\begin{aligned}\zeta_1^i &= 10^{\left[2.217-0.994(\ln(S^i)+2.327)+\log_{10}(\tau_{lag}^i)\right]}, \text{ μέτρο} \\ \eta_1^i &= 10^{\left[1.54-0.981(\ln(S^i)+1.155)+\log_{10}(\tau_{lag}^i)\right]}, \text{ φάση}\end{aligned}\quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1 Ισοϋψείς του μέτρου (α) και της φάσης (β) του όρου  $H_1^i$  [Εξ. (2.2)].

#### 4. Γρήγορη προσεγγιστική λύση

Η γνώση των κρίσιμων χρόνων επανακτινοβολίας επιτρέπει την ανάπτυξη μιας προσεγγιστικής λύσης που δεν απαιτεί ολοκλήρωση και βοηθάει στον ταχύτερο υπολογισμό της περίθλασης πεπερασμένης ακμής. Η λύση αναπτύσσεται με βάση την παρατήρηση ότι για μικρούς χρόνους επανακτινοβολίας η λύση πεπερασμένης ακμής (μέτρο και φάση) έχει σχεδόν γραμμική μορφή και μπορεί να προσεγγιστεί με μια απλή συνάρτηση ενώ για μεγαλύτερους χρόνους επανακτινοβολίας η λύση έχει ταλαντωτική συμπεριφορά που έχει όμως μέση τιμή ίση με το ένα δεύτερο της λύσης για άπειρη ακμή. Αν συμβολίσουμε με  $\varepsilon_1^i$  την προσέγγιση του  $q_1^i$  τότε,

$$|\varepsilon_1^i| = \begin{cases} 2 \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_{lag}^i}}\right), & \tau_1 \leq \zeta_1^i \\ 0.5 |P_{infinite}^i|, & \tau_1 > \zeta_1^i \end{cases}, \quad (4.1)$$

$$\text{angle}(\varepsilon_1^i) = \begin{cases} \left[ \begin{aligned} & p_1 + p_2 \log_{10}(\tau_2 / \tau_{lag}^{di}) + p_3 \log_{10}(\omega \tau_{lag}^{di}) \\ & + p_4 \left[ \log_{10}(\tau_2 / \tau_{lag}^{di}) \right]^2 + p_5 \log_{10}(\tau_2 / \tau_{lag}^{di}) \log_{10}(\omega \tau_{lag}^{di}) \\ & + p_6 \left[ \log_{10}(\tau_2 / \tau_{lag}^{di}) \right]^3 + p_7 \left[ \log_{10}(\tau_2 / \tau_{lag}^{di}) \right]^2 \log_{10}(\omega \tau_{lag}^{di}) \end{aligned} \right], & \tau_1 \leq \eta_1^i \\ 0.5 \text{angle}(P_{infinite}^i), & \tau_1 > \eta_1^i \end{cases} \quad (4.2)$$

όπου  $p_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, 12$  είναι συντελεστές ελαχίστων τετραγώνων που φαίνονται στον πίνακα 4.1. Ο υπολογισμός των  $0.5 |P_{infinite}^i|$  και  $0.5 \text{angle}(P_{infinite}^i)$  απαιτεί τον

υπολογισμό ολοκληρωμάτων Fresnel ο οποίος είναι ιδιαίτερα χρονοβόρος. Για το λόγο αυτό προτείνονται οι παρακάτω προσεγγίσεις,

$$0.5|P_{\text{infinite}}^i| = c^i a_1 e^{-\left(\frac{x-a_2}{a_3}\right)^2} + c^i a_4 e^{-\left(\frac{x-a_5}{a_6}\right)^2} + \dots + c^i a_{10} e^{-\left(\frac{x-a_{11}}{a_{12}}\right)^2}, \quad x = \ln(\omega \tau_{\text{lag}}^i)$$

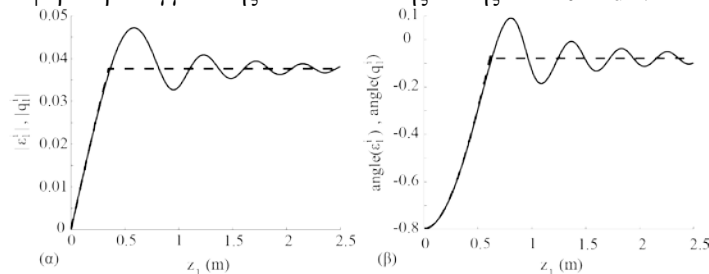
$$0.5 \text{angle}(P_{\text{infinite}}^i) = c^i b_1 e^{-\left(\frac{x-a_2}{a_3}\right)^2} + c^i b_4 e^{-\left(\frac{x-a_5}{a_6}\right)^2} + \dots + c^i b_{10} e^{-\left(\frac{x-a_{11}}{a_{12}}\right)^2}, \quad y = \omega \tau_{\text{lag}}^i \quad (4.3)$$

$$c^i = \sqrt{2r_s r_r \pi / c} \left| \cos[0.5(\phi_s - \phi_r)] \right| g^i$$

Πίνακας 4.1. Συντελεστές Εξ. (4.2)-(4.3).

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$p$	-1.34	1.93	2.30	-0.17	-0.01	-	-6.76	-	-	-	-	-
$a$	3.00	-	11.22	0.65	-3.22	3.71	1.66	-	6.72	0.33	-	2.56
		17.79						6.45			1.03	
$b$	2.08	13.29	2.96	0.00	3.76	0.04	0.20	1.39	2.85	0.77	6.29	7.14

Το Σχήμα 4.1 δείχνει τη σύγκριση της προσεγγιστικής λύσης [Εξ. (4.1)-(4.3)] και της αναλυτικής λύσης [Εξ. (2.2)]. Η απόκλιση της προσεγγιστικής λύσης από την αναλυτική για την πεπερασμένη ακμή οφείλεται στην προσέγγιση της ταλαντωτικής περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Έπειτα από υπολογιστική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι τα μέγιστα σφάλματα δεν ξεπερνούν το 11% για το μέτρο και το 25% για τη φάση. Στην δε περίπτωση υπολογισμού ηχομείωσης η μέγιστη διαφορά προσεγγιστικής και αναλυτικής λύσης είναι 0.12dB.



Σχήμα 4.1 Προσεγγιστική (--) [Εξ. (4.1)-(4.3)] και αναλυτική λύση (-) [Εξ. (2.2)] για το μέτρο (α) και τη φάση (β),  $\omega=2\pi 500$ , πηγή  $S(2m, \pi / 6, 0)$ , δέκτης  $R(1m, 5\pi / 3, 0)$ .

## 5. Αναφορές

- [1] T. F. W. Embleton «Line integral theory of barrier attenuation in the presence of the ground» J.Acoust. Soc. Am. **67**, pp 42-45 (1980).
- [2] A. L. Esperance «The insertion loss of finite length barriers on the ground» J.Acoust. Soc. Am. **67**, pp 42-45 (1980).
- [3] U. P. Svensson, P. T. Calamia, & S. Nakanishi «Frequency-Domain Edge Diffraction for Finite and Infinite Edges» Act. Acoust. Acoust. **95**, pp 568-572 (2009).
- [4] P. Nikolaou «A contribution to the theoretical study and numerical calculation of edge diffraction» PhD thesis, University of Patras (2020).

## **Ακουστικό Πεδίο γύρω από Neumann πλάκα μηδενικού πάχους**

Πέτρος Νικολάου  
Πανεπιστήμιο Πατρών  
petros7nikolaou@gmail.  
com

Αριστέα Χελιδώνη  
Πανεπιστήμιο Πατρών  
up1067353@upnet.gr

Πηνελόπη Μενούνου  
Πανεπιστήμιο Πατρών  
menounou@upatras.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου γύρω από ακουστικά σκληρή ορθογώνια πλάκα. Οι μέθοδοι υπολογίζουν το ακουστικό πεδίο ως υπέρθεση του γεωμετρικού ακουστικού πεδίου και των πεδίων περίθλασης από τις τέσσερις ακμές της πλάκας. Η λύση για την περίθλαση που χρησιμοποιείται για τη μια μέθοδο είναι αναλυτική γι' αυτό και η μέθοδος αυτή ονομάζεται αναλυτική μέθοδος. Η λύση που χρησιμοποιείται για τη δεύτερη μέθοδο είναι προσεγγιστική γι' αυτό και η μέθοδος αυτή ονομάζεται προσεγγιστική μέθοδος. Από την εφαρμογή των νέων μεθόδων διαπιστώνεται η καλή τους συμφωνία με παρόμοιες υπάρχουσες μεθόδους, με άλλες μεθόδους που αντιμετωπίζουν την πλάκα ως ενιαίο σώμα καθώς και με πειραματικά δεδομένα. Τέλος διαπιστώνεται ότι οι δύο νέες μέθοδοι είναι υπολογιστικά γρηγορότερες κατά τάξεις μεγέθους σε σχέση με υπάρχουσες μεθόδους ενώ η προσεγγιστική μέθοδος είναι γρηγορότερη από την αναλυτική κατά δύο τάξεις μεγέθους.

## ***Acoustic field around a Neumann rectangular plate of zero thickness***

### **ABSTRACT**

*In this paper, two methods for calculating the acoustic field around an acoustically hard rectangular plate are presented. The methods are used to calculate the acoustic field as superposition of the geometrical acoustic field and the diffraction fields from the four edges of the plate. The solution for the diffraction field used in the first method is analytical, thus the method is called the analytical method. The solution used in the second method is approximate hence the method is called the approximate method. Results of the application of the new methods show that they are in good agreement with similar existing methods, with other methods that treat the plate as a single body, and with experimental data. Finally, it is demonstrated that the two new methods are computationally faster by orders of magnitude compared to existing methods, while the approximate method is faster than the analytical method by two orders of magnitude.*

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα υπολογισμού του ακουστικού πεδίου γύρω από ακουστικά σκληρή (Neumann) πλάκα μηδενικού πάχους. Οι μέθοδοι αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος προέρχονται κυρίως από το ολοκλήρωμα Helmholtz-Kirchhoff[1] και είναι αναλυτικές[2] ή αριθμητικές[3]. Αυτές οι μέθοδοι αντιμετωπίζουν την πλάκα ως ένα ενιαίο σώμα και καταλήγουν στην αναλυτική ή αριθμητική επίλυση ενός επιφανειακού ή επικαμπύλιου ολοκληρώματος.

Μία πιο πρόσφατη ιδέα είναι η αντιμετώπιση του προβλήματος ως υπέρθεση όρων γεωμετρικού ακουστικού πεδίου (πρόσπτωση και κατοπτρική ανάκλαση) και όρων περίθλασης από τις τέσσερις ακμές της πλάκας. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται σκέδαση μέσω περίθλασης[4]. Σε σχέση με τις παραδοσιακές Helmholtz-Kirchhoff μεθόδους, η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την καλύτερη φυσική κατανόηση του προβλήματος καθώς βασίζεται σε απλούστερες και εκτενέστερα μελετημένες έννοιες, τους νόμους της γεωμετρικής οπτικής και τη θεωρία περίθλασης. Επιπλέον, οι υπάρχουσες λύσεις για την περίθλαση είναι αρκετά απλές και σε συνδυασμό με αποδοτικούς αλγορίθμους υπολογισμού του γεωμετρικού πεδίου μπορούν να έχουν πολύ μικρότερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τις μεθόδους Helmholtz-Kirchhoff. Το μειονέκτημα της μεθόδου σκέδασης μέσω περίθλασης είναι ότι οι υπάρχουσες λύσεις για την περίθλαση αφορούν κυρίως την άπειρη ακμή [5],[6]. Αυτό οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα στις περιπτώσεις που το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις τις πλάκας. Για το λόγο αυτό οι σύγχρονες εφαρμογές της μεθόδου σκέδασης μέσω περίθλασης χρησιμοποιούν λύσεις περίθλασης για την πεπερασμένη ακμή[4].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η σκέδαση μέσω περίθλασης για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου γύρω από ακουστικά σκληρή πλάκα για πρόσπτωση επίπεδου και σφαιρικού κύματος. Για τον υπολογισμό της περίθλασης χρησιμοποιούνται δύο νέες λύσεις για την πεπερασμένη ακμή, μία αναλυτική και μία προσεγγιστική. Η αναλυτική λύση σε σύγκριση με άλλες αναλυτικές λύσεις είναι απλούστερη και δεν περιέχει απειρισμούς πράγμα που την καθιστά υπολογιστικά αποδοτικότερη. Η προσεγγιστική λύση προκύπτει από την αναλυτική διατηρώντας σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια αυτής ενώ σε σχέση με την αναλυτική λύση απαιτεί τάξεις μεγέθους λιγότερο υπολογιστικό χρόνο.

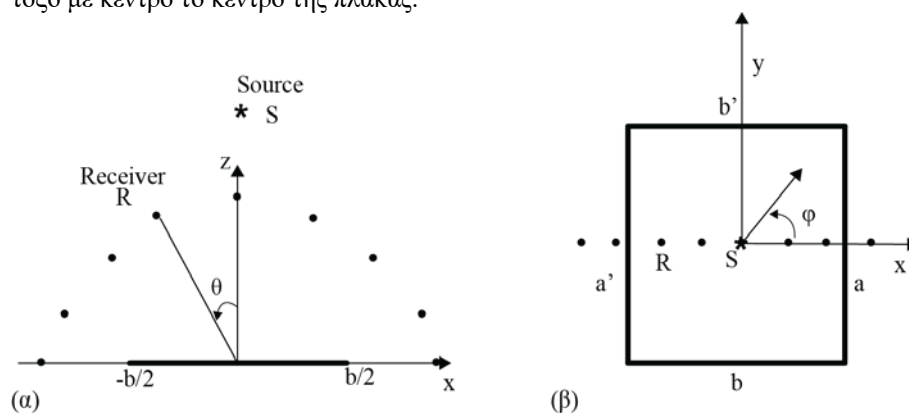
Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος και οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται συγκρίσεις με άλλες μεθόδους. Στο κεφάλαιο 3 συγκρίνεται ο υπολογιστικός χρόνος της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με άλλες μεθόδους.

### 1. Προτεινόμενες Μέθοδοι

Η παρούσα μεθοδολογία υπολογίζει το ακουστικό πεδίο γύρω από την πλάκα ως υπέρθεση της κατοπτρικής ανάκλασης από την επιφάνεια της πλάκας και των περιθλάσεων που δημιουργούνται από τις ακμές της πλάκας. Το γεωμετρικό πεδίο υπολογίζεται με την μέθοδο των εικονικών πηγών, ενώ για το πεδίο περίθλασης χρησιμοποιούνται δύο νέες λύσεις για πεπερασμένες ακμές.[7] Η μία λύση προκύπτει από ολοκλήρωση κατά μήκος της ακμής και την ονομάζουμε αναλυτική ενώ η άλλη λύση αποτελεί προσέγγιση της προηγούμενης και αναφερόμαστε σε αυτήν ως

προσεγγιστική. Αυτές οι λύσεις παρουσιάζονται εκτενώς στην αναφορά [7]. Για συντομία, τη μέθοδο σκέδασης-περίθλασης που χρησιμοποιεί τη νέα αναλυτική λύση, την ονομάζουμε αναλυτική μέθοδο ενώ τη μέθοδο που χρησιμοποιεί την προσεγγιστική λύση την ονομάζουμε προσεγγιστική μέθοδο. Μια άλλη μέθοδος σκέδασης μέσω περίθλασης που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή που χρησιμοποιεί τη λύση περίθλασης των Svensson et al.[8] στην οποία θα αναφερόμαστε απλά ως μέθοδο Svensson et al.

Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται έχει ως κέντρο το κέντρο της πλάκας. Η πηγή βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της πλάκας και οι δέκτες σε ένα ημικυκλικό τόξο με κέντρο το κέντρο της πλάκας.



Σχήμα 1.1 Γεωμετρία πλάκας πλάγια όψη (α) και 3D όψη (β)

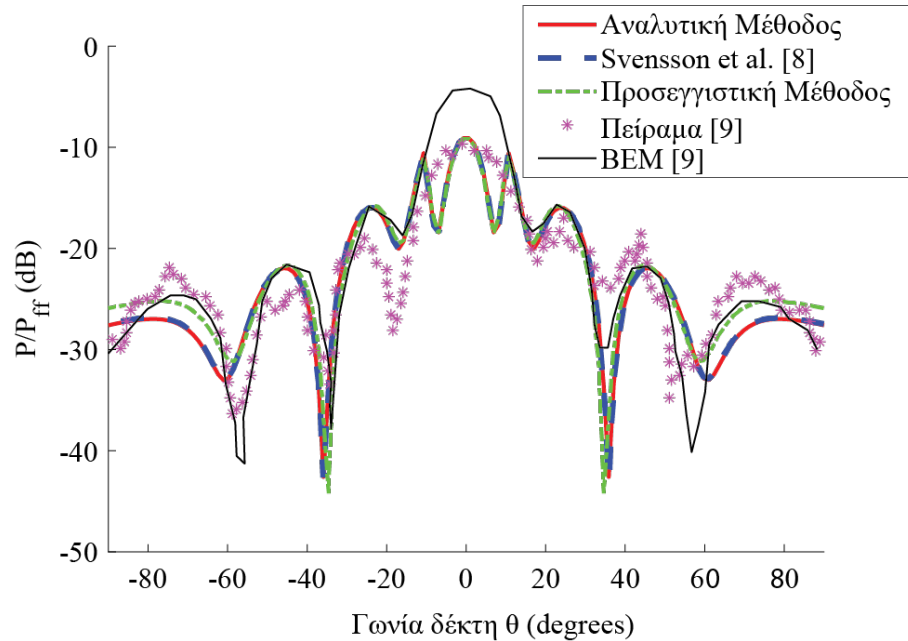
## 2. Σύγκριση μεθόδων και πείραμα

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκρίσεις των δύο προτεινόμενων μεθόδων με άλλες υπάρχουσες μεθόδους και με πειραματικά δεδομένα. Συγκρίσεις παρουσιάζονται για σφαιρικό και για επίπεδο προσπίπτον κύμα. Οι μέθοδοι που συγκρίνονται στην περίπτωση του σφαιρικού κύματος είναι η αριθμητική μέθοδος BEM (Boundary Element Method)[9], η μέθοδος των Svensson et al.[8], η προτεινόμενη αναλυτική μέθοδος και η προτεινόμενη προσεγγιστική μέθοδος. Από αυτές τις μεθόδους μόνο η πρώτη προέρχεται από το ολοκλήρωμα Helmholtz-Kirchhoff. Επιπλέον για τις συγκρίσεις στην περίπτωση του σφαιρικού κύματος χρησιμοποιούνται και διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα[9]. Στην περίπτωση του επίπεδου κύματος συγκρίνουμε την αναλυτική και προσεγγιστική μέθοδο με την αναλυτική μέθοδο PTD (Physical Theory of Diffraction)[2], που προέρχεται από το ολοκλήρωμα Helmholtz-Kirchhoff, και με πειραματικά δεδομένα[10].

### 2.1 Σφαιρικό Κύμα

Οι συγκρίσεις για το σφαιρικό προσπίπτον κύμα αντιστοιχούν στη γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 1.1 και παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.1 και 2.2. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται οι ηχομιώσεις που υπολογίζονται με την αναλυτική μέθοδο, την

προσεγγιστική μέθοδο, τη μέθοδο Svensson et al. και τη μέθοδο BEM και συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα.



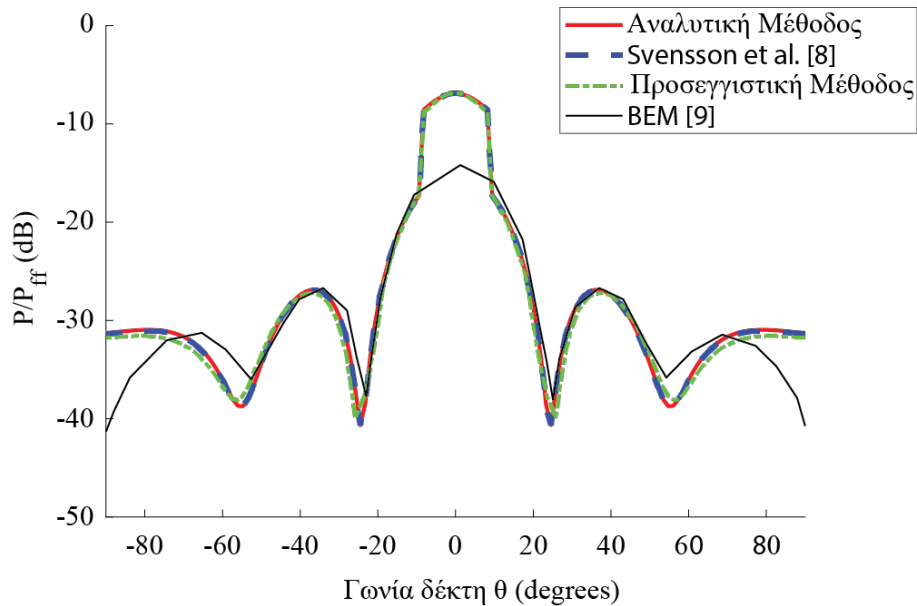
Εικόνα 2.1 Ηχομείωση περίθλασης σφαιρικού κύματος για ορθογώνια πλάκα διαστάσεων  $a=0.96m$  και  $b=0.151m$  (βλέπε Σχήμα 1.1), συχνότητα  $3995 Hz$ , πηγή  $(x, y, z) \equiv (0, 0, 3.96m)$  και δέκτες σε ημικύκλιο ακτίνας  $r = 1.178m$ .

Η αναλυτική και η προσεγγιστική μέθοδος είναι σε καλή συμφωνία τόσο με το πείραμα όσο και με την μέθοδο BEM αλλά και με τη μέθοδο Svensson et al. Συγκεκριμένα, η αναλυτική μέθοδος ταυτίζεται με τη Svensson et al. κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς οι λύσεις που χρησιμοποιούνται για την περίθλαση στις δύο μεθόδους ταυτίζονται για μεγάλες συχνότητες. Η προσεγγιστική μέθοδος φαίνεται να αποκλίνει από τη Svensson et al. και την αναλυτική μέθοδο για δέκτες στα άκρα του ημικύκλιου (Σχήμα 1.1). Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η συχνότητα της πηγής είναι σε μια περιοχή τιμών όπου η προσεγγιστική λύση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη της απόκλιση σε σχέση με την αναλυτική. Τέλος, φαίνεται ότι η μέθοδος BEM κατά μέσο όρο είναι καλύτερη για δέκτες κοντά στις άκρες του ημικυκλίου ενώ αποκλίνει αρκετά στο κέντρο.

Μία ακόμα σύγκριση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2 για το σφαιρικό κύμα. Σε αντίθεση με την προηγούμενη σύγκριση η πλάκα έχει μικρότερες διαστάσεις και η πηγή είναι μικρότερης συχνότητας. Οι μέθοδοι που συγκρίνονται είναι ίδιες. Ωστόσο, πειραματικά δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα για αυτήν τη σύγκριση. Σε σχέση με την προηγούμενη σύγκριση η αναλυτική μέθοδος συμπίπτει πάλι με τη μέθοδο Svensson et al., ενώ η προσεγγιστική μέθοδος είναι και αυτή σε πολύ καλή συμφωνία με τις προαναφερθείσες. Η καλή συμφωνία οφείλεται στο γεγονός ότι αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση η προσεγγιστική λύση για αυτήν τη συχνότητα δεν



παρουσιάζει απόκλιση από την αναλυτική λύση. Τέλος σημειώνεται ότι οι γραφικές παραστάσεις των τριών μεθόδων που βασίζονται στη σκέδαση μέσω περίθλασης (αναλυτική, προσεγγιστική και Svensson et al.) παρουσιάζουν ένα λοβό στο κέντρο που δεν εμφανίζεται στη γραφική παράσταση της μεθόδου BEM.

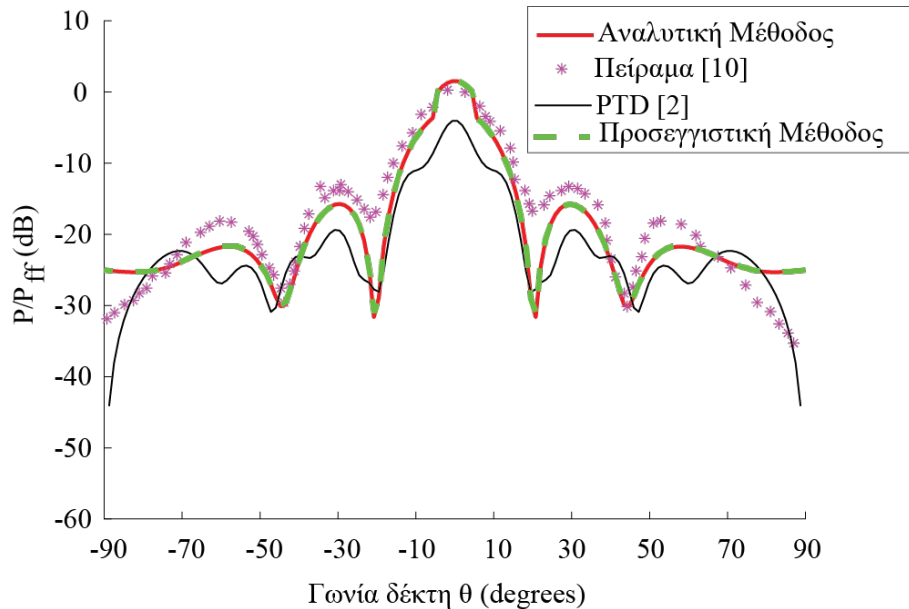


Εικόνα 2.2 Ηχομείωση περίθλασης σφαιρικού κύματος για ορθογώνια πλάκα διαστάσεων  $a=0.12m$  και  $b=0.206m$  (βλέπε Σχήμα 1.1), συχνότητα 2000 Hz με πηγή  $(x, y, z) \equiv (0, 0, 5m)$  και δέκτες σε ημικύκλιο ακτίνας  $r = 2m$ .

## 2.2 Επίπεδο Κύμα

Η σύγκριση για το επίπεδο προσπίπτον κύμα φαίνεται στο Σχήμα 2.3 όπου απεικονίζονται οι ηχομειώσεις που έχουν προκύψει από την αναλυτική μέθοδο, την προσεγγιστική μέθοδο και την μέθοδο PTD, οι οποίες συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα.

Όλες οι μέθοδοι βρίσκονται σε καλή συμφωνία με το πείραμα ωστόσο η αναλυτική και η προσεγγιστική μέθοδος φαίνεται ότι συμφωνούν καλύτερα με το πείραμα από ότι η PTD μέθοδος για όλες τις θέσεις δέκτη. Τέλος σημειώνεται ότι η αναλυτική και η προσεγγιστική μέθοδος δεν παρουσιάζουν καμία απόκλιση μεταξύ τους.

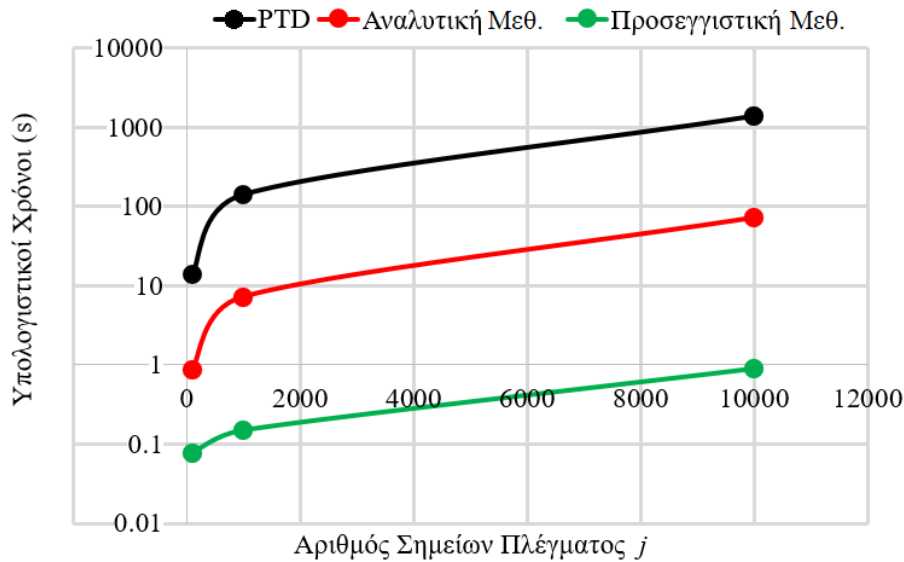


Εικόνα 2.3 Ηχομείωση περίθλασης επίπεδου κύματος για ορθογώνια πλάκα διαστάσεων  $a=0.305m$  και  $b=0.245m$  (βλέπε Σχήμα 1.1), συχνότητα  $2000Hz$  με πηγή επίπεδο κύμα με κατεύθυνση  $-z$  και δέκτες σε ημικύκλιο ακτίνας  $r = 2.5m$ .

### 3. Υπολογιστικός Χρόνος

Στο παρόν κεφάλαιο συγκρίνουμε την ταχύτητα των υπολογισμών των προτεινόμενων μεθόδων (αναλυτικής και προσεγγιστικής) σε σχέση με την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο PTD[2] για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου επίπεδου κύματος γύρω από πλάκα. Στις συγκρίσεις αυτές μετριέται ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται από τις 3 αυτές μεθόδους για τον υπολογισμό ακουστικού πεδίου σε πλέγμα δεκτών το οποίο έχει τη μορφή του Σχήματος 1.1.

Οι υπολογιστικοί χρόνοι μετριούνται για τις τρεις μεθόδους για τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος. Συγκεκριμένα η πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να είναι  $j=100$ ,  $1000$  ή  $10000$  σημεία. Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.1.



Εικόνα 3.1: Υπολογιστικοί χρόνοι της προτεινόμενης αναλυτικής μεθόδου, της προτεινόμενης προσεγγιστικής μεθόδου και της μεθόδου PTD. Επίπεδο προσπίπτον κύμα συχνότητας 2000Hz σε πλέγμα δεκτών (Σχήμα 1.1).

Οι προτεινόμενες λύσεις είναι αρκετά πιο γρήγορες από την PTD για όλους τους αριθμούς σημείων του πλέγματος. Συγκεκριμένα η αναλυτική μέθοδος είναι μια τάξη μεγέθους ταχύτερη από την PTD, ενώ η προσεγγιστική είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους γρηγορότερη από την PTD και δύο τάξεις μεγέθους από την αναλυτική μέθοδο. Η υπεροχή των προτεινόμενων μεθόδων σε σύγκριση με την PTD οφείλεται στο ότι βασίζονται σε απλές λύσεις για την περίθλαση πεπερασμένης ακμής ενώ η PTD προκύπτει από το ολοκλήρωμα Helmholtz-Kirchhoff και απαιτεί τον υπολογισμό ολοκληρωμάτων Fresnel.

#### 4. Αναφορές

- [1] M. Born & E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford , New York (1970).
- [2] P. Y. Ufimtsev, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, Wiley Interscience, New Jersey (2014).
- [3] S. Kopuz, Y. S Unlusoy & M. Caliskan, «Integrated FEM/BEM approach to the dynamic and acoustic analysis of plate structures», *J. Eng. An. Boun. El.* **17** pp. 269-277 (1996)
- [4] A. Asheim & U. P. Svensson, «An integral equation formulation for the diffraction from convex plate and polyhedra», *J. Acoust. Soc. Am.* **133**, pp. 3681-3691 (2013).
- [5] R. G. Kouyoumijian & P. H. Pathak, «A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface», in *Proceedings of the IEEE*, vol **62**, no 11, pp. 1448-1461 (1974).

- [6] P. Nikolaou «A contribution to the theoretical study and numerical calculation of edge diffraction» PhD thesis, University of Patras (2020).
- [7] Π. Νικολάου & Π. Μενούνου, «Αναλυτικές λύσεις για το πεδίο περίθλασης γύρω από ακμή πεπερασμένου μήκους», *in ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2022* (2022).
- [8] U. P. Svensson, P. T. Calamia, & S. Nakanishi «Frequency-Domain Edge Diffraction for Finite and Infinite Edges» *Act. Acoust. Acoust.* **95**, pp. 568-572 (2009).
- [9] T. Cox & Y. Lam, «Evaluation of the methods for predicting the scattering from simple rigid panels », *Applied Acoustics* **40** pp. 123-140 (1993).
- [10] A. Rozynova & N. Xiang, «Sound diffraction prediction of a rectangular rigid plate using the physical theory of diffraction» *J. Acoust. Soc. Am.* **145**, pp. 2677-2680 (2019).

## **Μελέτη υπερβραχέων ακουστικών κυμάτων σε διαστρωματωμένα υλικά με την μέθοδο άντλησης – ανίχνευσης με ακτινοβολία λέιζερ**

Κυριακή Κοσμά<sup>1,2</sup>, Κωνσταντίνος Καλέρης<sup>1,2</sup>, Ευάγγελος Κασελούρης<sup>1,2</sup>,  
Εμμανουήλ Κανιολάκης Καλούδης<sup>1,2</sup>,  
Βασίλειος Δημητρίου<sup>1,2</sup>, Ευθύμιος Μπακαρέζος<sup>1,2</sup>, Μιχαήλ Ταταράκης<sup>1,3</sup> και  
Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,  
74100, Τρία Μοναστήρια Ρέθυμνο

<sup>2</sup> Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής  
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74133,  
Περιβόλια Ρέθυμνο

<sup>3</sup> Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133  
Χαλέπα, Χανιά

\*npapadogiannis@hmu.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την παραγωγή εξαιρετικά υψίσυχνων ακουστικών κυμάτων σε υλικά με την χρήση οπτοακουστικής μετατροπής υπερβραχέων παλμών λέιζερ σε μηχανικά κύματα. Τα παραγόμενα ακουστικά κύματα έχουν συχνότητες από δεκάδες GHz μέχρι και λίγα THz, με μήκη κύματος στην περιοχή των μm έως μερικά nm αντίστοιχα, δίνοντας εξαιρετική διακριτική ικανότητα στην περίπτωση της χρήσης τους σε νανοσκοπικό δομικό και ελαστομηχανικό χαρακτηρισμό υλικών. Στη παρούσα εργασία παρουσιάζονται εφαρμογές της παραπάνω μεθόδου που αναπτύχθηκαν στο Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ σε συνεργασία με το Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.*

### ***Study of ultrashort acoustic strains in layered materials using the method pumping – detection with laser radiation***

#### **ABSTRACT**

*In recent years, new methods have been developed for the generation of extremely high-frequency acoustic waves in materials using optoacoustic conversion of ultrashort laser pulses into mechanical waves. The generated acoustic waves have frequencies from tens of GHz up to a few THz, with wavelengths in the range of μm to a few nm respectively, providing excellent spatial resolution when they are used in nanoscopic structural and elasto-mechanical characterization of materials. This paper presents applications of this method developed at the Institute of Plasma Physics and Lasers in collaboration with the Laboratory of Physics Acoustics and Optoacoustics, Department of Music Technology and Acoustics, Hellenic Mediterranean University.*

## Εισαγωγή

Είναι ευρέως γνωστή η χρήση των υπερήχων για απεικόνιση και μελέτη δομών με εξαιρετικές εφαρμογές σε μακροσκοπικά υλικά και στην βιοϊατρική [1-3]. Τα τελευταία χρόνια με την ραγδαία ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας η επιστήμη των υλικών οδηγείται σε όλο και μικρότερες δομές, πολύ κάτω του 1  $\mu\text{m}$ . Ο δομικός και ελαστο-μηχανικός χαρακτηρισμός αυτών των δομών αποκλείει τη χρήση πηγών φωτός στο ορατό φάσμα, λόγω του νανομετρικού χαρακτήρα της απεικόνισης αλλά και του γεγονότος ότι πολλά υλικά είναι αδιαφανή στο ορατό φως. Έτσι μόνο πολύ υψηλής συχνότητας ακτίνες Χ μπορεί να προσφέρουν ικανοποιητικές δυνατότητες χαρακτηρισμού. Επειδή η οπτική των ακτίνων-Χ είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και κοστοβόρα και επίσης επειδή συχνά οι ακτίνες-Χ είναι καταστρεπτικές για τα υλικά αυτά (π.χ. βιοϋλικά), απαιτούνται κύματα που να έχουν μεν μήκος κύματος στην περιοχή  $< 1 \mu\text{m}$ , αλλά να είναι μη καταστρεπτικά, να μπορούν να διεισδύουν στο εσωτερικό των υλικών και να μπορούν να παρατηρηθούν με σχετικά εύκολες πειραματικές διατάξεις. Υποψήφια τέτοια κύματα θα μπορούσαν να είναι ακουστικά κύματα με εξαιρετικά υψηλές συχνότητες ώστε το μήκος κύματός τους και συνεπώς οι απεικονιστικές τους δυνατότητες να έχουν διακριτική ικανότητα μικρότερη του 1  $\mu\text{m}$ . Κλασικοί πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς δεν μπορούν να παράγουν κύματα με συχνότητες μεγαλύτερες από λίγα GHz, αφού περιορίζονται από τα ηλεκτρονικά της διαμόρφωσης των τάσεων που απαιτούνται, τα οποία πολύ δύσκολα είναι ταχύτερα από 1 ns.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας των παλμικών λέιζερ, είναι πλέον σύνηθες τα εργαστήρια λέιζερ να διαθέτουν συστήματα που παράγουν οπτικούς παλμούς της τάξης των λίγων fs ( $1\text{fs}=10^{-15}\text{ s}$ ). Όταν τέτοιοι παλμοί αλληλεπιδρούν με μεταλλικές επιφάνειες το φως διεγείρει άμεσα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τους, δίνοντάς τους υψηλές ενέργειες της τάξης των eV. Τα ηλεκτρόνια αυτά που μετά την θερμοποίησή τους έχουν θερμοκρασίες χιλιάδων βαθμών Kelvin, μέσα σε λίγα ps ( $1\text{ps}=10^{-12}\text{ s}$ ) αποδίδουν την ενέργειά τους στο μεταλλικό πλέγμα μέσω διαδικασιών σκέδασης ηλεκτρονίων-φωτονίων. Επειδή η ενέργεια του φωτός απορροφάται σε βάθος λίγων nm στο μεταλλικό υλικό, η παραπάνω διαδικασία είναι εξαιρετικά χωρικά εντοπισμένη, δημιουργώντας έναν παλμό ακουστικής τάσης με ανάλογα χαρακτηριστικά, ο οποίος διαδίδεται κάθετα στην επιφάνεια του μετάλλου. Ο μεταλλικός οπτοακουστικός μετατροπέας επικάθεται πάνω στο υπό μελέτη (διαστρωματωμένο) υλικό (υπόστρωμα), του οποίου τα ελαστο-μηχανικά χαρακτηριστικά θέλουμε να μελετήσουμε. Η μελέτη γίνεται με τη χρήση μιας δεύτερης δέσμης λέιζερ, προερχόμενης από τον αρχικό παλμό, η οποία με κατάλληλο οπτικό σύστημα προσπίπτει στο διαστρωματωμένο υλικό σε επιλεγμένο χρόνο (δέσμη ελέγχου). Η δέσμη ελέγχου ανακλάται τόσο από την διεπιφάνεια αέρα-διαστρωματωμένου υλικού όσο και από το ακουστικό κύμα καθώς αυτό διαδίδεται μέσα στο υπό μελέτη υπόστρωμα. Η συμβολή αυτών των δύο επιμέρους δεσμών φωτός μπορεί να μας δώσει σημαντικές πληροφορίες για την α) αρχική ηλεκτρονιακή διέγερση του μετάλλου καθώς αλλάζει το ποσοστό ανακλαστικότητας της δέσμης ελέγχου από το μέταλλο, β) την ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού κύματος στο υπό μελέτη υλικό, καθώς αλλάζει η ένταση της συμβολής των οπτικών δεσμών που ανακλώνται από την επιφάνεια και το οδεύον ακουστικό κύμα. Όταν το ακουστικό

κύμα περάσει από περιοχή που η ακουστική εμπέδηση διαφοροποιηθεί μέρος του ανακλάται προς τα πίσω (ηχώ) και φτάνοντας στην επιφάνεια μπορεί να ανιχνευτεί από την δέσμη ελέγχου όταν αυτή έχει την κατάλληλη χρονοκαθυστέρηση, δίνοντας μεγάλης ακρίβειας προφίλομετρία στην διαστρωμάτωση των διαφορετικών υλικών [11, 12]. Επιπρόσθετα ανοίγονται πλέον νέες δυνατότητες για την μελέτη ελαστομηχανικών ιδιοτήτων υλικών σε σχέση με την θερμοκρασία του υλικού και με άλλες ιδιότητες του υλικού όπως μαγνητικές ιδιότητες, αλλαγή φάσης, ποιότητα διαστρωμάτωσης και ύπαρξη ατελειών.

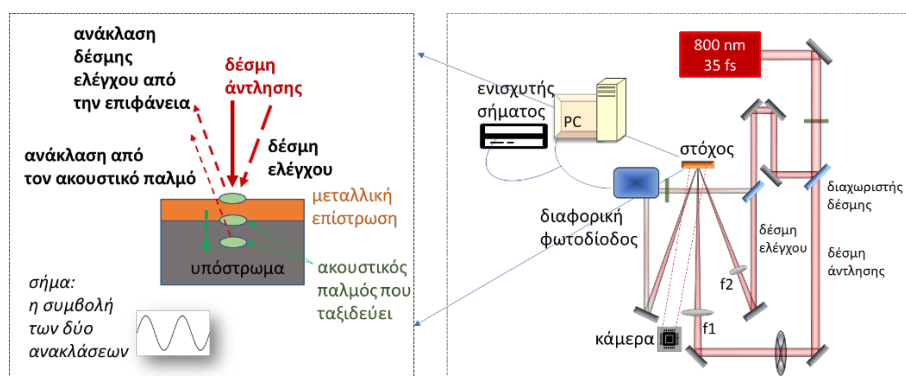
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται α) η πειραματική διάταξη δημιουργίας και ανίχνευσης υπερήχων εξαιρετικά υψηλής έντασης που βασίζεται σε παλμούς λέιζερ διάρκειας μερικών δεκάδων fs, β) η χρήση της διάταξης αυτής για προφίλομετρία και συγκεκριμένα για μέτρηση πάχους επίστρωσης λεπτού φιλμ Au πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα, γ) η χρήση της διάταξης για μέτρηση της αλλαγής της ταχύτητας του ήχου στο κρυσταλλικό Πυρίτιο λόγω θερμικής φόρτισης και δ) αρχικά αποτελέσματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης της μεθόδου άντλησης – ελέγχου.

## **1. Πειραματική διάταξη δημιουργίας και ανίχνευσης υψίσυχνων υπερήχων από υπερβραχείς παλμούς laser**

Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται οπτική διάταξη άντλησης-ελέγχου (pump-probe) για τη δημιουργία και ανίχνευση υπερήχων υψηλής συχνότητας που βασίζεται στη μέθοδο της διαφορικής ανακλαστικότητας από το διαστρωματωμένο υλικό. Η δέσμη άντλησης (fs παλμός λέιζερ-pump) εστιάζει στο δείγμα υπό μελέτη και δημιουργεί ένα χωρικά εντοπισμένο ελαστικό παλμό παραμόρφωσης (ακουστικό κύμα), ο οποίος αποτελείται από διαμήκη ακουστικά φωνονικά κύματα που διαδίδονται κάθετα στην επιφάνεια, ενώ η δέσμη ανίχνευσης (probe) εστιάζει στον στόχο μετά από μεταβαλλόμενη χρονοκαθυστέρηση ως προς τη δέσμη άντλησης, η οποία εισάγεται μέσω ελεγχόμενης μεταβολής του οπτικού δρόμου που διανύει η δέσμη ανίχνευσης. Η δέσμη ανίχνευσης συναντά αρχικά τη διεπιφάνεια αέρα-μεταλλικού οπτοακουστικού μετατροπέα και μέρος της ανακλάται. Το υπόλοιπο μέρος εισέρχεται στο μέταλλο και μέρος του απορροφάται εντός λίγων nm. Έτσι, μεγάλο μέρος της ενέργειας του παλμού αποδίδεται σε πολύ μικρό όγκο δημιουργώντας εντοπισμένη κι έντονη ελαστομηχανική παραμόρφωση. Η παραμόρφωση ταξιδεύει προς το εσωτερικό του διαστρωματωμένου υλικού και μέρος της ανακλάται κάθε φορά που συναντά διεπιφάνεια υλικού. Επειδή το μεταλλικό φιλμ είναι εξαιρετικά λεπτό, μέρος της οπτικής δέσμης εισέρχεται στο υπόστρωμα και ανακλάται από την διαδιδόμενη ελαστική παραμόρφωση που έχει εισέλθει σε αυτό. Το σύστημα άντλησης-ελέγχου επιτρέπει την καταγραφή των μεταβολών στο σήμα της συμβολής του μέρους της οπτικής δέσμης που ανακλάται από την επιφάνεια του διαστρωματωμένου υλικού και αυτού που ανακλάται από το οδεύον ακουστικό σήμα (Brillouin Scattering). Οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με τη δυναμική συμπεριφορά της διάδοσης του ακουστικού κύματος μέσα στο υπο μελέτη υλικό και κατά συνέπεια με τη δυναμική του πλέγματος του υλικού.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε Ti:Sapphire λέιζερ στα 800 nm με διάρκεια παλμού ~35 fs, μέγιστη ενέργεια ανά παλμό ~1 mJ και ρυθμό επανάληψης 1 kHz. Για

τα συγκεκριμένα πειράματα αρκεί οπτική ενέργεια άντλησης της τάξης των λίγων δεκάδων  $\mu J$  εστιασμένη σε διάμετρο περίπου  $100 \mu m$ , ενώ η ενέργεια της δέσμης ανίχνευσης πρέπει να είναι περίπου 10 φορές μικρότερη και εστιασμένη στο κέντρο της δέσμης άντλησης στη μισή περίπου διάμετρο. Μια σειρά από οπτικά στοιχεία, όπως διαχωριστές δέσμης, κάτοπτρα, φίλτρα και φακοί εστίασης οδηγούν τις δύο δέσμες στην επιφάνεια του στόχου με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά σε σχέση με την ένταση και το μέγεθος των δεσμών, αλλά και με ελεγχόμενη σχετική χρονοκαθυστέρηση (βλ. Σχήμα 1.1). Έτσι, η δέσμη ελέγχου διαβάζει την δυναμική αλλαγή του πλέγματος κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Τα ηλεκτρονικά ανίχνευσης του σήματος της διαφορικής ανακλαστικότητας επιτρέπουν μετρήσεις αλλαγής ( $\Delta R/R$ ) της τάξης μέχρι και  $10^{-5}$ . Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της διαφορικής φωτοδιόδου με δύο εισόδους (δέσμη ελέγχου πριν και μετά την πρόσπτωση στο δείγμα) και με ειδικό ενισχυτή σήματος εγκλειδωσής φάσης (Lock-in Amplifier) στη συχνότητα της επαναληψιμότητας που η δέσμη άντλησης προσπίπτει στο δείγμα. Η τελευταία αλλάζει κατά το δοκούν με ειδική περιστοφική διάταξη με οπτικά ανοίγματα (chopper) και μπορεί να αλλάζει με συχνότητες από μερικά  $Hz$  μέχρι το  $1 KHz$  που είναι η ονομαστική επαναληψιμότητα του fs συστήματος laser. Στα πειράματα παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο χρησιμοποιούμε συχνότητα  $270 Hz$ .



Σχήμα 1.1 Πειραματική οπτική διάταξη άντλησης-ελέγχου μέτρησης διαφορικής ανακλαστικότητας δημιουργίας και μελέτης υψίσυχων υπερήχων σε υλικά για τον δυναμικό ελαστοδυναμικό χαρακτηρισμό τους.

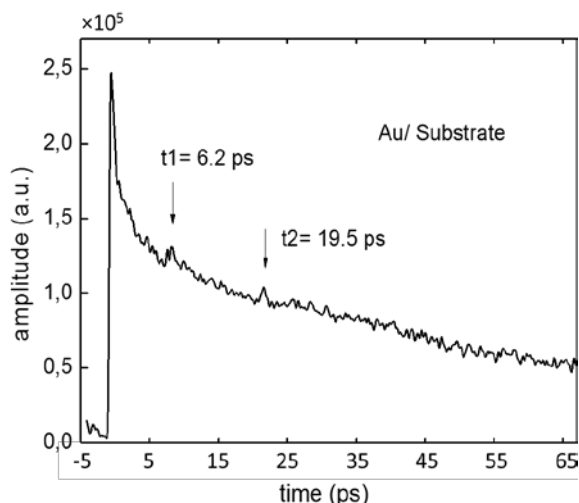
## 2. Επίδειξη προφίλομετρίας διαστρωμάτωσης υλικών με τη χρήση υπερήχων παραγόμενων από υπερβραχείς παλμούς λέιζερ

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται γραφική παράσταση του σήματος της διαφορικής ανακλαστικότητας που προέρχεται από την ανάκλαση της δέσμης ελέγχου που προσπίπτει στο δείγμα (βαθμονομημένη σε σχέση με την ανόθευτη δέσμη ελέγχου πριν πέσει στο δείγμα) σαν συνάρτηση του χρόνου χρονοκαθυστέρησης από τη στιγμή της αλληλεπίδρασης της δέσμης άντλησης με το δείγμα. Τα βήματα της χρονοκαθυστέρησης είναι της τάξης των λίγων fs με τη βοήθεια αυτοματοποιημένου συμβολομέτρου αλλαγής οπτικού δρόμου. Το δείγμα αποτελείται από μεταλλικό φιλμ χρυσού (Au) πάχους  $20 \text{ nm}$  που είναι εναποθετημένο σε υπόστρωμα γυαλιού (BK7)



πάχους 500 nm. Η απορρόφηση οπτικής ενέργειας από τα ηλεκτρόνια του Au έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία εντοπισμένης ακουστικής τάσης, η οποία αρχίζει να ταξιδεύει στο εσωτερικό του δείγματος μέσα στα πρώτα ps.

Ένα μικρό ποσοστό της δέσμης άντλησης μεταδίδεται στο υπόστρωμα. Οι ανακλάσεις της ελαστικής παραμόρφωσης από τη διεπαφή Au/BK7 είναι εμφανείς στο σήμα της ανακλώμενης δέσμης άντλησης σε χρονικές καθυστερήσεις που είναι πολλαπλάσια του  $\tau = 2d_m/u_m$ , όπου  $d_m$  είναι το πάχος λεπτής μεμβράνης μετάλλου και  $u_m$  είναι η διαμήκης ταχύτητα ήχου στο μέταλλο [11]. Στο Σχήμα 2.1 τέτοιες ανακλάσεις (υπογραμμίζονται με βέλη) παρουσιάζονται με τη μορφή αλλαγών στο σήμα, σε χρονικές καθυστερήσεις που αντιστοιχούν στην αναμενόμενη για τη ταχύτητα διαμηκών ακουστικών κυμάτων σε Au (~3240 m/s) [4]. Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για  $\tau = 13.3$  ps το πάχος της επίστρωσης  $d_m$  μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά με εξαιρετική ακρίβεια να είναι  $(21.5 \pm 2)$  nm.

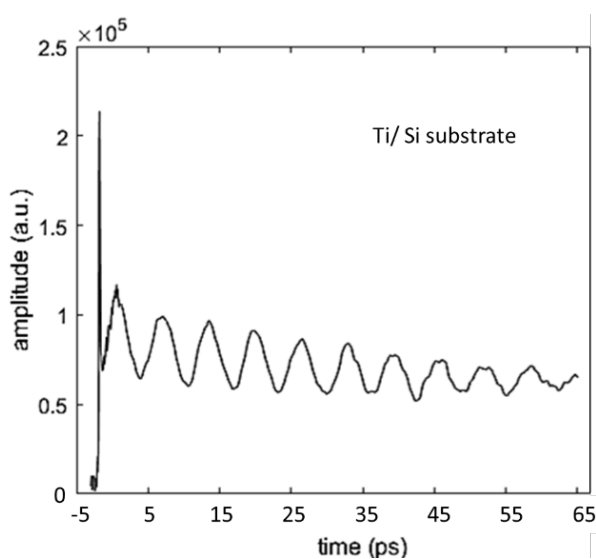


Σχήμα 2.1 Σήμα ανακλαστικότητας από στόχο Au πάνω σε υλικό BK7

### 3. Ελαστοδυναμική διαγνωστική υλικών υπό θερμική φόρτιση

Η οπτοακουστική μέθοδος άντλησης-ελέγχου που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου σε διαστρωματωμένα υλικά. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το σήμα από τη δέσμη ελέγχου σε στόχο μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, Si<100>, επικαλυμμένο με λεπτή επίστρωση Τιτανίου πάχους 20 nm που έχει το ρόλο του οπτοακουστικού μετατροπέα. Στο Σχ. 3.1 είναι ξεκάθαρη η αρχική οξεία κορυφή της αλλαγής της ανακλαστικότητας λόγω της απορρόφησης της ενέργειας του fs laser από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του Ti η οποία ταχύτητα αποδίδεται ταχύτητα στο πλέγμα του μετάλλου και δημιουργείται το εντοπισμένο ακουστικό κύμα. Το ακουστικό διαμήκης κύμα ταξιδεύει προς το εσωτερικό του διαστρωματομένου και διέρχεται στο υπόστρωμα του Si. Η δέσμη ελέγχου που ανακλάται από την εξώτερη επιφάνεια του στόχου συμβάλλει με το μέρος της δέσμης ελέγχου που ανακλάται μέσα στο Si από το οδεύον

προς τα μέσα ακουστικό κύμα. Ανάλογα με τη χρονική καθυστέρηση της δέσμης ελέγχου σε σχέση με τη δέσμη άντλησης θα προκύψουν ενισχυτικές ή καταστροφικές συμβολές (ταλαντούμενο μέρος του σήματος στο Σχ. 3.1) ανάλογα με την ταχύτητα που διαδίδεται ο ακουστικός παλμός μέσα στο υπόστρωμα Si. Η ταλάντωση με περίοδο  $T_B$  είναι χαρακτηριστικό μέγεθος της σκέδασης Brillouin (σκέδαση φωτός σε ελαστικό φωνονικό κύμα) και συνδέεται άμεσα με τη ταχύτητα διάδοσης του ακουστικού παλμού μέσω της σχέσης  $v = \lambda/2T_B n$ , όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος της δέσμης laser και  $n$  ο δείκτης διάθλασης του Si [11]. Επιπρόσθετα το «βάθος» της ταλάντωσης (κορυφή ταλάντωσης σε σχέση με το μηδενικό σήμα) είναι χαρακτηριστικό της έντασης της ακουστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.1 Σήμα διαφορικής ανακλαστικότητας από στόχο Ti πάνω σε μονοκρυσταλλικό Si με δείκτη διάθλασης  $n = 3.7$ , από 35fs laser κεντρικού μήκους κύματος,  $\lambda = 800\text{nm}$ .

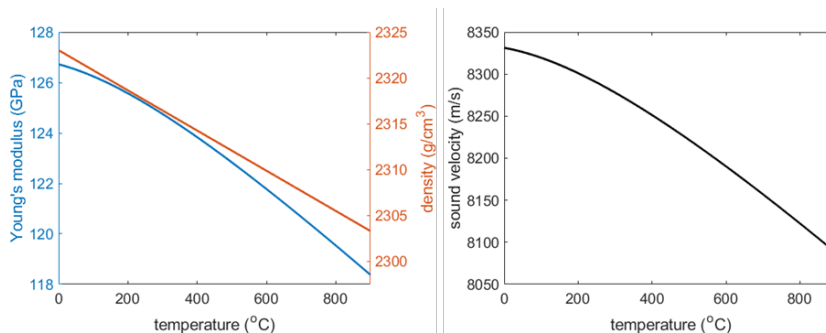
Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι η διάταξη άντλησης-ελέγχου διαφορικής ανακλαστικότητας είναι κατάλληλη και για την μελέτη των μηχανοελαστικών και ακουστικών ιδιοτήτων υλικών τα οποία βρίσκονται υπό θερμική φόρτιση, μέσω της ακριβούς μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης του ήχου σε διάφορα βάθη του υλικού που προφανώς βρίσκονται υπό διαφορετικές θερμικές φορτίσεις. Είναι γνωστό ότι οι μηχανοελαστικές και ακουστικές ιδιότητες των υλικών, οι οποίες καθορίζονται κατά μεγάλο βαθμό από το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) και την πυκνότητα του υλικού, εξαρτώνται από την θερμοκρασία. Η αλλαγή στα μηχανοελαστικά χαρακτηριστικά των διαστρωματωμένων υλικών λόγω θερμικής φόρτισης είναι ιδιαίτερα σημαντική μεταξύ άλλων σε εφαρμογές μικροηλεκτρονικής και υπολογιστών, όπου λεπτές ταινίες ημιαγωγίμου υλικού, συνήθως Πυριτίου, αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (silicon wafers). Κατά την παραγωγή των κυκλωμάτων αλλά και κατά τη λειτουργία τους υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και συνθήκες υπολογιστικής φόρτισης, η

θερμοκρασία του ημιαγωγίου υλικού μεταβάλλεται σημαντικά. Το ίδιο ισχύει και για τα διαστρωματωμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σε Μικτροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS). Σε τέτοια συστήματα, συχνά οι συνθήκες μηχανικής φόρτισης των υλικών είναι δυναμικές, παραδείγματος χάριν σε εφαρμογές οχημάτων, αισθητήρων καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων, διαστημικής κ.α. Για αυτούς τους λόγους είναι κρίσιμος ο ακριβής χαρακτηρισμός των μηχανοελαστικών ιδιοτήτων διαστρωματωμένων υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας, κάτι που φαίνεται και από την πληθώρα σχετικών επιστημονικών εργασιών (ενδεικτικά [5-7]).

Η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας  $E$  από τη θερμοκρασία είναι μη-γραμμική και περιγράφεται για αρκετά ημιαγώγια (και άλλα) υλικά από την ημιεμπειρική σχέση του Wachtman (Wachtman's equation [8, 9]), η οποία εκφράζεται συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας στους 0 βαθμούς Κέλβιν  $E_0$ , της θερμοκρασίας  $T$  και δύο παραμέτρων προσαρμογής (fitting)  $T_w, \Omega$  ως  $E(T) = E_0 - \Omega T e^{-T_w/T}$  (X).

Ενδεικτικά, για το μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο  $Si_{<100>}$  όπου  $E_0 \approx 127$  GPa,  $T_w = 704$  και  $\Omega = 0.0134$  [1] η καμπύλη φαίνεται στο Σχήμα 2.1α (μπλέ). Αντίστοιχα, από προσομοιώσεις μοριακής δυναμικής έχει υπολογισθεί ότι η πυκνότητα του  $Si_{<100>}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας προσεγγίζεται από τη σχέση [10]  $\rho(T) = 2.33 - 2.19 \times 10^{-5} \times T$  (Y). Η σχετική καμπύλη δίνεται στο Σχήμα 2.1 (κόκκινο). Με βάση τις σχέσεις (X) και (Y), η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μέσα στο κρυσταλλικό Πυρίτιο δίνεται από την εξίσωση  $v(T) = \sqrt{E/\rho}$ , ενώ η καμπύλη ταχύτητας ήχου - θερμοκρασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.1β.

Από τον συσχετισμό της ταχύτητας του ήχου με την συχνότητα των ταλαντώσεων Brillouin, και χάρη στην μονοτονία των καμπυλών του Σχήματος 3.2, μπορεί από την μέτρηση άντλησης ελέγχου να προσδιοριστεί μονοσήμαντα η θερμοκρασία και οι μηχανοελαστικές ιδιότητες του μέσου ύπο θερμική φόρτιση. Αντιστρόφως, μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία του μέσου όταν οι παραπάνω καμπύλες είναι γνωστές.



Σχήμα. 3.2: θεωρητικές καμπύλες α) ελαστικής σταθεράς (μπλέ) και πυκνότητας (κόκκινο) και β) ταχύτητας ήχου, συναρτήσει της θερμοκρασίας σε μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο  $<100>$ .

#### 4. Αριθμητική μοντελοποίηση

Το μοντέλο δύο θερμοκρασιών περιγράφει την ενέργεια εναπόθεσης στον πολυστρωματικό στόχο μέσω υπερβραχέων παλμών laser διάρκειας fs [11]. Η συζευγμένη θερμομηχανική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία υλοποιείται στο λογισμικό LS-DYNA [14,15]. Ο πολυστρωματικός στόχος μοντελοποιείται σε δύο επιμέρους διασυνδεδεμένες περιοχές που η καθεμία αντιπροσωπεύει την περιοχή ηλεκτρονίων και την περιοχή κρυσταλλικού πλέγματος. Η θερμική ανάλυση πραγματοποιείται για την περιοχή ηλεκτρονίων, ενώ θερμομηχανική ανάλυση για το κρυσταλλικό πλέγμα. Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο περιοχών πραγματοποιείται με σύζευξη ηλεκτρονίων-φωονίων μέσω κατάλληλα αναπτυγμένου κώδικα. Το ακόλουθο σύνολο εξισώσεων επιλύεται:

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e(r, z, t)}{\partial t} = \nabla [k_e(T_e) \nabla T_e(r, z, t)] - G(T_e, T_p)(T_e - T_p) + \frac{\partial U_{ee}}{\partial t}$$

$$C_p(T_p) \frac{\partial T_p(r, z, t)}{\partial t} = G(T_e, T_p)(T_e - T_p) + \frac{\partial U_{ep}}{\partial t}$$

$$C_p(T_p) \frac{\partial T_p(r, z, t)}{\partial t} = \nabla [k_p(T_p) \nabla T_p(r, z, t)] + TR \frac{\partial U_{ep}}{\partial t}$$

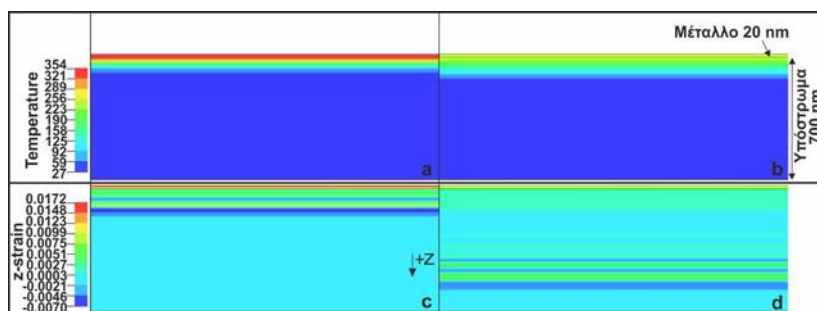
όπου  $k_e$ : θερμική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων,  $C_e$  και  $C_p$ : θερμοχωρητικότητα των ηλεκτρονίων και του κρυσταλλικού πλέγματος αντίστοιχα και  $G$ : συντελεστής σύζευξης ηλεκτρονίων-φωονίων. Οι όροι  $\partial U_{ee}/\partial t$  and  $\partial U_{ep}/\partial t$  αντιστοιχούν στις ενεργειακές πυκνότητες ανά μονάδα χρόνου που μεταφέρονται από τα μη θερμικά ηλεκτρόνια στα θερμικά ηλεκτρόνια και στο κρυσταλλικό πλέγμα αντίστοιχα [11], ενώ η σταθερή τιμή  $TR$  αντιστοιχεί στο μεταδιδόμενο ποσοστό της ενεργειακής πυκνότητας ανά μονάδα χρόνου στο υπόστρωμα του πλέγματος. Η επίδραση των μη θερμικών ηλεκτρονίων στα θερμικά ηλεκτρόνια και στο πλέγμα λαμβάνει υπόψη το συντελεστή απορρόφησης και τους όρους  $\partial U_{ee}/\partial t$  and  $\partial U_{ep}/\partial t$  που ορίζονται στη βιβλιογραφία [11]. Οι εξισώσεις μάζας, ορμής και ενέργειας λύνονται επίσης για την περιοχή του κρυσταλλικού πλέγματος [14].

Το ψευδο-3D μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργείται είναι αξονικά συμμετρικό και προσομοιώνει την θερμομηχανική απόκριση στόχου, που αποτελείται από ένα λεπτό μεταλλικό φιλμ πάνω σε ένα υπόστρωμα. Το φιλμ δύναται να έχει πάχος από 10 nm ως 60 nm, ενώ το υπόστρωμα από 600 nm ως 1200 nm. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων είναι μεταξύ 200000 και 400000 ανάλογα με τις διαστάσεις του μοντέλου. Οι παράμετροι του λέιζερ λαμβάνονται υπόψη σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις. Όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες, η θερμική αγωγιμότητα ηλεκτρονίων και η θερμοκρασιακά εξαρτώμενη θερμοχωρητικότητα των ηλεκτρονίων λαμβάνονται υπόψη από τη βιβλιογραφία [16] όπως και ο θερμοκρασιακά εξαρτώμενος συντελεστής σύζευξης ηλεκτρονίων-φωονίων [11]. Επιπρόσθετα, οι μηχανικές ιδιότητες όπως η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας του Young, ο λόγος Poisson και ο συντελεστής θερμικής διαστολής λαμβάνονται υπόψη από τη βιβλιογραφία [11,17,18]. Τέλος βασισμένοι στην ερευνητική εργασία [9] υπολογίζονται τα μεγέθη της συνολικής ανάκλασης  $R$ , της απορρόφησης  $A$ , και της διαπερατότητας  $T$ .

Μετά την ακτινοβολήση του πολυστρωματικού στόχου η θερμική ισορροπία ηλεκτρονίων και του κρυσταλλικού πλέγματος επέρχεται σε μερικά ps ανάλογα με τα υλικά του διαφορετικού στόχου που ακτινοβολείται. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται

ενδεικτικά η θερμοκρασιακή κατανομή (a, b) και η κατανομή των παραμορφώσεων (c,d) σε πολυστρωματικό στόχο που υπολογίζει η υπολογιστική προσομοίωση για δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές μετά την έναρξη αντινοβόλησης του δείγματος. Η προσομοίωση μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε τη διαδρομή των διαμήκη νανοακουστικών κυμάτων στο υπόστρωμα του στόχου και λειτουργεί σε συνέργεια με τις πειραματικές μετρήσεις.

Μελλοντικός στόχος είναι η χρήση του παραπάνω μοντέλου σε συνδυασμό με τις πειραματικές μετρήσεις για την ακριβή μέτρηση της αλλαγής της ταχύτητας του ήχου και των ελαστοδυναμικών χαρακτηριστικών υλικών καθώς αυτά βρίσκονται υπό θερμική φόρτιση η οποία μπορεί να επιτυγχάνεται είτε από το ίδιο το laser άντλησης είτε από εξωτερική πηγή θερμότητας πχ μια σταθερή και ισχυρή λάμπα φωτός.



Σχήμα 3.2 Αποτελέσματα μοντελοποίησης της θερμοκρασιακής κατανομής ( $C^{\circ}$ ) του πολυστρωματικού στόχου για a) 30 ps, b) και 120 ps μετά την ακτινοβόληση από το 35 fs laser. Η κατανομή των διαμήκων ακουστικών παραμορφώσεων για χρόνους c) 30 ps και d) 120 ps μετά την ακτινοβόληση της επιφάνειας.

## 5. Ευχαριστίες

Το ερευνητικό έργο υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της Δράσης «2η Προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση Μεταδιδακτορικών Ερευνητών/τριών» (Αριθμός Έργου: 1336) . Οι Ν.Π. και Κ.Κ. ευχαριστούν το Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου για την κάλυψη των εξόδων συμμετοχής τους στο συνέδριο. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Laser στο Ρέθυμνο ([www.ippl.hmu.gr](http://www.ippl.hmu.gr)). Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στην Εθνική Υποδομή HPC—ARIS—χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό χρόνο που χορηγήθηκε από το Ελληνικό Δίκτυο Έρευνας & Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ) με ταυτότητα του έργου pr011027—LaMPIOS

## 6. Αναφορές

[1] D. H. Hurley, O. B. Wright, O. Matsuda, V. E. Gusev, and O. V. Kolosov, *Ultrasonics* **38**(1-8), 470–474 (2000).

- [2] P. M. Norris, A. P. Caffrey, R. J. Stevens, J. M. Klopff, J. T. McLeskey, and A. N. Smith, *Rev. Sci. Instrum.* **74**(1), 400–406 (2003).
- [3] M. Ducouso et al., *The European Physical Journal Applied Physics* **61** (1): 11201 (2013).
- [4] David R. Lide (ed), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th Edition. CRC Press. Boca Raton, Florida, 2003; Section 14, Geophysics, Astronomy, and Acoustics; Speed of Sound in Various Media.
- [5] Jan Vanhellefont, Akhilesh Kumar Swarnakar and Omer Van der Biest, *ECS Transactions*, **64** 283 (2014).
- [6] Qi, X., Suh, C.S. Temperature Characterization in Silicon Wafer by Using Stress Wave as an Indicator. In: Hetnarski, R.B. (eds) *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer, Dordrecht (2011)
- [7] Jeung-hyun Jeong, Sung-hoon Chung, Se-Ho Lee and Dongil Kwon, in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 524-530, (2003)
- [8] J. B. Wachtman, Jr., W. E. Tefft, D. G. Lam, Jr., and C. S. Apstein, *Phys. Rev.* **122**, 1754 (1961).
- [9] Orson L. Anderson, *Phys. Rev.* **144**, 553 (1966).
- [10] R Kojima Endo, Y Fujihara, M Susa, *High Temperatures-High Pressures*, Vol 35/36 (5), pp. 505-511 (2003)
- [11] E. Tzianaki, M. Bakarezos, G. D. Tsibidis, Y. Orphanos, P. A. Loukakos, C. Kosmidis, P. Patsalas, M. Tatarakis, and N. A. Papadogiannis, *Opt. Express* **23** (13), 17191 (2015).
- [12] M. Bakarezos, E. Tzianaki, S. Petrakis, G. Tsibidis, P. A. Loukakos, V. Dimitriou, C. Kosmidis, M. Tatarakis, and N. A. Papadogiannis, *Ultrasonics* **86**, 14 (2018).
- [13] S. Anisimov, B.L. Kapeliovich, T.L. Perelman, *Sov. Phys. JET* **39**, 375–377 (1974).
- [14] Y. Orphanos, K. Kosma, E. Kaselouris, N. Vainos, V. Dimitriou, M. Bakarezos, M. Tatarakis, N. A. Papadogiannis, *Applied Physics A* **125**, 1-10 (2019).
- [15] E. Kaselouris, K. Kosma, Y. Orphanos, A. Skoulakis, I. Fitis, A. P. Markopoulos, M. Bakarezos, M. Tatarakis, N. A. Papadogiannis and V. Dimitriou, *Appl. Sci.* **11**, 1253 (2021).
- [16] G. Du, Q. Yang, F. Chen, J. Si, X. Hou, *Appl. Surf. Sci.* **257**, 9177–9182 (2011).
- [17] V. Dimitriou, E. Kaselouris, Y. Orphanos, M. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis and N. A. Papadogiannis, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 114104 (2013).
- [18] J. Mei, L. Li, *Physica E* **46**, 206–212 (2012).

## ***Polarity of the diffracted signal around a rigid wedge***

Penelope Menounou  
University of Patras

Marios Spiropoulos  
University of Patras

### **ABSTRACT**

*In the present study a convenient depiction of the diffraction field around a rigid wedge is proposed called polarity plots. The polarity plots show the shadow boundaries, the curve of zero-valued diffraction, the polarity of the impulse response and the number of geometrical acoustics contributions for any combination of the angular locations of source and receiver around a given wedge. The analysis is based on an approximate time domain solution for diffraction around wedges that is applicable for all types of simple incident radiation (plane, cylindrical and spherical incident signals). Furthermore, non-dimensional forms of the polarity plots are introduced which can be constructed for any wedge by only 4 basic pairs of source and receiver locations. Finally, an experimental procedure is proposed based on the polarity plots, where a series of measurements of the acoustic field around a wedge can determine the wedge angle.*

## ***Πολικότητα των σημάτων περίθλασης γύρω από ακουστικά σκληρή σφήνα***

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένας νέος τρόπος απεικόνισης του περιθλώμενου πεδίου γύρω από σκληρή σφήνα, τα διαγράμματα πολικότητας. Τα διαγράμματα πολικότητας απεικονίζουν τα σύνορα σκιάς, την καμπύλη μηδενικής περίθλασης, την πολικότητα του σήματος περίθλασης και τον αριθμό των γεωμετρικών ακουστικών συνεισφορών για όλους τους συνδυασμούς γωνιακών θέσεων πηγής και δέκτη γύρω από μία σφήνα. Η ανάλυση βασίζεται σε μια προσεγγιστική αναλυτική λύση για το σήμα περίθλασης γύρω από σφήνα και ισχύει και για τα τρία είδη απλής προσπίπτουσας ακτινοβολίας (επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά σήματα). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα διαγράμματα πολικότητας σε αδιάστατη μορφή και προσδιορίζονται 4 χαρακτηριστικά ζευγάρια θέσεων πηγής και δέκτη, από τα οποία μπορεί κανείς να ορίσει το διάγραμμα πολικότητας για κάθε γωνία σφήνας. Τέλος, προτείνεται μία πειραματική διαδικασία βασισμένη πάνω στα διαγράμματα πολικότητας όπου με κατάλληλες μετρήσεις του ακουστικού πεδίου μπορεί να προσδιοριστεί η γωνία της σφήνας.

## Introduction

The acoustic field around a rigid wedge consists of the geometrical acoustics field (the direct field and reflections between the faces of the wedge) and the diffraction field, which is the subject of our work. Specifically, in the present study the polarity of the diffracted signal around the wedge is investigated. A new type of figure is proposed that shows the polarity of the diffracted signal around a given wedge for all combinations of source and receiver angular locations. The same figure is enhanced by including the number of geometrical acoustics contributions for all combinations of source and receiver. Based on the information provided by the enhanced polarity plot, a set of measurements of diffracted signals is proposed that allows us to determine the angle of the wedge.

Figure 1 shows the geometry of a point source-wedge-receiver configuration. The angle of the wedge is  $\Omega$  and its wedge index is  $\gamma = (2\pi - 2\Omega)/\pi$ . The wedge angle ranges from  $\Omega = 0^\circ$  (half plane) to  $\Omega = 180^\circ$  (a completely closed wedge). The angular location of source  $\theta_0$  ranges from  $0^\circ$  (source located on the face of the wedge) to  $180^\circ - \Omega$  (source placed on the bisector of the external angle of the wedge). The problem with a source at  $180^\circ - \Omega + \delta$  is the same as its symmetrical counterpart with  $180^\circ - \Omega - \delta$ . The receiver can be at any angular location  $\theta$ , between the two faces of the wedge at  $0^\circ$  and  $360^\circ - 2\Omega$ , respectively.

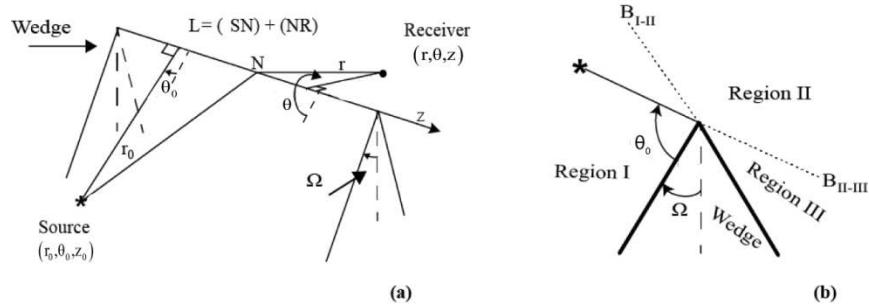


Figure 1: Geometry of the wedge problem

The geometrical acoustics field around a wedge,  $P^g$ , consists of the direct incident field and the reflections on the surfaces of the wedge[1]:

$$P^g = \sum_n \frac{e^{ikR_{1n}}}{R_{1n}} + \sum_l \frac{e^{ikR_{2l}}}{R_{2l}} \quad (0.1)$$

$$R_{1n} = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r_0 r \cos(\pi - \theta + \theta_0 - 2n\gamma\pi) + (z - z_0)^2} \quad (0.2)$$

$$R_{2l} = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r_0 r \cos(\pi - \theta - \theta_0 - 2l\gamma\pi) + (z - z_0)^2}$$

where the summations extend over all integers  $n$  and  $l$  satisfying the inequalities

$$|\theta - \theta_0 + 2n\gamma\pi| < \pi \text{ and } |\theta + \theta_0 + 2l\gamma\pi| < \pi. \quad (0.3)$$

The field is separated in three regions: Region I, II and III (where the count starts from the wedge surface closer to the source) by the two shadow boundaries at angles



$$\theta_{I-II/II-III} = |\pm\theta_0 \pm 2\kappa\gamma\pi \pm \pi|, \quad \kappa=1,2,\dots, \quad 0 \leq \theta_{I-II} \leq \theta_{II-III} \leq 2\pi-2\Omega \quad (0.4)$$

denoted by lines  $B_{I-II}$  and  $B_{II-III}$  in Figure 1. Each region has a different number of geometrical optics contributions from its neighboring region.

Consider all special angles  $\bar{\Omega}_m$  with wedge index  $\bar{\gamma}_m$

$$\bar{\Omega}_m = \frac{(m-1)}{m}\pi, \quad \bar{\gamma}_m = \frac{2}{m}, \quad m=1,2,3\dots \quad (0.5)$$

The special wedges corresponding to even values of  $m$  are called *neutral wedges* ( $\bar{\Omega}_1=0^\circ, \bar{\Omega}_3=120^\circ, \bar{\Omega}_5=144^\circ, \dots$ ), while the ones corresponding to odd values of  $m$  are *non-diffracting wedges* ( $\bar{\Omega}_2=90^\circ, \bar{\Omega}_4=135^\circ, \dots$ ). For the purposes of this work it is considered that every wedge angle  $\Omega$  belongs to the  $m$ -th angle range between two special angles,  $\Omega \in [\bar{\Omega}_m, \bar{\Omega}_{m+1})$ . The first range  $m=1$  is the range between  $\bar{\Omega}_1$  and  $\bar{\Omega}_2$ . In other words a wedge angle in the  $m$ -th range is

$$\bar{\Omega}_m \leq \Omega < \bar{\Omega}_{m+1} \Rightarrow (m-1)\pi/m \leq \Omega \leq m\pi/(m+1). \quad (0.6)$$

## 1. Polarity plots

For the prediction of the diffraction signal an existing approximate impulse response solution[3] is employed:

$$p_{\text{DLSM}} = A_t \frac{H(t-t_d)}{\sqrt{t^2-t_d^2}} d, \quad (1.1)$$

where  $H$  is the Heaviside function,  $d$  is a directivity function common for all types of incident signals (plane, cylindrically and spherically spreading incident signals)

$$d = \frac{2^{3/2}}{\pi} (1/\Phi_1 + 1/\Phi_2), \Phi_{1,2} = \gamma\sqrt{2} \left( \cos\left(\frac{\theta \pm \theta_0}{\pi}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \right) \left( \pi \sin\left(\frac{\pi}{\gamma}\right) \right)^{-1}, \quad (1.2)$$

$t_d$  is the time the diffracted signal arrives at the receiver and  $A_t$  an amplitude factor that depends on the type of the incident signal. For spherical incident signals  $t_d=L/c$  and  $A_t=(r_0)^{-1/2}$ . The solution is valid for short times,  $t-t_d \ll L/c$ .

As polarity we define the sign of the impulse response at the time of its arrival, in other words at  $t \rightarrow t_d=L/c$ . According to Eqs. (1.1)-(1.2) the sign is determined by the directivity function. Because the directivity function that determines the polarity, is the same for all three types of incident signals, the presented study of polarity is applicable to all three types of incident radiation.

Although the employed solution is invalid for long times after the arrival, the validity of the presented study on the polarity is not affected as it regards the sign of the impulse response at the time of arrival. Indeed, the polarity plots obtained by employing the Biot-Tolstoy solution[2], which is an exact analytical solution for spherical incident signals, are identical to the polarity plots obtained with the approximate solution in Eq. (1.1).

On a polarity plot, the sign of the diffracted signal is depicted for all source  $\theta_0$  and receiver  $\theta$  angular locations around a given wedge angle  $\Omega$  (see Figure 2 for  $\Omega=45\text{deg}$ ). The black diagonal lines correspond to the shadow boundaries  $\theta_{\text{I-II}}$  and  $\theta_{\text{II-III}}$  given by Eq.(0.4). They can also be obtained directly by the directivity function setting  $\Phi_1=0, \Phi_2=0$  and taking into account that  $0 < \theta_{\text{I-II}} < \theta_{\text{II-III}} < 2(\pi-\Omega)$ . Depending on the wedge angle and the source location the shadow boundaries angles  $\theta_{\text{I-II}}$  and  $\theta_{\text{II-III}}$  can be obtained: (i) both from  $\Phi_1=0$ , or (ii) both from  $\Phi_2=0$ , or (iii) one from  $\Phi_1=0$  and one from  $\Phi_2=0$ . In the latter case,  $\theta_{\text{I-II}}$  is provided by  $\Phi_2=0$  and  $\theta_{\text{II-III}}$  by  $\Phi_1=0$ . For the wedge shown in Figure 2,  $\theta_{\text{I-II}}$  is obtained by  $\Phi_2=0$  for all angles of incidence, while  $\theta_{\text{II-III}}$  by  $\Phi_1=0$  for angles of incidence smaller than a critical value  $B$  (see Figure 2) and by  $\Phi_2=0$  for larger angles of incidence. Accordingly, region III is separated into an *upper region* and a *lower region*.

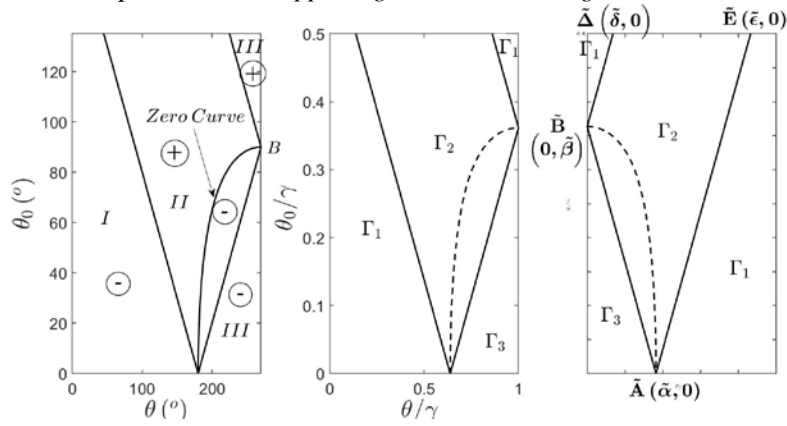


Figure 2: (Left): Polarity plots for wedge angle  $\Omega=45^\circ$ ; thick black lines indicate shadow boundaries; (Right): normalized polarity plots for  $\Omega=35^\circ$  and  $\Omega=125^\circ$ ,  $\Gamma_{1,2,3}$  indicate the number of geometrical acoustics contributions.

The dashed curve between the shadow boundaries indicates the location where the impulse response becomes zero at  $t=t_d$ . The curve for zero-diffraction can also be provided by the directivity function, by setting  $\Phi_1=-\Phi_2$ , which yields

$$\theta_{0,ZC} = \pm \gamma \left( \cos\left(\frac{\pi}{\gamma}\right) / \sin\left(\frac{\theta}{\gamma} - \frac{\pi}{2}\right) \right) + \gamma\pi/2, \quad (1.3)$$

where the + sign applies for  $\Omega < \pi/2$  and the - sign for  $\Omega > \pi/2$ .

Consider a given source location (i.e. a horizontal line of the polarity plot). The shadow boundaries separate the area around the wedge in three regions: region I, II and III. The polarity changes across the shadow boundaries and also across the zero curve. Across the shadow boundaries the change of polarity is connected with a step

discontinuity (to account for the discontinuity in the geometrical acoustics contributions), while across the zero curve the change of polarity is continuous.

The polarity plots can also be used for an a-priori estimate of the diffracted signal. For example, if a combination of source and receiver correspond to a point of the polarity plot close to a shadow boundary, then the diffracted signal has a large amplitude. If the combination corresponds to a point close to the zero-curve, then the diffracted signal has a very small amplitude.

Figure 3 shows how the polarity plots change for different wedge angles for the first 4 ranges of wedge angles [Eq. (0.6)]. For arbitrary (non-special) wedge angles the pattern of the polarity consists of: (i) one one-branched shadow boundary, (ii) one two-branched shadow boundary and (iii) the zero-curve in region II between the two shadow boundaries. For neutral wedge angles the pattern becomes symmetric, both shadow boundaries have one branch, the zero-curve coincides with a horizontal line at  $\theta_0 = \theta_{0,\max}$ , and the diffracted signal becomes symmetric across the bisector of the wedge. For non-diffracting wedges the two shadow boundaries and the zero-curve collapse and no change of polarity appears to happen across the collapsed shadow boundaries. Indeed the diffracted signal is zero everywhere.

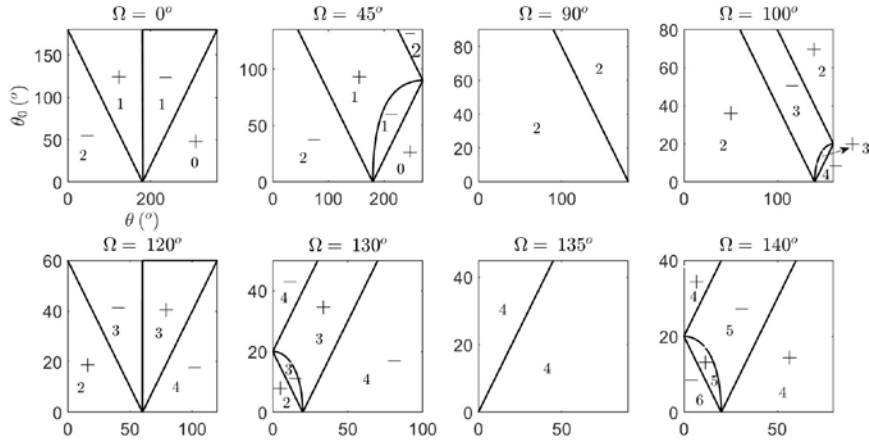


Figure 3: Polarity plots and number geometrical acoustics components for various wedge angles.

In order to facilitate the comparison between different wedge angles the angular locations are normalized by  $\gamma\pi$

$$\tilde{\theta}_0 = \theta_0 / \gamma\pi \in [0, 0.5], \quad \tilde{\theta} = \theta / \gamma\pi \in [0, 1]. \quad (1)$$

For an arbitrary wedge angle four characteristic angles can be identified as shown in Figure 2(b). The characteristic angles  $\tilde{\delta}$  and  $\tilde{\varepsilon}$  represent the angular position of the two shadow boundaries, when the source is placed on the bisector of the external angle of the wedge. The characteristic angle  $\tilde{\beta}$  is the critical source angle that separates the upper and lower regions of the two-branched shadow boundaries on the polarity plot. The characteristic angle  $\tilde{\alpha}$  is the angular location, where the two shadow boundaries meet in the case of grazing incidence. By observation it has been

found that the values of the normalized characteristic angles are given by the following formulas

$$\tilde{\alpha}_m = \begin{cases} -\left[\frac{m}{2}\right] + \frac{1}{\gamma}, & \left[\frac{m}{2}\right] = 2k \text{ even} \\ \left[\frac{m}{2}\right] + 1 - \frac{1}{\gamma}, & \left[\frac{m}{2}\right] = 2k+1 \text{ odd} \end{cases} \quad \tilde{\beta}_m = \begin{cases} \frac{m+1}{2} - \frac{1}{\gamma}, & m=1,3,5\dots \\ -\frac{m}{2} + \frac{1}{\gamma}, & m=2,4,6\dots \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\tilde{\delta}_m = \begin{cases} -\frac{m}{2} + \frac{1}{\gamma}, & m=1,3,5,\dots \\ \frac{m+1}{2} - \frac{1}{\gamma}, & m=2,4,6,\dots \end{cases} \quad \tilde{\varepsilon}_m = \begin{cases} \frac{m+2}{2} - \frac{1}{\gamma}, & m=1,3,5,\dots \\ -\frac{m-1}{2} + \frac{1}{\gamma}, & m=2,4,6,\dots \end{cases}$$

where  $m$  is the range of the wedge angle [see Eq. (0.6)] and  $[m/2]$  corresponds to the module of the division  $m/2$ . The values of  $\tilde{\alpha}$ ,  $\tilde{\beta}$ ,  $\tilde{\delta}$  and  $\tilde{\varepsilon}$  can be used to construct the polarity plot for any wedge angle.

Finally, it is helpful for the purposes of the present study to include the number of the geometrical contributions in each of the three regions around a wedge. It can be shown that for the two basic shapes of the polarity plot [see Figure 2(b)], the number of geometrical contributions can be provided by the following empirical formulas for  $\Omega \in [\Omega_m, \Omega_{m+1}]$ :

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 + (-1)^{m+1}, \quad \Gamma_2 = \begin{cases} m, m=1,3,5\dots \\ m+1, m=2,4,6\dots \end{cases}, \quad \Gamma_3 = \Gamma_2 + (-1)^{m+2}. \quad (1.5)$$

For neutral angles the number of geometrical contributions in Region III is given by  $\Gamma_3$  and in Region I by  $\Gamma_1$ , while at non-diffracting angles the number of geometrical contributions is given everywhere by  $\Gamma_1$ .

## 2. Use of diffracted signals for determining the wedge angle

Consider the case of a rigid wedge with wedge angle  $\Omega=135^\circ$  shown in Figure 4. This configuration is quite common in practical cases: consider a vertical rigid wall on a rigid ground. By placing the source on one face of the wedge ( $\theta_0=0^\circ$ ) and measuring the diffracted signal at a receiver on the other face ( $\theta=90^\circ$ ), one can determine whether  $\Omega$  is larger or smaller than  $135^\circ$ . If the diffracted signal has negative polarity, then  $\Omega$  is less than  $135^\circ$  and consequently the wall is tilted to the right. If the diffracted signal has positive polarity, the wall is tilted to the left (towards the ground). If no diffracted signal is detected, the wall is perfectly vertical.

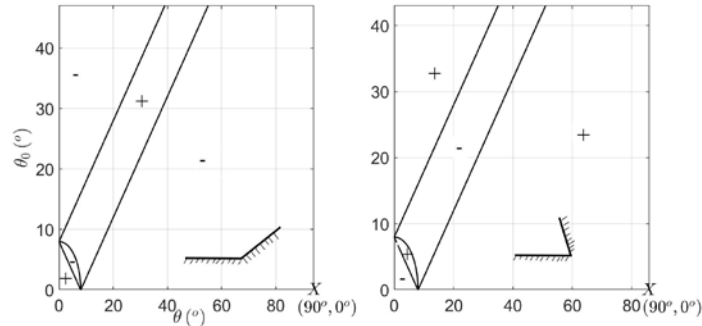


Figure 4: Polarity plots for wedge angles near the 135°.

A straight line is considered as a wedge with  $\Omega=90^\circ$  (see Figure 5). Place source and receiver on one face of the wedge ( $\theta_0=\theta=0^\circ$ ). If the diffracted signal is positive, the surface is tilted downwards. If it is negative, it is tilted upwards. If there is no diffracted signal, the surface is perfectly flat.

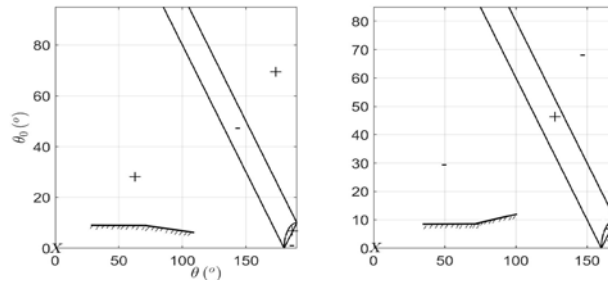


Figure 5: Polarity plots for wedge angles near the 90°.

For an arbitrary wedge angle the process consists of two steps. The first step is to establish the range of  $\Omega$  by employing the flowchart in Figure 6. Within the established range of  $\Omega$ , the exact calculation of  $\Omega$  is determined by the procedure outlined in Figure 7. In the first step (Figure 6) a measurement is taken with both source and receiver on the same face of the wedge. For instance, if the oscilloscope shows 2 geometrical acoustics components and a negative diffracted signal, the range of  $\Omega$  is  $[0,90^\circ]$ , otherwise further investigation is needed. In the second step (Figure 7) source and receiver are both on one of the faces of the wedge. Depending on the range of  $\Omega$  either the source or the receiver is moved angularly from the face of the wedge until either the polarity of the diffracted signal or the number of the geometrical contributions changes. The angular position on which this change happens can be used to calculate the wedge angle of  $\Omega$ . The angles  $\alpha$  and  $\beta$  in the flowchart are the dimensional counterparts of  $\tilde{\alpha}$  and  $\tilde{\beta}$  in Eq. (1.4). It is noted, that when the receiver is close to a shadow boundary a geometrical component shows up at approximately the same time with the diffracted pulse. They can be distinguished as the geometrical acoustics components are sharp impulse responses, while the diffracted signal has a decaying tail.

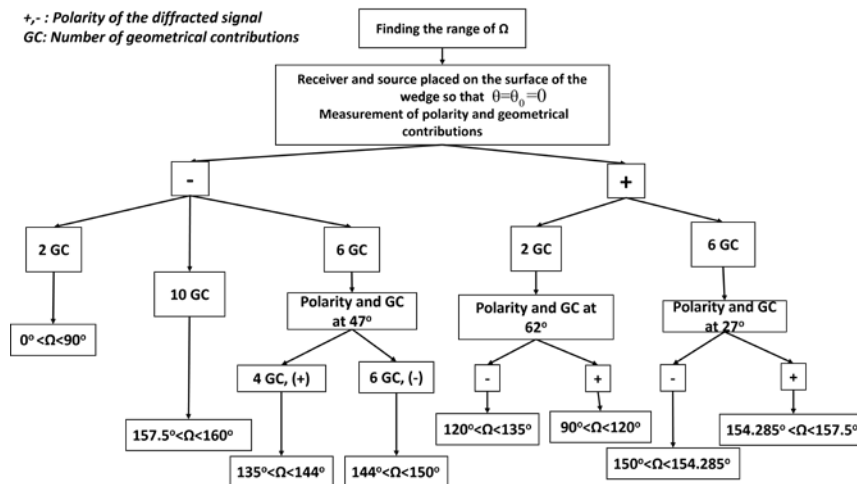


Figure 6: Flowchart for determining the range of  $\Omega$

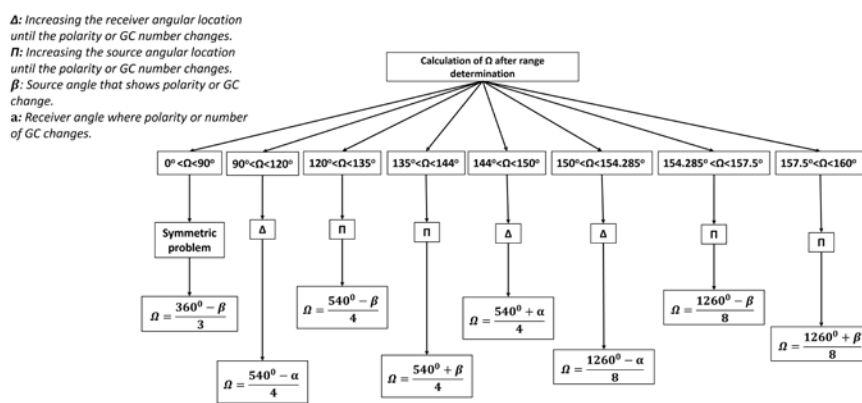


Figure 7: Flowchart for the calculation of the wedge angle.

### 3. 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] 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.* pp29, 381–391 (1957).
- [3] P. Menounou and P.Nikolaou “Analytical model for predicting edge diffraction in the time domain.” *J. Acoust. Soc. Am.* **142**, pp 3580–3592 (2017).

## **Νέα μορφή και χαρακτηριστικά της ακριβούς και προσεγγιστικών λύσεων για το σήμα περίθλασης γύρω από σφήνα**

Πέτρος Νικολάου  
Πανεπιστήμιο Πατρών

Αναστασία Μαρκέτου  
Πανεπιστήμιο Πατρών

Πηνελόπη Μενούνου  
Πανεπιστήμιο Πατρών

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία μελετάται η περίθλαση σφαιρικού σήματος γύρω από ακουστικά σκληρή σφήνα. Στόχος είναι η εύρεση χαρακτηριστικών μεγεθών που επιτρέπουν την *a priori* εκτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών του σήματος περίθλασης (πλάτος και κυματομορφή). Τα μεγέθη αυτά βρίσκονται μέσω τριών λύσεων για την περίθλαση στο πεδίο του χρόνου, δύο προσεγγιστικών λύσεων και της ακριβούς λύσης. Για την τελευταία περίπτωση η ακριβής λύση επαναδιατυπώνεται σε νέα μορφή. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη για κάθε λύση εξαρτώνται κυρίως από τις γωνιακές θέσεις της πηγής και του δέκτη, αλλά και τη γωνία της σφήνας. Μέσω συγκρίσεων αυτών των μεγεθών με το σήμα της περίθλασης, βρέθηκε ότι έχουν την δυνατότητα να περιγράψουν τα βασικά χαρακτηριστικά του χωρίς να απαιτείται ο υπολογισμός του.

### ***New expression and characteristics of the exact and approximate solutions for the diffracted signal around a wedge***

#### **ABSTRACT**

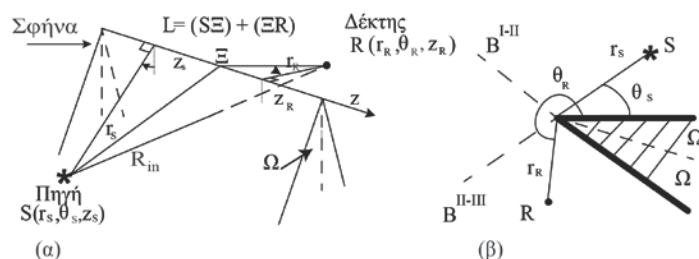
*In the present paper the problem of diffraction of a spherical signal incident on an acoustically hard wedge is considered. The purpose of the work is the derivation of characteristic quantities that allow the a priori estimation of the time evolution of the diffracted signal (its amplitude and its time wave form). These quantities originate from three solutions for the diffraction in time domain: two approximate solutions and the exact solution. For the latter case the exact solution is brought in a new form. The resulting quantities for each solution mainly depend on the angular locations of the source and the receiver and on the wedge angle. Comparisons of these quantities and the diffracted signal show that the proposed quantities indeed offer an a priori prediction of the time evolution of the diffracted signal without the need for calculating diffraction.*

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα της περίθλασης σφαιρικού σήματος γύρω από ακουστικά σκληρή σφήνα. Η περίθλαση στο πεδίο του χρόνου έχει πολλές εφαρμογές όπως στην ακουστική κλειστών χώρων[1] και θεάτρων[2], στην υποβρύχια ακουστική[3], στις εκρήξεις ηφαιστειών[4] κλπ. Σε τέτοιες εφαρμογές παρουσιάζονται πολύπλοκες γεωμετρίες όπου το συνολικό ακουστικό σήμα περιλαμβάνει πολλαπλά σήματα περίθλασης, τα οποία προέρχονται από τις ακμές της γεωμετρίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του συνολικού ακουστικού σήματος είναι δύσκολο να γίνουν κατανοητά χωρίς τον υπολογισμό και τελικά την εύρεση του ακουστικού πεδίου. Στην περίπτωση μίας μεμονωμένης σφήνας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος περίθλασης φαίνονται μέσα από την χρονική εξέλιξη του φαινομένου, η οποία εξαρτάται κυρίως από τις γωνιακές θέσεις της πηγής και του δέκτη καθώς και τη γωνία της σφήνας. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση χαρακτηριστικών μεγεθών που προβλέπουν τη χρονική εξέλιξη του σήματος της περίθλασης (και άρα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του) χωρίς να είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη είναι συναρτήσεις των γωνιακών αποστάσεων πηγής – δέκτη και γωνίας σφήνας και προκύπτουν από αναλυτικές λύσεις για την περίθλαση: μία υπάρχουσα προσεγγιστική λύση 2 όρων, μία νέα προσεγγιστική λύση 4 όρων και την ακριβή λύση. Για την μελέτη της ακριβούς λύσης, γίνεται επαναδιατύπωση της σε μία νέα μορφή.

Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 0.1. Το γεωμετρικό ακουστικό πεδίο της πρόσπτωσης και της ανάκλασης χωρίζει τον χώρο γύρω από τη σφήνα σε τρεις περιοχές. Τα όρια των περιοχών αυτών είναι τα σύνορα σκιάς της πρόσπτωσης και της ανάκλασης.

Στο κεφάλαιο 1 μελετάται η προσεγγιστική λύση των 2 όρων και καταδεικνύεται ένα χαρακτηριστικό μέγεθος. Στο κεφάλαιο 2 επαναλαμβάνεται η μελέτη και βρίσκεται ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για την προσεγγιστική λύση των 4 όρων. Τέλος, στο κεφάλαιο 3 επαναδιατυπώνεται η ακριβής λύση και βρίσκεται ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για αυτήν.



Σχήμα 0.1 Γεωμετρία της σφήνας: ισομετρική όψη (α), πλάγια όψη (β).

### 1. Προσεγγιστική λύση δύο όρων και χαρακτηριστικό μέγεθος $\tau_{lag}^{\pm}$

Η προσεγγιστική λύση δύο όρων που θα μελετηθεί έχει αναπτυχθεί στην αναφορά [5] και έχει την μορφή κρουστικής απόκρισης:



$$P_{inf}^{\pm} = -\frac{1}{4\pi} 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{r_R r_S}{c}} \frac{1}{L^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \frac{1}{\tau + \tau_{lag}^{\pm}} \gamma \frac{\sin(\Gamma) [\cos(\Theta^{\pm}) - \cos(\Gamma)]}{2(1 - \cos(\Theta^{\pm}) \cos(\Gamma))}, \quad (1.1)$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος στον οποίο εξελίσσεται η περίθλαση,  $\gamma = \frac{2\pi - 2\Omega}{\pi}$  η παράμετρος

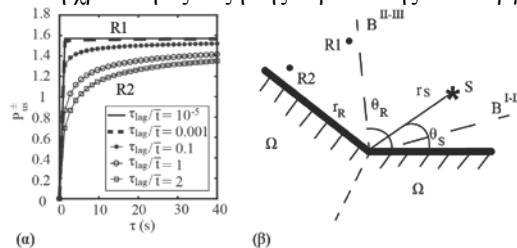
της σφήνας ( $\Omega$  η ημιγωνία της σφήνας βλ. Σχήμα 0.1),  $\Gamma = \frac{\pi}{\gamma}$ ,

$\Theta^{\pm} = \frac{\theta_R \pm \theta_S}{\gamma}$  ( $\theta_R, \theta_S$  οι γωνιακές θέσεις του δέκτη και της πηγής) και

$$\tau_{lag}^{\pm} = \frac{r_R r_S}{Lc} \gamma^2 \frac{[\cos(\Theta^{\pm}) - \cos(\Gamma)]}{2(1 - \cos(\Theta^{\pm}) \cos(\Gamma))}. \quad (1.2)$$

Η λύση αυτή είναι προσεγγιστική και ισχύει για μικρούς χρόνους.

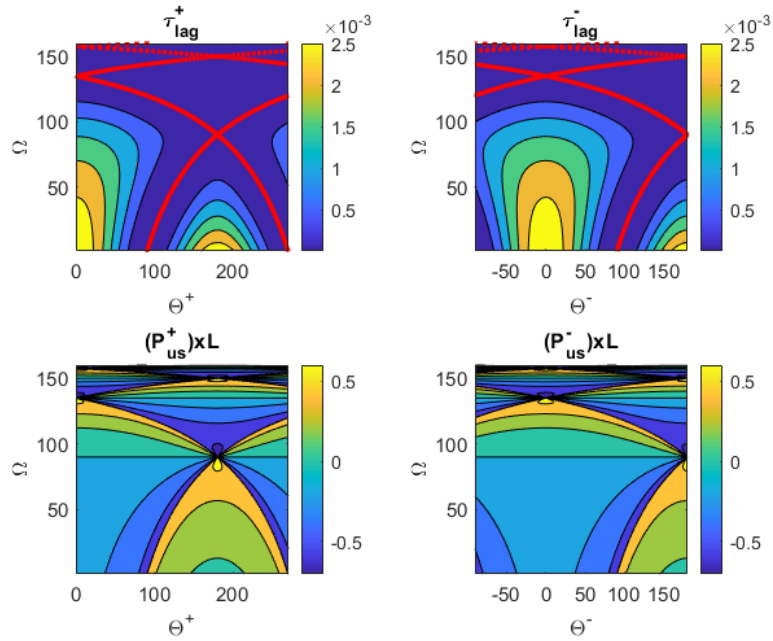
Με βάση την παραπάνω λύση η χρονική εξέλιξη της περίθλασης περιγράφεται από τον όρο  $[\sqrt{\tau}(\tau + \tau_{lag}^{\pm})]^{-1}$ . Συνεπώς, η παράμετρος  $\tau_{lag}^{\pm}$  είναι αυτή που καθορίζει τη χρονική εξέλιξη της περίθλασης. Η παράμετρος  $\tau_{lag}^{\pm}$  εξαρτάται κυρίως από τις γωνιακές θέσεις της πηγής και του δέκτη, αλλά και από τη γωνία σφήνας. Για δεδομένη θέση πηγής και δεδομένη γωνία σφήνας η παράμετρος  $\tau_{lag}^{\pm}$  είναι μικρή για δέκτες κοντά στα σύνορα σκιάς και μεγάλη μακριά από αυτά. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της απόκρισης της περίθλασης σε μοναδιαία βαθμίδα για μία μικρή και μία μεγάλη τιμή του  $\tau_{lag}^{\pm}$ . Είναι γνωστό ότι η απόκριση περίθλασης ενός σήματος για οποιαδήποτε θέση πηγής ή δέκτη ή γωνία σφήνας τείνει να φτάσει τις τιμές του γεωμετρικού σήματος σε μεγάλο χρόνο[6]. Για μικρές τιμές του  $\tau_{lag}^{\pm}$ , δηλαδή κοντά στο σύνορο σκιάς [δέκτης R1 Σχήμα 1.1(β)], η απόκριση της περίθλασης προσεγγίζει, ακόμα και σε μικρούς χρόνους, τη μορφή της προσπίπτουσας μοναδιαίας βαθμίδας [Σχήμα 1.1(α)]. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές του  $\tau_{lag}^{\pm}$ , δηλαδή μακριά από τα σύνορα σκιάς [δέκτης R2 Σχήμα 1.1(β)] η απόκριση της περίθλασης έχει απλωμένο σχήμα σε σχέση με την προσπίπτουσα μοναδιαία βαθμίδα και μειωμένο πλάτος. Στην πρώτη περίπτωση, η περίθλαση προσεγγίζει ταχύτατα την μορφή της πρόσπτωσης, συνεπώς λέμε ότι η περίθλαση έχει γρήγορη χρονική εξέλιξη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η απόκριση της περίθλασης είναι μακριά από το να φτάσει τις τιμές της πρόσπτωσης και σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι η χρονική εξέλιξη της περίθλασης είναι αργή.



Σχήμα 1.1 Χρονική εξέλιξη της απόκρισης της περίθλασης σε μοναδιαία βαθμίδα για έναν δέκτη κοντά (R1) και μακριά (R2) από το σύνορο σκιάς.

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο η παράμετρος  $\tau_{lag}^{\pm}$  επηρεάζει την απόκριση της περίθλασης θα συγκριθεί η συμπεριφορά τους ως προς τις γωνιακές παραμέτρους  $\Omega$ ,  $\theta_R$  και  $\theta_S$ . Για να γίνει αυτό προτείνεται ένας νέος τύπος διαγράμματος στον οποίο απεικονίζονται ισοϋψείς του  $\tau_{lag}^{\pm}$  ή της απόκρισης της περίθλασης ως προς τις μεταβλητές  $\Theta^{\pm} = \frac{\theta_R \pm \theta_S}{\gamma}$  και  $\Omega$  (Σχήμα 1.2). Επειδή η κρουστική απόκριση λαμβάνει άπειρες τιμές στα σύνορα σκιάς προτιμήθηκε η απόκριση σε μοναδιαία βαθμίδα η οποία δίνεται από:

$$P_{us}^{\pm} = -\text{sign}(\cos(\Theta^{\pm}) - \cos(\Gamma)) \frac{1}{\pi L} \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}}}\right) \frac{\sin(\Gamma)}{\sqrt{(1 - \cos(\Theta^{\pm}) \cos(\Gamma))}} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.2 Ισοϋψείς των παραμέτρων  $\tau_{lag}^+$  και  $\tau_{lag}^-$  [Εξ. (1.2)] (πρώτη γραμμή αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα), ισοϋψείς των αποκρίσεων μοναδιαίας βαθμίδας  $P_{us}^+$  και  $P_{us}^-$  [Εξ. (1.3)] (δεύτερη γραμμή αριστερή και δεξιά στήλη αντίστοιχα) ως προς  $(\Theta^{\pm}, \Omega)$ .

Στο Σχήμα 1.2 ο κάθε όρος του  $\tau_{lag}^{\pm}$  συγκρίνεται με τον αντίστοιχο όρο της μοναδιαίας βαθμίδας. Το σήμα περίθλασης έχει κανονικοποιηθεί με την τιμή της πρόσπτωσης και της ανάκλασης ( $1/L$ ) στα αντίστοιχα σύνορα σκιάς. Οι κόκκινες γραμμές αντιστοιχούν στα σύνορα σκιάς όπου οι παράμετροι  $\tau_{lag}^{\pm}$  έχουν μηδενική

τιμή. Στους ίδιους συνδυασμούς  $(\Theta^\pm, \Omega)$  οι αντίστοιχοι όροι της μοναδιαίας βαθμίδας αποκτούν τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους ενώ αλλάζουν πρόσημο εκατέρωθεν των συνόρων σκιάς. Στους συνδυασμούς  $(\Theta^\pm, \Omega)$  για τους οποίους οι παράμετροι  $\tau_{lag}^\pm$  έχουν μεγάλες τιμές, οι αντίστοιχοι όροι της μοναδιαίας βαθμίδας αποκτούν μικρές τιμές κοντά στο μηδέν. Επίσης, υπενθυμίζεται ότι κοντά στα σύνορα σκιάς το σήμα έχει γρήγορη χρονική εξέλιξη, ενώ μακριά από αυτά η χρονική εξέλιξη είναι αργή. Από τις παρατηρήσεις αυτές συμπεραίνεται ότι οι  $\tau_{lag}^\pm$  ακολουθούν την συμπεριφορά της απόκρισης της και άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν αλλαγές στην απόκριση της περίθλασης χωρίς να χρειάζεται αυτή να υπολογιστεί.

## 2. Προσεγγιστική λύση 4 όρων και χαρακτηριστικό μέγεθος

Μία νέα προσεγγιστική λύση για μικρούς χρόνους παρουσιάζεται στη συνέχεια, η οποία είναι άθροισμα 4 όρων:

$$P_{if}^{\pm\pm} = -\frac{1}{4\gamma\pi} \sqrt{\frac{2c}{r_R r_S L}} \frac{1}{\sqrt{\tau}} \frac{f \sin(\Gamma \pm \Theta^\pm)}{\tau + \tau_{lag}^{\pm\pm}}, \quad \tau_{lag}^{\pm\pm} = f [1 - \cos(\Gamma \pm \Theta^\pm)], \quad (1.4)$$

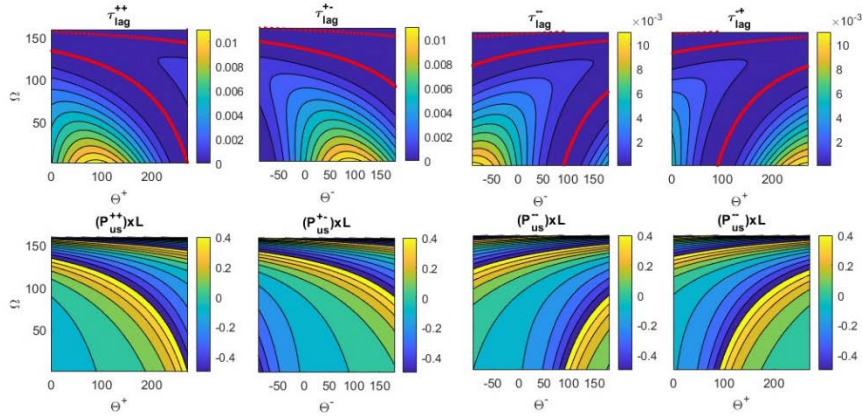
όπου  $f = \frac{\gamma^2 r_R r_S}{cL}$  και  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  είναι η χαρακτηριστική παράμετρος της νέας λύσης.

Οι 4 διαφορετικοί όροι ορίζονται από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς προσήμων της Εξ. (1.4)  $(++,+,-,-,+)$ . Η λύση των 4 όρων είναι έγκυρη για μεγαλύτερους χρόνους σε σχέση με την λύση των 2 όρων.

Για την περίπτωση της προσεγγιστικής λύσης των 4 όρων η παράμετρος  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  θα μελετηθεί, ώστε να εξακριβωθεί η δυνατότητα της να εκφράζει την χρονική εξέλιξη της κρουστικής απόκρισης, χωρίς να απαιτείται ο αναλυτικός υπολογισμός της. Και σε αυτή την περίπτωση οι συγκρίσεις θα γίνουν με την απόκριση μοναδιαίας βαθμίδας, η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{us}^{\pm\pm} = -\frac{1}{4\gamma\pi} \sqrt{\frac{2c}{r_R r_S L}} \frac{2}{\sqrt{\tau_{lag}^{\pm\pm}}} \arctan\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_{lag}^{\pm\pm}}}\right). \quad (1.5)$$

Για την μελέτη της συμπεριφοράς του  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  χρησιμοποιείται ο ίδιος τρόπος απεικόνισης με χρήση ισοϋψών καμπυλών. Στο Σχήμα 2.1 οι ισοϋψείς του  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  ως προς τα  $(\Theta^\pm, \Omega)$  συγκρίνονται με τις αντίστοιχες ισοϋψείς της απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας. Και σε αυτή την περίπτωση η απόκριση μοναδιαίας βαθμίδας έχει κανονικοποιηθεί με τον συντελεστή  $(1/L)$ , όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.1 Ισοϋψείς των παραμέτρων  $\tau_{lag}^{++}$ ,  $\tau_{lag}^{+-}$ ,  $\tau_{lag}^{--}$  και  $\tau_{lag}^{-+}$  [Εξ. (1.4)] (πρώτη γραμμή), ισοϋψείς των αποκρίσεων μοναδιαίας βαθμίδας  $P_{us}^{++}$ ,  $P_{us}^{+-}$ ,  $P_{us}^{--}$  και  $P_{us}^{-+}$  [Εξ. (1.5)] (δεύτερη γραμμή) ως προς  $(\Theta^\pm, \Omega)$ .

Στα γραφήματα των  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  με κόκκινες γραμμές σημειώνονται τα σημεία μηδενισμού του κάθε όρου, τα οποία υποδεικνύουν τα σύνορα σκιάς. Συγκρίνοντας κάθε όρο  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  με τους αντίστοιχους της απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας, παρατηρείται ότι τα σύνορα σκιάς συμπίπτουν με τα σημεία στα οποία η μοναδιαία βαθμίδα αλλάζει ασυνεχώς πρόσημο. Μάλιστα, ακριβώς όπως και στην προσεγγιστική λύση των 2 όρων, κοντά στα σημεία αυτά η μοναδιαία βαθμίδα παίρνει την μέγιστη τιμή της και αμέσως μετά την αλλαγή του προσήμου την ελάχιστη. Επιπλέον, όπως και στους 2 όρους οι περιοχές με μέγιστη τιμή στα διαγράμματα  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  (μακριά από τα σύνορα σκιάς) αντιστοιχούν στις περιοχές της απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας όπου το πεδίο γίνεται μικρό. Υπενθυμίζεται εκ νέου ότι κοντά στα σύνορα σκιάς το σήμα έχει γρήγορη χρονική εξέλιξη, ενώ μακριά από αυτά η χρονική εξέλιξη είναι αργή.

Όπως και στην λύση των 2 όρων οι παράμετροι  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  που προκύπτουν από την λύση των 4 όρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μία a priori εκτίμηση για την απόκριση της περίθλασης. Ωστόσο, οι παράμετροι  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  είναι περισσότερο αξιόπιστοι, αφού η λύση των 4 όρων έχει μεγαλύτερη περιοχή εγκυρότητας και ισχύει για μεγαλύτερους χρόνους σε σχέση με τη λύση των 2 όρων.

### 3. Νέα μορφή της ακριβούς λύσης 4 όρων και χαρακτηριστικό μέγεθος

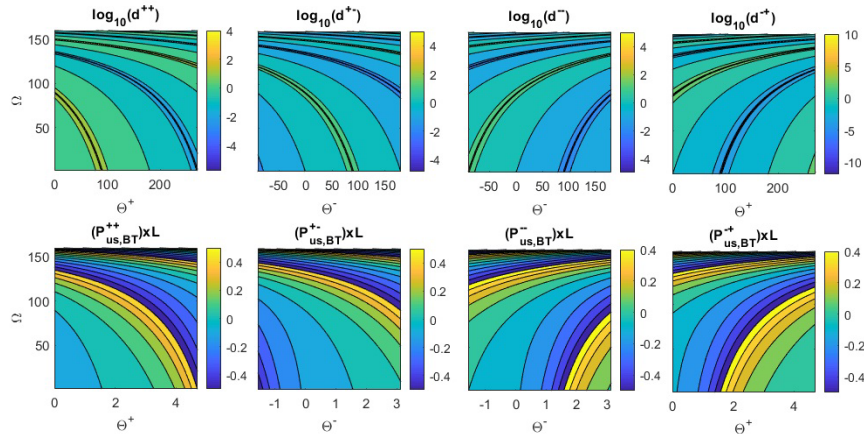
Η ακριβής λύση προτείνεται να επαναδιατυπωθεί με την εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
p_{BT}^{\pm\pm} &= H(t-L/c) \frac{1}{t} \left( \frac{\partial M^{++}}{\partial t} + \frac{\partial M^{+-}}{\partial t} + \frac{\partial M^{--}}{\partial t} + \frac{\partial M^{-+}}{\partial t} \right) \\
M^{\pm\pm} &= -\text{sign}[\sin(b^{\pm\pm})] \frac{1}{c\pi} \arctan \left[ \frac{\tanh\left(\frac{1}{2\gamma} \text{arccosh}(F)\right)}{d^{\pm\pm}} \right] \\
F &= \frac{c^2 t^2 - (r_S^2 + r_R^2 + (z_R - z_S)^2)}{2r_S r_R}, d_j = \sqrt{\frac{1 - \cos b^{\pm\pm}}{1 + \cos b^{\pm\pm}}}, b^{\pm\pm} = \frac{\pi \pm \theta_R \pm \theta_S}{\gamma}
\end{aligned} \tag{1.6}$$

Έχει παρατηρηθεί ότι οι όροι  $d^{\pm\pm}$ , οι οποίοι εξαρτώνται αποκλειστικά από τις γωνιακές θέσεις της πηγής και του δέκτη καθώς και της γωνίας της σφήνας, διαμορφώνουν κατά κύριο λόγο τη λύση. Κατ' επέκταση, όπως και στις προσεγγιστικές λύσεις, διαγράμματα  $(\Theta^\pm, \Omega)$  μπορούν να παραχθούν για τους όρους  $d^{\pm\pm}$  και των αντίστοιχων όρων απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει αναλυτική λύση για την απόκριση μοναδιαίας βαθμίδας και έτσι την υπολογίζουμε με αριθμητική ολοκλήρωση,

$$P_{us,BT}^{\pm\pm} = \int_0^\infty p_{us,BT}^{\pm\pm} dt . \tag{1.7}$$

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι 4 όροι του  $d^{\pm\pm}$  σε αντιπαραβολή με τους 4 όρους της μοναδιαίας βαθμίδας. Λόγω, των ακραίων τιμών που λαμβάνουν τα μέγιστα και τα ελάχιστα του  $d^{\pm\pm}$  σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές του, επιλέγεται λογαριθμική κλίμακα για την απεικόνιση.



Σχήμα 3.1 Ισοϋψείς των παραμέτρων  $d^{++}$ ,  $d^{+-}$ ,  $d^{--}$  και  $d^{-+}$  [Εξ. (1.6)](πρώτη γραμμή), ισοϋψείς των αποκρίσεων μοναδιαίας βαθμίδας  $P_{us,BT}^{++}$ ,  $P_{us,BT}^{+-}$ ,  $P_{us,BT}^{--}$  και  $P_{us,BT}^{-+}$  [Εξ. (1.7)](δεύτερη γραμμή) ως προς  $(\Theta^\pm, \Omega)$ .

Συγκρίνοντας τους αντίστοιχους όρους της παραμέτρου  $d^{\pm\pm}$  και της μοναδιαίας βαθμίδας παρατηρείται ότι στα σημεία όπου το  $d^{\pm\pm}$  παρουσιάζει ελάχιστα η μοναδιαία βαθμίδα παρουσιάζει απότομες αλλαγές προσήμου, ακριβώς όπως και στις προσεγγιστικές λύσεις. Μάλιστα, κοντά στα σημεία αυτά, τα οποία και σε αυτή την περίπτωση αντιπροσωπεύουν τα σύνορα σκιάς, η μοναδιαία βαθμίδα φτάνει στην μέγιστη τιμή της και μετά την αλλαγή προσήμου παίρνει την ελάχιστη τιμή της. Μεγάλες τιμές του  $d^{\pm\pm}$  υποδεικνύουν περιοχές με μικρές τιμές στην απόκριση μοναδιαίας βαθμίδας και αντιστοιχούν σε δέκτες μακριά από τα σύνορα σκιάς. Πειραματική διερεύνηση έχει καταδείξει ότι κοντά στα σύνορα σκιάς η εξέλιξη της απόκρισης της περίθλασης είναι γρήγορη, ενώ μακριά από αυτά αργή.

Η παράμετρος  $d^{\pm\pm}$  παρουσιάζει τις ίδιες δυνατότητες στην ανίχνευση των φυσικών χαρακτηριστικών της απόκρισης της περίθλασης. Ωστόσο, είναι πιο αξιόπιστη από τις αντίστοιχες  $\tau_{lag}^{\pm\pm}$  και  $\tau_{lag}^{\pm}$  επειδή προέρχεται από την ακριβή λύση, η οποία ισχύει για όλους τους χρόνους.

#### 4. Αναφορές

[1] L. Savioja and U. P. Svensson, “Overview of geometrical room acoustic modeling techniques” *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, pp 708-730 (2015).

[2] P. Economou and P. Charalampous, “The Significance of Sound Diffraction Effects in Simulating Acoustics in Ancient Theatres” *Acust. Acta Acust.* **99**, pp 48-57 (2013).

[3] K. D. Heaney, T. Yamada, M. Zampolli, and G. Haralabus “Lateral diffraction of underwater sounds between Japan and Chile: experimental results and modeling” *J. Acoust. Soc. Am.* **140**, pp 3024-3024 (2016).

[4] G. Lacanna and M. Ripepe, “Influence of near-source volcano topography on the acoustic wavefield and implication for source modeling” *J. Volc. Geoth. Res.* **250**, pp 9-18 (2013).

[5] Μ. Ι. Σπυρόπουλος, «Μελέτη αναλυτικών λύσεων για το ακουστικό σήμα περίθλασης γύρω από άκαμπτη σφήνα», Διπλωματική Εργασία, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα (2021).

[6] Menounou and P. Nikolaou, “Analytical model for predicting edge diffraction in the time domain,” *J. Acoust. Soc. Am.* **142**, pp 3580-3592 (2017).

## **Βελτιωμένες ημι-εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ηχομείωσης πίσω από ακουστικά σκληρή σφήνα**

Πηνελόπη Μενούνου  
Πανεπιστήμιο Πατρών

Σωτήρης Σαλάγας  
Πανεπιστήμιο Πατρών

Πέτρος Νικολάου  
Πανεπιστήμιο Πατρών

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Μια νέα προσεγγιστική αναλυτική λύση παρουσιάζεται για τον υπολογισμό του πεδίου περίθλασης γύρω από ακουστικά σκληρή σφήνα. Τα αποτελέσματα για δέκτη στη ζώνη σκιάς είναι σε σχετικά καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα από την ακριβή λύση Oberhettinger. Οι αναλυτικές λύσεις όμως ενέχουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Με βάση τη νέα λύση υπολογίζεται η ηχομείωση που παρέχει η σφήνα σε δέκτη στη ζώνη σκιάς της και για πρακτικές εφαρμογές που απαιτούν απλούς και γρήγορους υπολογισμούς προτείνεται: (i) ένα νομογράφημα ως οικογένεια καμπυλών και (ii) μια ημι-εμπειρική σχέση που περιέχει απλούς μαθηματικούς τύπους. Η προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση συγκρίνεται ως προς την ακρίβεια των προλέξεων της και το υπολογιστικό της κόστος με υπάρχουσες ημι-εμπειρικές σχέσεις.*

### ***Improved semi-empirical formulas for the insertion loss behind a rigid wedge***

#### **ABSTRACT**

*A new approximate analytical solution is presented for the prediction of the diffracted field around a rigid wedge. Results for receiver locations in the shadow zone behind the wedge are in reasonably good agreement with the exact Oberhettinger solution. However, the analytical solutions for the diffraction field around a wedge are mathematically complex. Based on the new solution the insertion loss in the shadow zone behind a wedge is investigated and the following are proposed for fast and easy calculations: (i) a prediction chart as a family of curves, and (ii) a semi-empirical relation containing simple mathematical functions. The proposed semi-empirical relation is compared with regards to its accuracy and its computational cost with existing semi-empirical models.*

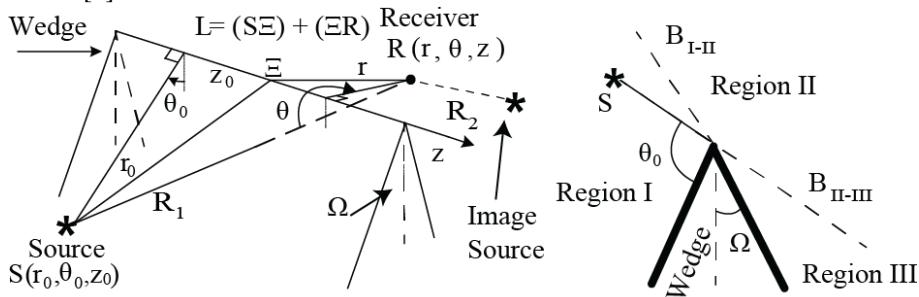
#### **Εισαγωγή**

Ένα εμπόδιο που παρεμβάλλεται μεταξύ μιας ακουστικής πηγής και ενός δέκτη τοποθετεί το δέκτη σε ζώνη σκιάς. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει τη γεωμετρία πηγής, ημι-άπειρου εμποδίου τύπου σφήνας με γωνία  $\Omega$ , και δέκτη στη ζώνη σκιάς. Ο χώρος γύρω από τη σφήνα χωρίζεται σε τρεις περιοχές από τις επίπεδες επιφάνειες

$B_{I-II}$  και  $B_{II-III}$  που ονομάζονται σύνορα σκιάς. Στην περιοχή I συνυπάρχουν το προσπίπτον και το ανακλώμενο από την επιφάνεια της σφήνας πεδίο. Στην περιοχή II υπάρχει μόνο το προσπίπτον πεδίο, ενώ η περιοχή III είναι μια ζώνη σκιάς. Και στις τρεις περιοχές υπάρχει το πεδίο περίθλασης, το οποίο είναι το αντικείμενο της μελέτης μας.

Υπάρχουν πολλές αναλυτικές λύσεις για το υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης: οι ακριβείς λύσεις αλλά και πληθώρα προσεγγιστικών λύσεων (βλ. βιβλίο αναφοράς [1]). Οι αναλυτικές λύσεις ωστόσο είναι μαθηματικά πολύπλοκες και υπολογιστικά κοστοβόρες και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πρακτικές εφαρμογές που απαιτούν απλούς και γρήγορους υπολογισμούς. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφοροι απλοποιημένοι ημι-εμπειρικοί τύποι[2]-[3] ή νομογραφήματα[4], οι οποίοι έχουν μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τις αναλυτικές λύσεις, αλλά χρειάζονται τάξεις μεγέθους μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Οι συγγραφείς είχαν επίσης παρουσιάσει μία ημι-εμπειρική σχέση[5] και νομογράφημα βασισμένοι σε ένα προσεγγιστικό μοντέλο περίθλασης, το Directive Line Source Model (DLSM)[6].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία νέα προσεγγιστική αναλυτική λύση για το πεδίο περίθλασης, η οποία ονομάζεται modified Directive Line Source Model (m-DLSM). Σε αντίθεση με το DLSM που είχε αναπτυχθεί για ημι-επίπεδο και είχε επεκταθεί κατ' οικονομία για σφήνα, η νέα λύση έχει αναπτυχθεί ειδικά για σφήνες και είναι ως εκ τούτου ακριβέστερη από την DLSM. Με βάση την νέα λύση προτείνεται ένα νομογράφημα ως οικογένεια καμπυλών συναρτήσεως δύο παραμέτρων (και η αντίστοιχη βάση δεδομένων που μπορεί να δημιουργηθεί από αυτό) καθώς και μια ημι-εμπειρική σχέση που περιέχει απλές μαθηματικές σχέσεις. Η νέα ημι-εμπειρική σχέση συγκρίνεται με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα εμπειρικά μοντέλα Harmonoise[2] και Nord2000[3], καθώς και με την ημι-εμπειρική λύση του DLSM[5].



Σχήμα 1. Γεωμετρία της σφήνας σε προοπτική (αριστερά) και πλάγια όψη (δεξιά)

## 1. Νέες αναλυτικές λύσεις

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε μία νέα προσεγγιστική λύση του πεδίου περίθλασης γύρω από άκαμπτη σφήνα που ισχύει και για τα τρία είδη απλής προσπίπτουσας ακτινοβολίας (επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα).

$$P_d = P_d^+ + P_d^- \quad (1.1)$$



$$P_d = \begin{cases} -\frac{i}{4\pi} \cdot H_0^{(1)}(kr) \cdot \frac{\sqrt{2k\pi L r r_0}}{L^{3/2} \sqrt{c}} \cdot \Phi^\pm \cdot \frac{\pi}{\sqrt{\tau_{lag}^\pm}} \cdot e^{-i\omega\tau_{lag}^\pm} \cdot \left( \frac{1-i}{2} + iF \left( \sqrt{\frac{2\omega}{\pi} \tau_{lag}^\pm} \right) \right) & \text{plane} \\ -\frac{i}{4\pi} \cdot H_0^{(1)}(kr) \cdot H_0^{(1)} \cdot \frac{\sqrt{2k\pi L r r_0}}{L^{3/2} \sqrt{c}} \cdot \Phi^\pm \cdot \frac{\pi}{\sqrt{\tau_{lag}^\pm}} \cdot e^{-i\omega\tau_{lag}^\pm} \cdot \left( \frac{1-i}{2} + iF \left( \sqrt{\frac{2\omega}{\pi} \tau_{lag}^\pm} \right) \right) & \text{cylindrical} \\ -\frac{i}{4\pi} \cdot H_0^{(1)}(kr) \cdot \frac{\sqrt{2k\pi L r r_0}}{L^{3/2} \sqrt{c}} \cdot \Phi^\pm \cdot \frac{\pi}{\sqrt{\tau_{lag}^\pm}} \cdot e^{-i\omega\tau_{lag}^\pm} \cdot \left( \frac{1-i}{2} + iF \left( \sqrt{\frac{2\omega}{\pi} \tau_{lag}^\pm} \right) \right) & \text{spherical} \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\Phi^\pm = \frac{\gamma \sin \Gamma (\cos \Theta^\pm - \cos \Gamma)}{1 - \cos \Theta^\pm \cos \Gamma}, \quad \tau_{lag}^\pm = \frac{r r_0}{L c} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{(\cos \Theta^\pm - \cos \Gamma)^2}{2(1 - \cos \Gamma \cos \Theta^\pm)} \quad (1.3)$$

$$\gamma = \frac{2\pi - 2\Omega}{\pi}, \quad \Theta^\pm = \frac{\theta \pm \theta_0}{\gamma}, \quad \Gamma = \frac{\pi}{\gamma} \quad (1.4)$$

όπου  $k = 2\pi f / c$  ο αριθμός κύματος ( $c$  η ταχύτητα του ήχου),  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $H_0^{(1)}$  η συνάρτηση Hankel μηδενικής τάξης πρώτου είδους,  $F$  τα ολοκληρώματα Fresnel,  $r_0, \theta_0, z_0$  και  $r, \theta, z$  οι συντεταγμένες πηγής και δέκτη αντίστοιχα και  $L$  η ελάχιστη απόσταση που διανύει ο ήχος για να φτάσει από την πηγή στο δέκτη μέσω περιθλάσης (βλ. Σχήμα 1).

Η απόδειξη της νέας λύσης παραλείπεται καθώς δεν εμπίπτει στους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Αδρομερώς μπορεί να περιγράψει ως εξής: Αρχικά, φέρνουμε τις τρεις ακριβείς λύσεις Oberhettinger[1] για επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα στο πεδίο των συχνοτήτων σε ενοποιημένη μορφή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε αναλυτικά τους αντίστροφους μετασχηματισμούς Fourier. Απλοποιούμε τις λύσεις που προέκυψαν στο πεδίο του χρόνου με προσεγγίσεις κατάλληλες για μικρούς χρόνους. Τέλος, υπολογίζουμε εκ νέου αναλυτικά τους μετασχηματισμούς Fourier των προσεγγιστικών λύσεων και προκύπτουν οι Εξ. (1.1) – (1.4) στο πεδίο των συχνοτήτων. Οι νέες λύσεις, σε αντίθεση με τις λύσεις του Oberhettinger, είναι προσεγγιστικές και ισχύουν για  $k r r_0 / L \gg 1$ , και μακριά από μη περιθλούσες γωνίες σφήνας ( $\Omega = 90^\circ, 135^\circ, \dots$ ).

Η ακρίβεια των νέων λύσεων ελέγχεται συγκρίνοντας τις με τις ακριβείς λύσεις Oberhettinger για κάθε είδος προσπίπτουσας ακτινοβολίας ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, έγινε μια εκτενής αριθμητική μελέτη στην οποία μεταβάλαμε όλες τις παραμέτρους της λύσης  $\Omega, r, \theta, r_0, \theta_0, f$ . Για κάθε συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων, υπολογίσαμε την ηχομείωση,  $IL$ , στη θέση A

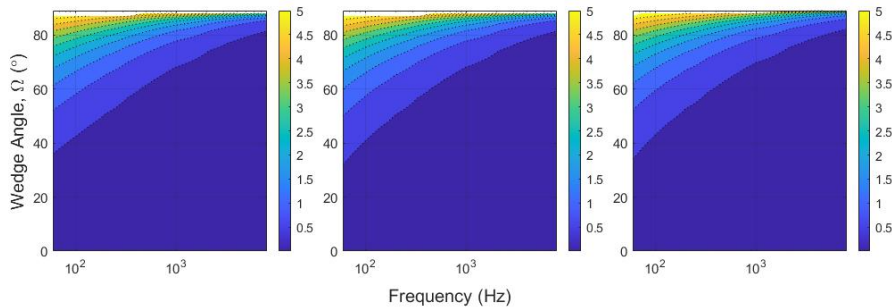
$$IL = -10 \log \left( \frac{P_d^{rms}(A)}{P_0^{rms}(A)} \right)^2, \quad (1.5)$$

όπου  $P_d^{rms}$  και  $P_0^{rms}$  η μέση τετραγωνική ρίζα της ακουστικής πίεσης στη θέση A με και χωρίς την παρουσία της σφήνας, αντίστοιχα. Η ακουστική πίεση με την παρουσία του εμποδίου υπολογίζεται δύο φορές. Μια φορά με τη νέα λύση [Εξ.(1.2)], που θέλουμε να ελέγξουμε, και μία φορά με την αντίστοιχη ακριβή λύση Oberhettinger. Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά των δύο ηχομειώσεων που

προέκυψαν ως  $\Delta IL = |IL_{Oberhettinger} - IL_{mDLSM}|$ . Από τη μελέτη προέκυψε ότι η διαφορά  $\Delta IL$  και άρα η απόκλιση της νέας λύσης από την ακριβή λύση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την γωνία σφήνας  $\Omega$  και τη συχνότητα  $f$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι: (i) η παρούσα εργασία εστιάζει στη ζώνη σκιάς και επομένως οι γωνίες σφήνας που ελέγχονται είναι  $\Omega < \pi/2$  και οι γωνιακές θέσεις της πηγής  $0 < \theta_0 < \pi - 2\Omega$ , (ii) ο συνδυασμός των παραμέτρων  $r_0$ ,  $r$  και  $f$  πρέπει να ικανοποιεί την σχέση  $\frac{kr_0}{L} \gg 1$  για να βρισκόμαστε στην περιοχή εγκυρότητας των νέων λύσεων, (iii) τιμές ηχομειώσεων  $IL$  μεγαλύτερες των 25dB δεν ελήφθησαν υπόψιν γιατί αντιστοιχούν σε πολύ μικρές τιμές του πεδίου περίθλασης σε σχέση με τις τιμές ελεύθερου πεδίου.

Ως προς τη συχνότητα, μελετήθηκαν οι συχνότητες όλων των τριτο-οκτάβων από 63Hz έως 8000Hz. Ως προς τις ακτινικές θέσεις, τα  $r, r_0$  διατηρήθηκαν σταθερά  $r = 2m, r_0 = 10m$  έτσι ώστε ακόμα και για τη μικρότερη συχνότητα που εξετάστηκε, η νέα λύση να βρίσκεται στην περιοχή εγκυρότητάς της  $\frac{kr_0}{L} > 1$ . Οι γωνίες σφήνας μεταβλήθηκαν ανά μία μοίρα από  $0^\circ$  έως  $90^\circ$ . Οι γωνίες πηγής από  $0^\circ$  ως  $180^\circ - 2\Omega$  και οι γωνίες δέκτη από  $180^\circ + \theta_0$  ως  $360^\circ - 2\Omega$ . Για κάθε συνδυασμό  $\Omega$  και  $f$  εντοπίσαμε την μέγιστη διαφορά των δυο ηχομειώσεων (της νέας λύσης και τη λύσης Oberhettinger)  $\Delta IL^{\max}$  ανάμεσα σε όλους τους συνδυασμούς γωνιακών θέσεων πηγής και δέκτη  $\theta_0, \theta$ .



Σχήμα 2. Μέγιστη απόκλιση της ηχομείωσης που υπολογίζεται από τη νέα λύση [Εξ.(1.2)] σε σχέση με την ηχομείωση που υπολογίζεται από την λύση Oberhettinger [1] για σφαιρικά, κυλινδρικά και επίπεδα κύματα (από αριστερά προς τα δεξιά).

Το Σχήμα 2 δείχνει αυτά τα μέγιστα σφάλματα  $\Delta IL^{\max}$  για μεγάλο εύρος συχνοτήτων και γωνιών σφήνας, για σφαιρικά, κυλινδρικά και επίπεδα προσπίπτοντα κύματα. Παρατηρούμε την σχετικά καλή συμφωνία της νέας λύσης με τις λύσεις Oberhettinger για όλα τα είδη ακτινοβολίας με αποκλίσεις να παρατηρούνται για τον συνδυασμό χαμηλών συχνοτήτων και μεγάλων γωνιών σφήνας. Επισημαίνεται ότι η συμφωνία είναι καλύτερη από εκείνη με το DLSM.

## 2. Προσεγγιστικές λύσεις και νομογραφήματα

Ο υπολογισμός της ηχομείωσης,  $IL$ , τόσο με την λύση του Oberhettinger, όσο και με την νέα λύση, είναι χρονοβόρος. Η λύση του Oberhettinger απαιτεί αριθμητική επίλυση ενός ολοκληρώματος, η δε προτεινόμενη λύση τον υπολογισμό ολοκληρωμάτων Fresnel, που έχουν σημαντικό υπολογιστικό κόστος.

Κατά το πρώτο στάδιο αναζητάμε μία προσεγγιστική μορφή της Εξ.(1.2), η οποία να εξαρτάται από λιγότερες παραμέτρους από ότι η αρχική λύση. Υποθέτοντας ότι  $\theta^+ \cong \theta^-$  και εισάγοντας την Εξ.(1.2) στην Εξ.(1.5), η ηχομείωση και για τα τρία είδη προσπίπτοντος κύματος μπορεί να γραφεί ως:

$$IL_{appr} = IL_c + IL_{sp} + IL_w \quad (2.1)$$

$$IL_c = -10 \left[ \left[ F(\infty) - F(\sqrt{2N^-}) \right] + e^{i\pi(N^- - N^+)} \left[ F(\infty) - F(\sqrt{2N^+}) \right] \right]^2 \quad (2.2)$$

$$IL_{sp} = \begin{cases} -10 \log \left( \frac{R_1}{L} \right)^2 & \text{spherical} \\ -10 \log \left( \frac{R_1}{L} \right) & \text{cylindrical} \\ 0 & \text{plane} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$IL_w = 3 - 10 \log \left( \frac{\sin^2 \Gamma}{1 - \cos \Theta^- \cos \Gamma} \right) \quad (2.4)$$

όπου οι παράμετροι

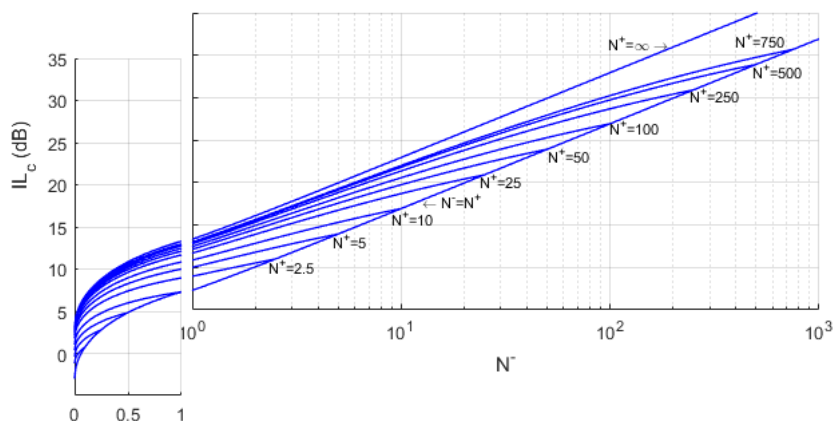
$$N^- = \frac{\omega}{\pi} \tau_{lag}^-, \quad N^+ = \frac{\omega}{\pi} \tau_{lag}^+ \quad (2.5)$$

ονομάζονται αριθμοί Fresnel. Μικρές τιμές των αριθμών Fresnel αντιστοιχούν σε χαμηλές συχνότητες ή σε θέσεις δέκτη κοντά στο σύνορα σκιάς (του συνόρου  $B_{I-II}$  για το  $N^+$  και του συνόρου  $B_{II-III}$  για το  $N^-$ ). Αντίστοιχα, μεγάλες τιμές αντιστοιχούν σε υψηλές συχνότητες και δέκτες μακριά από τα σύνορα σκιάς. Δέκτες στη ζώνη σκιάς βρίσκονται πιο κοντά στο σύνορο  $B_{II-III}$  από ότι στο σύνορο  $B_{I-II}$  και πράγματι προκύπτει ότι  $N^+ > N^-$ .

Το πλεονέκτημα των Εξ.(2.1) – (2.4) είναι ότι οι όροι  $IL_{sp}$  και  $IL_w$  είναι εύκολο να υπολογιστούν, ενώ ο πρώτος όρος,  $IL_c$ , που είναι χρονοβόρος στον υπολογισμό, μπορεί να απεικονιστεί ως οικογένεια καμπυλών συναρτήσεως των παραμέτρων  $N^-$  και  $N^+$  όπως φαίνεται στο νομογράφημα στο Σχήμα 3.

Νομογραφήματα για τον προσδιορισμό της ηχομείωσης έχουν επίσης προταθεί στο παρελθόν. Ο Maekawa έχει προτείνει τον συνδυασμό της γνωστής καμπύλης Maekawa για σφήνα μηδενικής γωνίας με κατάλληλη διόρθωση για μη-μηδενικές γωνίες σφήνας από οικογένεια καμπυλών με παραμέτρους τη γωνία της σφήνας και

την γωνία πρόσπτωσης του ήχου[4]. Σε αντίθεση με τη μέθοδο του Maekawa, στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα και μοναδικό διάγραμμα, αυτό στο Σχήμα 3, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για σφαιρικά κύματα, όπως του Maekawa, αλλά και για κυλινδρικά και επίπεδα προσπίπτοντα κύματα.



Σχήμα 3. Προτεινόμενο νομογράφημα για τον υπολογισμό της ηχομείωσης στη ζώνη σκιάς μιας σφήνας ως συνάρτηση των παραμέτρων  $N^-$  και  $N^+$ .

Το νομογράφημα που προκύπτει από την αναλυτική λύση DLSM[6] έχει την ίδια μορφή με το νομογράφημα στο Σχήμα 3, αλλά ο ορισμός των αριθμών Fresnel διαφέρει. Επειδή οι καινούργιοι αριθμοί Fresnel προερχόταν από ακριβέστερη λύση, οι προλέξεις με το νομογράφημα είναι ακριβέστερες από εκείνες με τους αρχικούς αριθμούς Fresnel.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το νομογράφημα μπορεί να αντικατασταθεί από μια βάση δεδομένων που θα παρέχει τις τιμές του  $IL_c$  [από την Εξ.(2.2)] ως συνάρτηση δύο παραμέτρων.

### 3. Ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ηχομείωσης

Στο παρόν κεφάλαιο προτείνεται η ακόλουθη ημι-εμπειρική σχέση η οποία περιέχει απλές μαθηματικές συναρτήσεις που είναι εύκολο να υπολογιστούν:

$$IL_{emp} = IL_s + IL_{sp} + IL_w + IL_{cor} \quad (3.1)$$

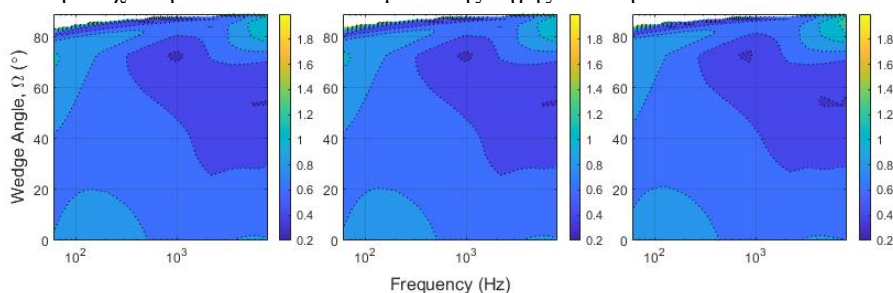
$$IL_s = -20 \log \left( 10^{-IL_s^-/20} + 10^{-IL_s^+/20} \right), \quad IL_{s^\pm} = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N^\pm}}{\tanh \sqrt{2\pi N^\pm}} + 5 \quad (3.2)$$

$$IL_{cor} = (\gamma^2 + 1) e^{-\Psi} \ln \Psi - \frac{1}{5\sqrt{kr_0 r/L}(\sqrt{\gamma} - 1)}, \quad \Psi = \frac{kr_0 r}{L} (\Theta^- - \Gamma) + 0,75\sqrt{\gamma} - 1 \quad (3.3)$$

Οι όροι  $IL_{sp}$  και  $IL_w$  δίνονται από τις Εξ.(2.3) και (2.4), αντίστοιχα. Ο πρώτος όρος,  $IL_s$ , είναι συνάρτηση των παραμέτρων  $N^-$  και  $N^+$ , ενώ μπορεί να θεωρηθεί ότι αντικαθιστά τον όρο  $IL_c$  της Εξ.(2.2). Τέλος, ο διορθωτικός όρος  $IL_{cor}$  έχει

προκύπτει από υπολογιστική διερεύνηση για να μειώσει την απόκλιση των προλέξεων της ημι-εμπειρικής σχέσης από τις λύσεις Oberhettinger.

Το Σχήμα 4 δείχνει την σχετικά καλή συμφωνία της προτεινόμενης ημι-εμπειρικής σχέσης με τις λύσεις Oberhettinger για σφαιρικά, κυλινδρικά και επίπεδα προσπίπτοντα κύματα. Η ημι-εμπειρική σχέση παρέχει καλύτερες προβλέψεις για μικρότερες γωνίες  $\Omega$  (σε σχέση με τις μεγαλύτερες), ενώ η συχνότητα  $f$  δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την συμφωνία των προλέξεων. Η μέγιστη απόκλιση δεν υπερβαίνει τα 2 dB για όλες τις γωνίες σφήνας κάτω των  $85^\circ$  ενώ είναι μικρότερη από 1.2 dB για όλες τις γωνίες σφήνας κάτω των  $80^\circ$  ανεξάρτητα από την συχνότητα και τον συνδυασμό θέσης πηγής - δέκτη.

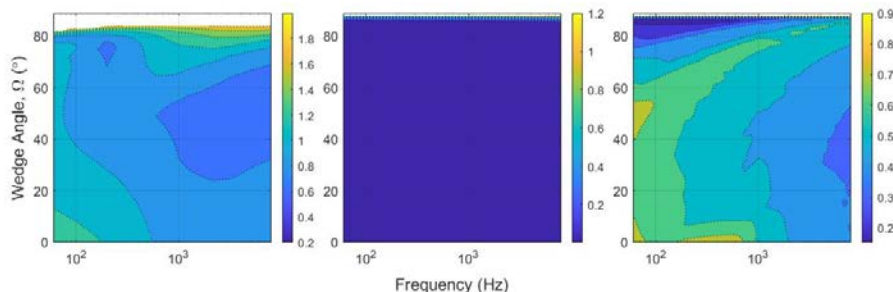


Σχήμα 4. Μέγιστη απόκλιση της ηχομείωσης που υπολογίζεται από την προτεινόμενη ημι-εμπειρική φόρμουλα [Εξ.(3.1)] σε σχέση με την ηχομείωση που υπολογίζεται από τη λύση Oberhettinger[1] για σφαιρικά, κυλινδρικά και επίπεδα κύματα (από αριστερά προς τα δεξιά).

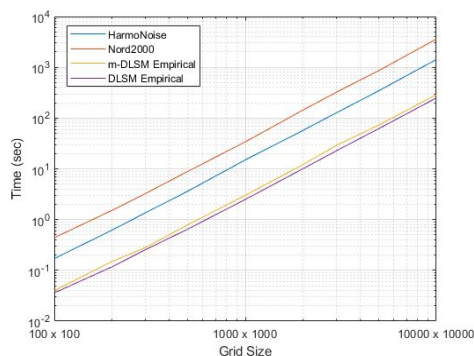
Στη συνέχεια συγκρίνουμε την προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση με υπάρχουσες ημι-εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της ηχομείωσης στη ζώνη σκιάς μια σφήνας. Συγκεκριμένα, η σύγκριση γίνεται με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόλεξης Harmonoise[2] και Nord2000[3], καθώς και την ημι-εμπειρική σχέση DLSSM[5]. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα μοντέλα πρόλεξης Harmonoise και Nord2000 τα φαινόμενα περίθλασης συνυπολογίζονται με άλλα φαινόμενα διάδοσης του θορύβου. Στην παρούσα εργασία οι συγκρίσεις γίνονται αυστηρά για την περίπτωση της μεμονωμένης ακουστικά σκληρής σφήνας.

Το Σχήμα 5 σε συνδυασμό με το Σχήμα 4(α) δείχνει την απόκλιση των τεσσάρων μοντέλων από τη λύση Oberhettinger για σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα. Παρατηρούμε ότι η προτεινόμενη ημι-εμπειρική λύση βελτιώνει την ημι-εμπειρική λύση DLSSM[5] στο μεγαλύτερο εύρος γωνιών σφήνας και συχνοτήτων καθώς και κοντά στην περιοχή της γωνίας  $\Omega=90^\circ$ . Παρόλα αυτά, δεν είναι τόσο ακριβής όσο τα μοντέλα Nord2000 και Harmonoise.

Παρόλη τη μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τα μοντέλα Harmonoise και Nord2000, η προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση έχει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με αυτά. Ισχύει και για τα τρία είδη προσπίπτοντων κυμάτων, ενώ τα μοντέλα Harmonoise και Nord2000 ισχύουν μόνο για σφαιρικά προσπίπτοντα κύματα. Επίσης, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για τα μοντέλα Harmonoise και Nord2000 [βλ. Σχήμα 6]. Ο υπολογιστικός χρόνος για την προτεινόμενη ημι-εμπειρική σχέση είναι ελαφρά αυξημένος σε σχέση με την DLSSM, λόγω της αυξημένης ακρίβειας που προσφέρει.



Σχήμα 5. Μέγιστη απόκλιση της ηχομείωσης που υπολογίζεται από τα εμπειρικά μοντέλα DLISM[5] (αριστερά), Nord2000[3] (κέντρο) και Harmonoise[2] (δεξιά) σε σχέση με την ηχομείωση που υπολογίζεται από τη λύση Oberhettinger[1] για σφαιρικά κύματα.



Σχήμα 6. Υπολογιστικό κόστος ημι-εμπειρικών μοντέλων.

## 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] E. Salomons, D. v. Maercke, J. Defrance, and F. d. Roo, «The Harmonoise Sound Propagation Model» *Acust. Acta Acust.* **97**, pp. 62-74 (2011).
- [3] B. Plovsing, J. Kragh, *Nord 2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without significant Refraction*, Danish Electronics, Light & Acoustics AV 1849/00 (2001).
- [4] 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).
- [5] P. Menounou and V. Asimakopoulos, «Empirical formulas for predicting the insertion loss behind wedges», *Appl. Acoust.* **182**, pp 108166 (2021).
- [6] 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).

## ***Καταστολή θορύβου στροβιλοσυμπιεστή, στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης***

Χρήστος Σεβαστιάδης  
Δρ. Ηλεκτροακουστικής / Α.Π.Θ.  
csevast@ece.auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου  
Ομ. Καθηγητής / Α.Π.Θ.  
lina@ece.auth.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία αφορά σε τεχνική μελέτη που εκπονήθηκε για λογαριασμό του Διαχειριστή της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης (Ε.Ε.Λ.Θ.), με σκοπό την καταστολή του εκπεμπόμενου θορύβου από το συγκρότημα φυγοκεντρικών αεροσυμπιεστών της εγκατάστασης. Παρουσιάζεται η μελέτη για την εφαρμογή κατασιγαστήρα και ηχοπαγίδας στο τμήμα προσαγωγής αέρα για κάθε έναν από τους στροβιλοσυμπιεστές του συγκροτήματος, και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του εκπεμπόμενου θορύβου, πριν και μετά την εφαρμογή.*

### ***Turbocompressor noise suppression, at the Thessaloniki Sewage Treatment Plant***

#### **ABSTRACT**

*This work concerns a technical study prepared on behalf of the Operator of the Thessaloniki Sewage Treatment Plant (SWTP), with the aim of suppressing the noise emitted by the plant's centrifugal air compressor complex. The study of the application of a muffler and sound trap in the air intake section for each of the turbochargers of the assembly is presented, and the results of the emitted noise measurements, before and after the application, are evaluated.*

#### **Εισαγωγή**

Ο Διαχειριστής της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Θεσσαλονίκης (Ε.Ε.Λ.Θ.), είχε την υποχρέωση να εφαρμόσει τη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Μ.Π.Ε) για τη λειτουργία της εγκατάστασης, η οποία για την ηχορύπανση αφορά κύρια στη μη υπέρβαση των ορίων της στάθμης θορύβου, στα όρια της ιδιοκτησίας. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι το συγκρότημα φυγοκεντρικών αεροσυμπιεστών εκπέμπει πολύ υψηλή στάθμη θορύβου, ο οποίος αποτελεί σημαντικό παράγοντα όχλησης, ήδη εντός των ορίων της εγκατάστασης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ο Διαχειριστής ανέθεσε στην εργαστηριακή μονάδα Ηλεκτροακουστικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης την τεχνική

μελέτη καταστολής του εκπεμπόμενου θορύβου, καθώς και την αξιολόγηση του αποτελέσματος της εφαρμογής της.

## **1. Περιγραφή του προβλήματος**

### *1.1 Περιγραφή της εγκατάστασης*

Το συγκρότημα συνίσταται από μία συστοιχία έξι (6) συστημάτων στροβιλοσυμπιεστών υψηλών στροφών, οι οποίοι στεγάζονται εντός κτιρίου. Ο συμπιεσμένος αέρας διοχετεύεται, μέσω ενός δικτύου υπέργειων και υπόγειων αγωγών, στους φυσητήρες των βιολογικών αντιδραστήρων. Ενώ ο κάθε αεροσυμπιεστής είναι περικλειστος σε ηχοαπορροφητικό θάλαμο, ο αέρας προσάγεται στον στροβιλοσυμπιεστή μέσω ενός προθάλαμου με το φίλτρο αέρα και έναν κοντό αεραγωγό, χωρίς καμία μέριμνα για τον εκπεμπόμενο θόρυβο.

### *1.1 Αξιολόγηση του εκπεμπόμενου θορύβου*

Ο εκπεμπόμενος θόρυβος κατά τη λειτουργία του ενός αεροσυμπιεστή, σε απόσταση 10 μ. από το προθάλαμο προσαγωγής αέρα, μετρήθηκε τόσο κατά στάθμιση A όσο και κατά στάθμιση Z στα 99.5 dB, ενώ η συχνοτική ανάλυση έδειξε ότι ο θόρυβος υπερσχύει στις οκτάβες των 2 kHz και 4 kHz. Ως πρωτογενής μηχανισμός παραγωγής του θορύβου θεωρήθηκε η σε υψηλή ταχύτητα περιστροφή της πτερωτής του στροβιλοσυμπιεστή, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι θόρυβος εκπεμπόταν σχεδόν άμεσα στον εξωτερικό χώρο του κτιρίου μέσω του αεραγωγού προσαγωγής και του προθαλάμου, με μοναδικό εμπόδιο το φίλτρο αέρα και στο περσιδωτό θυρόφυλλο του προθαλάμου, όπου δεν είχε εφαρμοστεί καμία διάταξη απομείωσης θορύβου με ηχοαπορροφητικό υλικό. Επιπλέον, εντοπίστηκαν ατέλειες κατασκευής των θαλάμων ηχοαπορρόφησης των αεροσυμπιεστών, με αποτέλεσμα ο θόρυβος να εκπέμπεται στο εξωτερικό του κτιρίου μέσω δευτερευουσών διαδρομών, οι οποίες καταλήγουν στον εξωτερικό χώρο μέσω των συνήθως ανοικτών παραθύρων του κτιρίου. Ωστόσο, για το τελευταίο δεν ζητήθηκε από τον κύριο του έργου κάποια πρόταση βελτίωσης της κατάστασης.

## **2. Μελέτη εφαρμογής**

### *1.1 Πρώτο στάδιο εφαρμογής — Εφαρμογή κατασιγαστήρα*

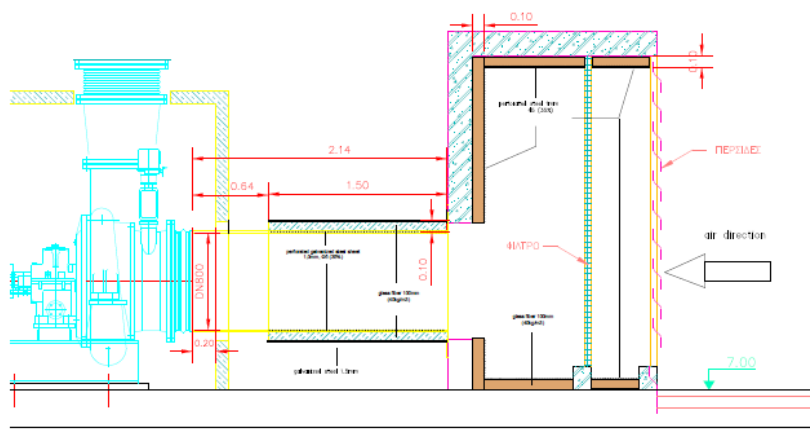
Το πρώτο στάδιο εφαρμογής αφορούσε στην αντικατάσταση του αγωγού προσαγωγής με κατασιγαστήρα. Ανάλογα με την αποτελεσματικότητά του, θα ακολουθούσε προσαρμογή του θαλάμου φίλτρου αέρα ως ηχοπαγίδα, με εφαρμογή διατάξεων ηχοαπορρόφησης.

Σημαντικός περιορισμός για όλα τα στάδια της εφαρμογής ήταν η διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερο των διαστάσεων του υπάρχοντος αεραγωγού προσαγωγής, τόσο του μήκους όσο και της ελεύθερης διατομής του, ώστε να μην προκληθεί ανεπίτρεπτη για τη λειτουργία του στροβιλοσυμπιεστή πτώση πίεσης του προσαγόμενου αέρα. Όμοιος περιορισμός αφορούσε και στη γεωμετρία του προθαλάμου φίλτρου αέρα, στον οποίο η όποια παρέμβαση θα έπρεπε να λάβει υπόψη



την πιθανή πρόκληση πτώσης πίεσης. Επίσης, κατά την ανάλυση θεωρήθηκε ότι είναι πολύ σημαντικό η προτεινόμενη λύση να είναι εφαρμόσιμη με τυποποιημένα στοιχεία, αποφεύγοντας την ανάγκη καταφυγής σε ιδιοκατασκευές, οι οποίες δεν εγγυώνται ούτε την πιστή εφαρμογή των σχεδίων, ούτε την ποιότητα της τελικής κατασκευής.

Ο μερικός κωνικός αεραγωγός προτάθηκε να αντικατασταθεί από έναν κυλινδρικό σε όλο το μήκος του κατασιγαστήρα διπλού κελύφους, με διάτρητο εσωτερικό κέλυφος, και με το διάκενο μεταξύ των κελυφών πληρωμένο με ηχοαπορροφητικό υλικό. Στο Σχεδιάγραμμα 1.1 παρουσιάζεται η κατά μήκος τομή του κατασιγαστήρα, με μια αρχική πρόταση εφαρμογής ηχοαπορρόφησης στο θάλαμο προσαγωγής αέρα. Η εφαρμογή του κατασιγαστήρα εκτιμήθηκε ότι θα επιφέρει μέγιστη ηχομείωση περί τα 16 dBA.



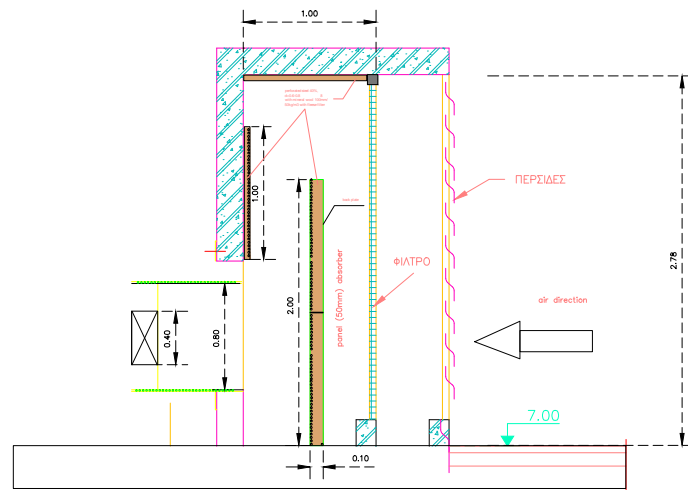
Σχεδιάγραμμα 1.1. Τομή μονάδας με τον κυλινδρικό κατασιγαστήρα και την αρχική πρόταση για την ηχοαπορρόφηση στο θάλαμο προσαγωγής αέρα.

### 1.2 Δεύτερο στάδιο εφαρμογής — Εφαρμογή ηχοπαγίδας

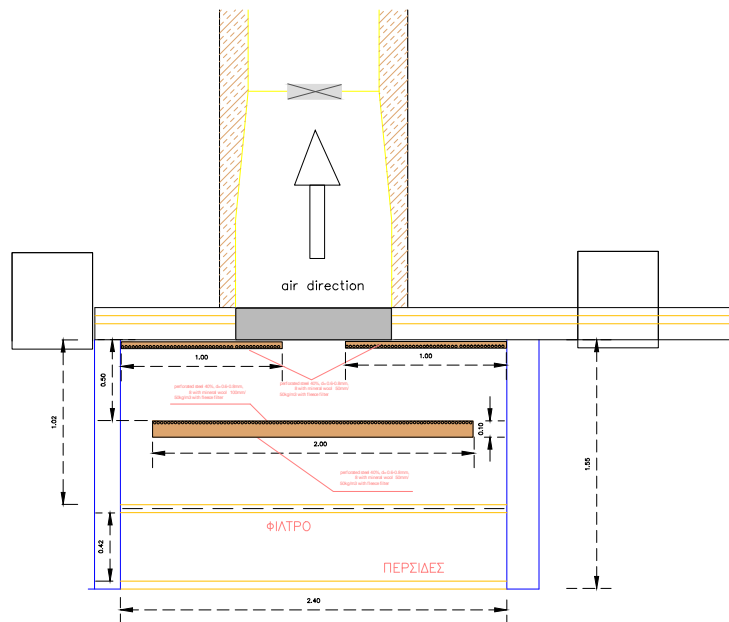
Ωστόσο, η εφαρμογή του κατασιγαστήρα επέφερε λιγότερη από τη μισή εκτιμώμενη ηχομείωση. Επειδή η ηχητική ισχύς εκπομπής του θορύβου είναι σε συχνοτική περιοχή όπου ο ήχος εκπέμπεται έντονα κατευθυντικά, σε συνδυασμό του ότι η ελεύθερη διατομή του στομίου προσαγωγής του στροβιλοσυμπιεστή είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή του αεραγωγού, ενώ το μήκος του αεραγωγού είναι κοντό, είχε ως συνέπεια να μην ενεργεί ηχοαπορροφητικά ολόκληρη η εσωτερική επιφάνεια του κατασιγαστήρα. Κατά συνέπεια, κατέστη υποχρεωτική η εφαρμογή του δεύτερου σταδίου του σχεδίου αντιμετώπισης, με την προσαρμογή σε ηχοπαγίδα του θαλάμου φίλτρου αέρα.

Κατά το δεύτερο στάδιο, προτάθηκαν ένα απλό και ένα σύνθετο σχέδιο ηχοπαγίδας. Αμφότερα τα σχέδια εφαρμόζαν ηχοαπορροφητική διάταξη διάτρητου μεταλλικού ελάσματος με ηχοαπορροφητικό υλικό στις εσωτερικές επιφάνειες του κελύφους του προθαλάμου, μαζί με αντίστοιχο ηχοαπορροφητικό πέτασμα έμπροσθεν του

αεραγωγού προσαγωγής. Η διαφορά μεταξύ των δύο προτάσεων ήταν ότι στη απλή περίπτωση το πέτασμα ήταν μίας ενιαίας επιφάνειας, ενώ στη σύνθετη αποτελούνταν από πολλαπλά επικλινή πτερώγια. Στα σχεδιαγράμματα 2.1 και 2.2 παρουσιάζεται η επιλεχθείσα απλή πρόταση.

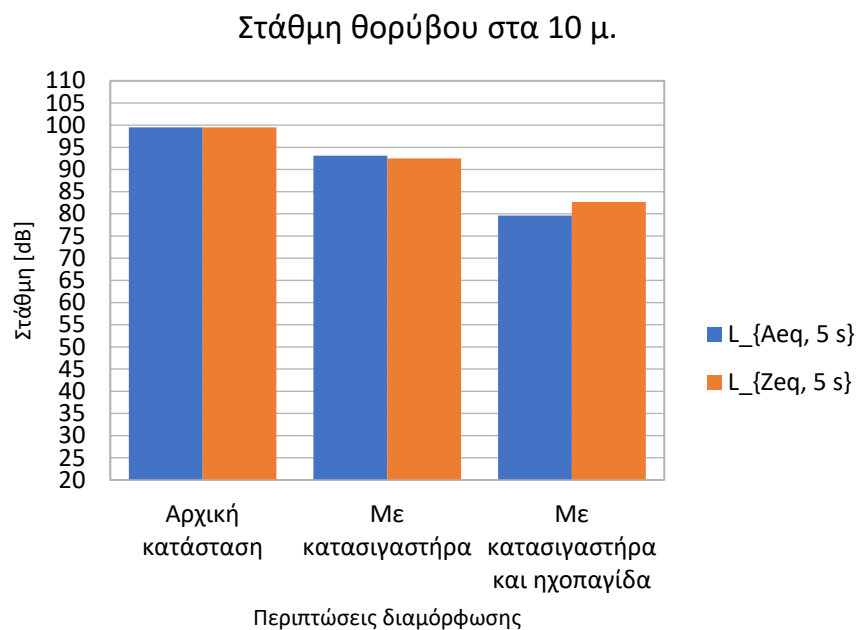


Σχεδιάγραμμα 2.1. Κατακόρυφη τομή της ηχοπαγίδας



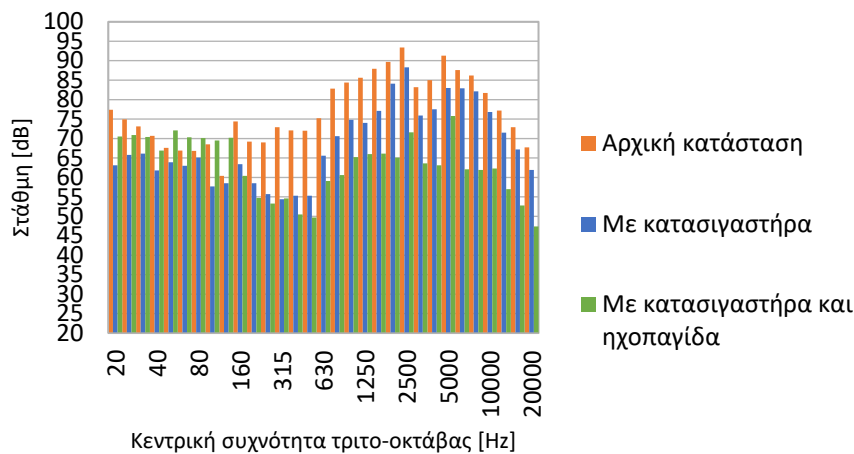
Σχεδιάγραμμα 2.2. Οριζόντια τομή της ηχοπαγίδας.

Στα Σχεδιαγράμματα 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της μέτρησης της στάθμης του θορύβου, κατά την αρχική κατάσταση, μετά την εφαρμογή του κατασιγαστήρα και μετά την εφαρμογή του κατασιγαστήρα μαζί με την ηχοπαγίδα. Ο συνδυασμός του κατασιγαστήρα με την ηχοπαγίδα επέφερε ηχομείωση της τάξεως των 20 dB(A) και 17 dB(Z), κάτι που είναι ικανοποιητικό για τις απαιτήσεις λειτουργίας της εγκατάστασης. Η επίτευξη επιπλέον μείωσης της στάθμης θα ήταν εφικτό με την εφαρμογή της σύνθετης λύσης της ηχοπαγίδας, όμως με μεγαλύτερο οικονομικό κόστος εφαρμογής.



Σχεδιάγραμμα 2.3. Στάθμη θορύβου στην αρχική κατάσταση, με την εφαρμογή μόνον του κατασιγαστήρα, και με την εφαρμογή κατασιγαστήρα μαζί με την ηχοπαγίδα..

Φασματική ανάλυση θορύβου μηχανής,  
 $L_{\{Zeq, 5 s\}}$ , στα 10 μ.



Σχεδιάγραμμα 2.4. Φασματική ανάλυση κατά ένα τρίτο της οκτάβας του εκπεμπόμενου θορύβου για τις τρεις περιπτώσεις διαμόρφωσης της εγκατάστασης.

### 3. Συμπεράσματα

Η αντιμετώπιση του θορύβου από βιομηχανικές εγκαταστάσεις απαιτεί ιδιαίτερη και πολλές φορές σταδιακή αντιμετώπιση. Οι συνήθως υψηλές τιμές των σταθμών θορύβου συνδυάζονται με σημαντικούς περιορισμούς τόσο στο μέγεθος των εφαρμοζόμενων λύσεων, όσο και στην επίδραση των συνθηκών λειτουργίας της κάθε βιομηχανικής εγκατάστασης. Ωστόσο, είναι δυνατή η εφαρμογή τεχνικών λύσεων, που αποδίδουν ικανοποιητικά, χωρίς υπερβολικό οικονομικό κόστος.

## **Σύστημα μη γραμμικού Ενεργητικού Ελέγχου Θορύβου εφαρμοσμένο σε αεροπορικό κάθισμα**

Δημήτρης Μυλωνάς	Αλμπέρτο	Χρήστος	Ιωάννης
Υπ. Διδάκτορας <sup>1</sup>	Ερσπάμερ	Γιακόπουλος	Αντωνιάδης
dimimy1579@mail.ntua.com	Υπ.	Δρ. Μηχ.	Καθηγητής <sup>4</sup>
	Διδάκτορας <sup>2</sup>	Μηχανικός <sup>3</sup>	

<sup>1,2,3,4</sup> Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Εργαστήριο Δυναμικής και Ακουστικής, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780,  
Ζωγράφου, Αθήνα.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου, για την ελάττωση της ακουστικής πίεσης γύρω από το προσκέφαλο μιας αεροπορικής θέσης. Το σύστημα βασίζεται στην αρχή της εξουδετέρωσης δύο ακουστικών κυμάτων με ίδιο πλάτος και αντίθετη φάση όταν αυτά συμβάλλουν και είναι προσανατολισμένο στην εξουδετέρωση χαμηλόσυχων ακουστικών διαταραχών, για τις οποίες είναι γνωστό ότι οι παθητικές τεχνικές ηχομείωσης είναι αναποτελεσματικές. Επιπλέον χρησιμοποιείται ένας μη γραμμικός προσαρμοστικός αλγόριθμος (FsLMS), ο οποίος συνδυάζεται με μια τεχνική πρόβλεψης της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, που βασίζεται στη γραμμική παρέκταση. Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στο μοντέλο αεροπορικής καμπίνας του εργαστηρίου Δυναμικής και Ακουστικής του ΕΜΠ για πραγματική ακουστική διαταραχή καταγεγραμμένη σε καμπίνα αεροσκάφους κλίνοντος στροφείου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση του πλάτους των επιμέρους αρμονικών μεγαλύτερη των 10 dB και μείωση του συνολικού επιπέδου θορύβου που κυμαίνεται από 8 dB έως 11 dB στην περιοχή ενδιαφέροντος.

### ***Non-linear ANC system for aircraft's seat headrest***

#### **ABSTRACT**

*In present work an Active Noise Control System (ANCS) mounted on the headrest of an aircraft's seat is proposed. It is based on the non-linear FsLMS algorithm alongside with a linear extrapolation technique used to estimate the acoustic pressure around the passenger's ears. In order to check system's effectiveness, real-time experiments took place inside an aircraft's cabin mock-up for an acoustic disturbance measured during the flight of a tilt-rotor aircraft. The results have shown a more than 10 dB attenuation of different BPF harmonics and a significant SPL reduction that varies from 8 dB to 11 dB around the passenger's ears.*

## Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί στη μείωση του επιπέδου θορύβου στο εσωτερικό της καμπίνας των αεροσκαφών, κυρίως χάρη στη χρήση καινοτόμων υλικών ηχομόνωσης και στην κατασκευή κινητήρων που παράγουν λιγότερο θόρυβο. Παρόλα αυτά, το συνολικό επίπεδο ακουστικής πίεσης (SPL) είναι συνήθως πάνω από 80 dB [1], συμβάλλοντας στη δημιουργία ενοχλητικών συνθηκών για τον επιβάτη. Όταν αναφερόμαστε στη συχνοτική περιοχή πάνω από τα 400 Hz, κυριαρχούν οι αρμονικές που σχετίζονται με τον αεροδυναμικό θόρυβο. Οι χαμηλές συχνότητες από την άλλη, που εντοπίζονται στην ακουστική διαταραχή μέσα στην καμπίνα του αεροσκάφους συνδέονται με την συχνότητα διέλευσης του ρότορα (BPF) και τις αρμονικές της [2]. Ειδικά στα αεροσκάφη κλίνοντος στροφείου (tilt-rotor aircrafts), τα οποία αποτελούν αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας, η συχνότητα BPF είναι περίπου 10 φορές μικρότερη σε σχέση με ένα συμβατικό αεροσκάφος με έλικα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη χρήση ελαφρών και μικρού πάχους ηχομονωτικών υλικών με σκοπό τη μείωση του βάρους, οδηγούν στην αύξηση της ακουστικής πίεσης που οφείλεται σε χαμηλές συχνότητες και μπορεί να φτάσει τα 95 dB [3].

Προκειμένου να βελτιωθούν οι ακουστικές συνθήκες για τους επιβάτες αεροσκαφών τέτοιου τύπου, στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, το οποίο εγκαθίσταται στο προσκέφαλο της αεροπορικής θέσης. Πρώτη φορά, ένα τέτοιο σύστημα προτάθηκε το 1953 από τους Olson και May, το οποίο βασίζονταν σε έναν ελεγκτή με ανάδραση [4]. Απο τότε αρκετά συστήματα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου έχουν προταθεί, που έχουν σκοπό να αυξήσουν το μέγεθος της ζώνης ησυχίας και να την τοποθετήσουν γύρω από το κεφάλι του επιβάτη καθώς και να μειώσουν, όσο το δυνατόν περισσότερο τη συνολική ακουστική πίεση μέσα στη ζώνη αυτή. Μια κλασική προσέγγιση βασίζεται στον αλγόριθμο FxLMS με 2 ηχεία και δυο μικρόφωνα [5], που όμως παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι η ζώνη ησυχίας βρίσκεται κοντά στα μικρόφωνα, τα οποία συνήθως δεν μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στα αυτιά του επιβάτη. Προκειμένου να λυθεί το παραπάνω ζήτημα έχουν προταθεί συστήματα παρακολούθησης κεφαλιού (head tracking) [6] καθώς και αλγόριθμοι προσέγγισης της εικονικής ακουστικής πίεσης στο σημείο ενδιαφέροντος (virtual sensing) [7].

Στην προσέγγιση της παρούσας εργασίας, για το σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου χρησιμοποιήθηκαν δύο subwoofers και δυο ζεύγη μικροφώνων τα οποία προορίζονται για τον προσδιορισμό με την τεχνική της γραμμικής παρέκτασης της ακουστικής πίεσης, στα σημεία όπου βρίσκονται τα αυτιά του επιβάτη [8]. Με τον τρόπο αυτό, η θέση της ζώνης ησυχίας μπορεί να αλλάξει με έναν υπολογιστικά αποτελεσματικό τρόπο, δίνοντας έτσι μια αποδοτική λύση στο πρόβλημα που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έπειτα για τον υπολογισμό του σήματος ακύρωσης θορύβου, με το οποίο οδηγούνται τα subwoofers προτείνεται ο μη γραμμικός αλγόριθμος FsLMS, ο οποίος αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην μοντελοποίηση συστημάτων με ήπιες μη γραμμικότητες και συστημάτων μη ελάχιστης φάσης (non-minimum phase) [9]. Ο συνδυασμός του FsLMS με την μετατόπιση της ζώνης ησυχίας χρησιμοποιώντας την τεχνική της

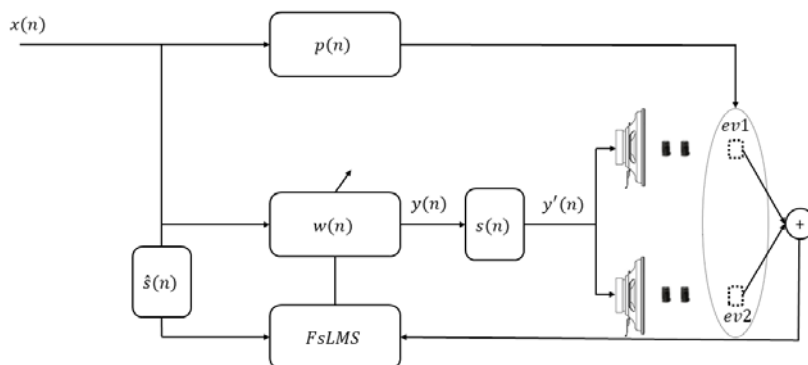
γραμμικής παρέκτασης, αποτελεί την καινοτομία της συγκεκριμένης εργασίας, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά στο μέγεθος της ζώνης ησυχίας, όπου η μείωση της ακουστικής πίεση είναι τουλάχιστον 10 dB.

## 1. Αλγόριθμος ενεργητικού ελέγχου θορύβου

Για να υλοποιηθεί το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου απαιτούνται δύο στάδια: Στο πρώτο, το οποίο προηγείται χρονικά του δευτέρου, πραγματοποιείται ο υπολογισμός ενός μοντέλου του δευτερογενούς μονοπατιού του συστήματος των μεγαφώνων και των μικροφώνων. Στο δεύτερο, χρησιμοποιείται το άθροισμα των εικονικών σημάτων σφάλματος στα αυτιά του επιβάτη, που υπολογίστηκαν μέσω της τεχνικής της γραμμικής παρέκτασης, για να προσδιορισθεί η συνάρτηση κόστους. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους γίνεται με τον αλγόριθμο FsLMS δεύτερης τάξης και ταυτόχρονα υπολογίζονται οι συντελεστές ενός μη γραμμικού προσαρμοστικού φίλτρου. Η συνέλιξη του φίλτρου αυτού με το σήμα αναφοράς, το οποίο προέρχεται από ένα μικρόφωνο στην πηγή του θορύβου, δίνει το σήμα που οδηγεί τα subwoofers του συστήματος (Σχ.1).

### 1.1 Μοντελοποίηση δευτερογενούς μονοπατιού

Το δευτερογενές μονοπάτι  $s(n)$  (Σχ.1) περιλαμβάνει, το ηλεκτροακουστικό σύστημα που ξεκινά από τον ελεγκτή και τελειώνει στα μικρόφωνα σφάλματος. Για την μοντελοποίησή του χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος LMS (Least Mean Square) με σήμα αναφοράς λευκό θόρυβο, ο οποίος αναπαράγεται από τα δύο subwoofers και σήμα σφάλματος το άθροισμα των σημάτων των δύο μακρινών, ως προς τα ηχεία μικροφώνων κάθε ζεύγους.



Σχήμα 1: Μπλόκ διάγραμμα του συστήματος τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Με  $x(n)$  συμβολίζεται η ηχητική διαταραχή στην πηγή του θορύβου, με  $s(n)$  και  $\hat{s}(n)$  το δευτερογενές μονοπάτι και η εκτίμησή του που προέκυψε από το πρώτο στάδιο μοντελοποίησης. Επίσης με  $w(n)$  συμβολίζεται το μη γραμμικό προσαρμοστικό φίλτρο και με  $ev1, ev2$  οι εκτιμώμενες ακουστικές πιέσεις στις θέσεις της ακύρωσης του θορύβου (αυτιά επιβάτη) που προκύπτουν από την γραμμική παρέκταση των σημάτων των πραγματικών μικροφώνων.

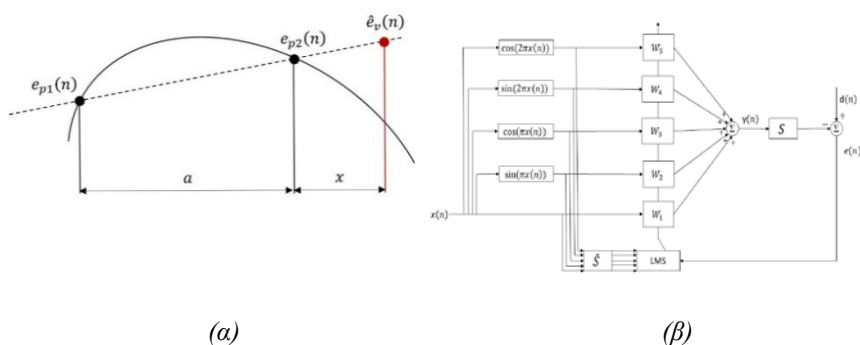
Η μοντελοποίηση του δευτερογενούς μονοπατιού με κατά το δυνατόν μικρότερο σφάλμα συμβάλλει στην ευστάθεια και την καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου του δευτέρου σταδίου του συστήματος, όπου το σήμα αναφοράς αρχικά φιλτράρεται από το μοντέλο πριν χρησιμοποιηθεί από τον αλγόριθμο FsLMS.

### 1.2 Γραμμική παρέκταση

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η γραμμική παρέκταση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ακουστικής πίεσης στα αυτιά του επιβάτη, όπου λόγω της γεωμετρίας του προσκέφαλου μιας αεροπορικής θέσης, είναι δύσκολο να τοποθετηθούν μικρόφωνα. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί δύο ζεύγη μικροφώνων (Σχ. 2α) και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για χαμηλόσυχνες ακουστικές διαταραχές (<400 Hz), όπου τα μήκη κύματος είναι μεγάλα. Με βάση τα σήματα κάθε ζεύγους υπολογίζεται η εικονική ακουστική πίεση από την εξίσωση της γραμμικής παρέκτασης (Εξ. 1).

$$e_v(n) = \frac{e_{p2}(n) - e_{p1}(n)}{a} * x + e_{p2}(n) \quad (1.1)$$

Όπου  $a$  είναι η απόσταση ανάμεσα στα δυο μικρόφωνα κάθε ζεύγους και  $x$  η απόσταση ανάμεσα στο πιο μακρινό μικρόφωνο και τη θέση όπου επιδιώκεται η ακύρωση του θορύβου (Σχ. 2α).



Σχήμα 2: (α) Σχηματική απεικόνιση του προσδιορισμού της ακουστικής πίεσης στα σημεία ενδιαφέροντος με την τεχνική της γραμμικής παρέκτασης, (β) μπλοκ διάγραμμα του μη γραμμικού αλγορίθμου FsLMS δεύτερης τάξης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

### 1.3 Μη γραμμικός αλγόριθμος FsLMS 2<sup>ης</sup> τάξης

Ο αλγόριθμος FsLMS είναι η προσαρμογή ενός Functional Link Neural Network (FLNN) στο πρόβλημα του ενεργητικού ελέγχου θορύβου. Έτσι αντί για ένα σήμα



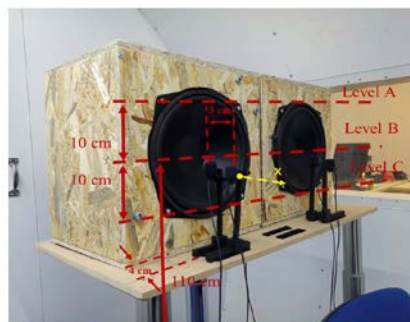
αναφοράς που έχουμε στον κλασικό FxLMS, στον FsLMS δεύτερη τάξης με ημιτονοειδή συνάρτηση επέκτασης (Σχ. 2β) έχουμε 5 σήματα αναφοράς. Οι έξοδοι των μη γραμμικών φίλτρων που προκύπτουν συνδυάζονται για τον υπολογισμό του τελικού σήματος ακύρωσης θορύβου. Με τον τρόπο αυτό εισάγονται μη γραμμικότητες, οι οποίες καθιστούν τον εν λόγω αλγόριθμο πιο αποτελεσματικό στην πρόβλεψη ακουστικών διαταραχών με χαοτικά χαρακτηριστικά παράλληλα με τις αρμονικές συνιστώσες.

## 2. Πειραματικά αποτελέσματα

Το σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω αξιολογήθηκε πειραματικά σε μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους εγκατεστημένο μέσα στο εργαστήριο (Σχ. 3α) προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητά του στη μείωση του πλάτους των επιμέρους αρμονικών της ακουστικής διαταραχή καθώς και του συνολικού επιπέδου ακουστικής πίεσης (SPL) γύρω από το προσκέφαλο της αεροπορικής θέσης. Σαν ακουστική διαταραχή χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό σήμα καταγεγραμμένο μέσα στην καμπίνα ενός αεροσκάφους κλίνοντος στορφέιου (tilt-rotor) κατά τη διάρκεια πτήσης με ταχύτητα 160 κόμβους σε ύψος 10000 πόδια. Έπειτα το σήμα αυτό αναπαράχθηκε από ένα subwoofer στο χώρο του εργαστηρίου, με τρόπο ώστε να διατηρεί όσο το δυνατό περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του πραγματικού σήματος. Για το σύστημα ενεργητικού ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν 2 subwoofer τύπου Visaton WS 25E και 4 μικρόφωνα Shure MX 183 (Σχ. 3β).



(α)

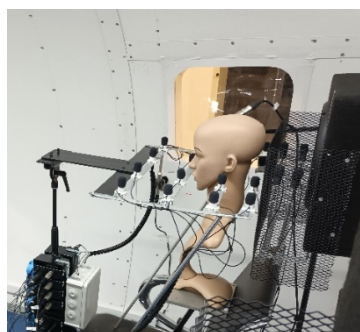


(β)

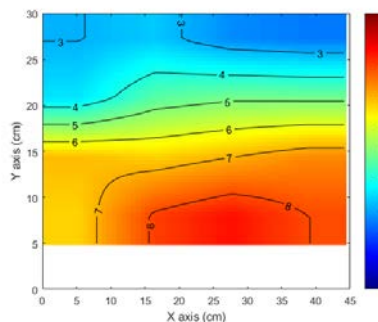
Σχήμα 3: (α) Μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών, (β) σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου με δυο subwoofers και δύο ζεύγη μικροφώνων.

Η ακουστική διαταραχή κάτω από τα 400 Hz στην περιοχή όπου επιχειρήθηκε η ακύρωση του θορύβου αποτελείται από αρμονικές της συχνότητας διέλευσης του ρότορα (BPF), η οποία βρίσκεται στα 24 Hz και χαμηλόσυχο θόρυβο. Συνεπώς οι κύριες αρμονικές βρίσκονται στα 48 Hz, 72 Hz, 96 Hz και 119 Hz. Στο σχήμα 4α παρουσιάζεται το σύστημα μέτρησης της συνολικής ακουστικής πίεσης (SPL) στην περιοχή του προσκέφαλου. Αυτό αποτελείται από 4 σειρές μετρητικών μικροφώνων, τα οποία σχηματίζουν ένα πλέγμα το οποίο μπορεί να κινείται στην κατακόρυφη

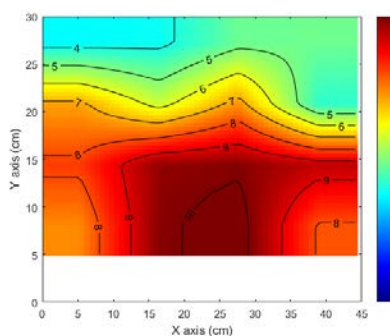
διεύθυνση. Οι μετρήσεις έγιναν σε 3 επίπεδα με απόσταση 100 cm, 110 cm και 120 cm αντίστοιχα από το πάτωμα της καμπίνας.



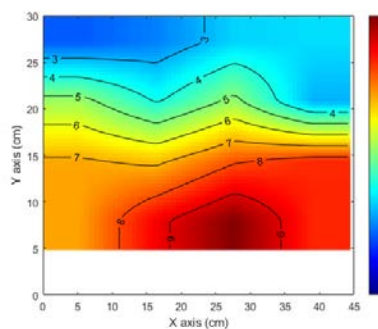
(α)



(β)



(γ)



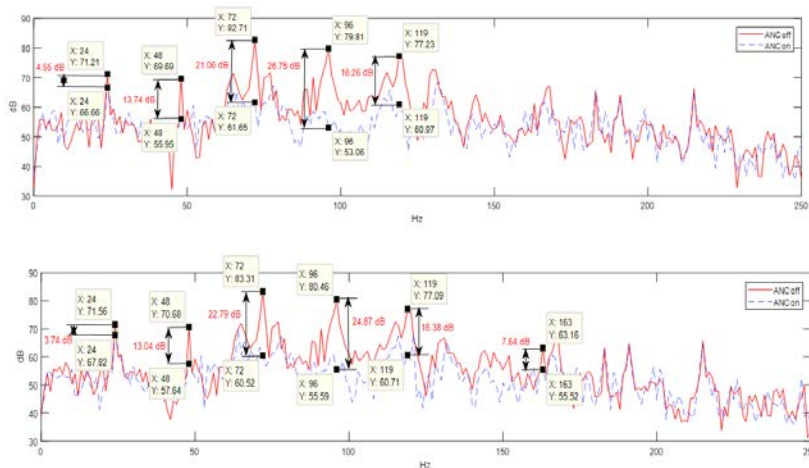
(δ)

Σχήμα 4: (α) Μετρητική διάταξη με πλέγμα μικροφώνων και διαφορά της συνολικής ακουστική πίεσης (dB) μετά την ενεργοποίηση του συστήματος ενεργητικού ελέγχου θορύβου για το επίπεδο με απόσταση από το δάπεδο (β) 100 cm, (γ) 110 cm και (δ) 120 cm. Η SPL πριν την ενεργοποίηση του συστήματος ήταν περίπου 95 dB γύρω από το προσκέφαλο του επιβάτη. Τέλος η περιοχή από 0 cm έως 5 cm στη διεύθυνση Y δεν περιλαμβάνει μετρήσεις μιας και δεν είναι δυνατόν τα αυτιά να βρεθούν σε αυτή.

Σαν επίπεδο όπου βρίσκονται συνήθως τα αυτιά ενός επιβάτη μεσαίου ύψους θεωρήθηκε εκείνο που απέχει 110 cm από το πάτωμα. Επιπλέον τα μικρόφωνα που αντιστοιχούν στη θέση των αυτιών θεωρήθηκε ότι απέχουν από την επιφάνεια του προσκεφάλου 10 cm καθώς και 15 cm μεταξύ τους.

Στα σχήματα 4β, 4γ και 4δ παρουσιάζεται η διαφορά της ακουστικής πίεσης όταν το σύστημα ενεργητικού ελέγχου θορύβου είναι ενεργοποιημένο σε σχέση με την κατάσταση όταν το σύστημα είναι απενεργοποιημένο. Οι τιμές της ακουστικής πίεσης ανάμεσα στα μικρόφωνα που απαρτίζουν το πλέγμα προσεγγίζονται με γραμμική παρεμβολή αφού δεν είναι εφικτό να έχουμε μια μέτρηση για κάθε σημείο του χώρου. Παρατηρούμε ότι ειδικότερα στο επίπεδο των αυτιών (Σχ. 4γ) δημιουργείται μια ζώνη με μείωση της SPL κατά 10 dB, που έχει εμβαδό 20 cm x 10 cm. Ακόμα η ζώνη

μείωσης της SPL κατά 8 dB καταλαμβάνει εμβαδό ίσο με 25 cm x 5 cm στο επίπεδο με απόσταση 100 cm από το πάτωμα της καμπίνας, 35 cm x 15 cm στο επίπεδο με απόσταση 110 cm και 30 cm x 10 cm στο επίπεδο με απόσταση 120 cm.



Σχήμα 5: Φάσματα συχνοτήτων στα σημεία όπου είναι πιθανό να βρίσκονται τα αυτιά ενός επιβάτη μεσαίου ύψους (το επάνω φάσμα αντιστοιχεί στο αριστερό αυτί) και αντιστοιχούν σε απόσταση 110 cm από το πάτωμα του αεροσκάφους και 10 cm από το επίπεδο του προσκεφάλου. Επίσης τα δυο σημεία απέχουν 15 cm μεταξύ τους.

Όσο αφορά στα φάσματα συχνοτήτων στα σημεία των αυτιών (Σχ. 5), παρατηρείται μείωση των πλατών των κύριων αρμονικών μεγαλύτερη από 10 dB. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση των πλάτους της αρμονικής στα 72 Hz (21,06 dB στο αριστερό αυτί και 22,79 dB στο δεξί) και της αρμονικής στα 96 Hz (26,75 dB στο αριστερό αυτί και 24,87 dB στο δεξί).

### 3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε ένα σύστημα τοπικού ενεργητικού ελέγχου θορύβου, βασισμένο στον μη γραμμικό αλγόριθμο FsLMS δεύτερης τάξης και δοκιμάστηκε σε ένα μοντέλο καμπίνας αεροσκάφους για μια πραγματική ακουστική διαταραχή που προέρχεται από ένα αεροσκάφος κλίνοντος στροφείου. Η ζώνη ησυχίας με μείωση της SPL κατά τουλάχιστον 7 dB καταλαμβάνει μια περιοχή με όγκο διαστάσεων 35 cm x 10 cm x 30 cm. Επιπλέον στην περιοχή των αυτιών του επιβάτη η μείωση της SPL είναι περίπου 10 dB και το πλάτος των κύριων αρμονικών της BPF ( 48 Hz, 72 Hz, 96 Hz, 119 Hz) καταγράφει μείωση μεγαλύτερη των 10 dB με πιο αξιοσημείωτη την εξασθένιση των αρμονικών στα 72 Hz και 96 Hz που ξεπερνάει τα 20 dB. Με βάση τα παραπάνω το σύστημα δημιουργεί μια ζώνη ησυχίας επαρκή για ήπιες κινήσεις του κεφαλιού, στην οποία η εξασθένιση της συνολικής ακουστικής πίεσης αγγίζει και σε κάποια σημεία ξεπερνά τα 10 dB, γεγονός που το

καθιστά αποτελεσματικό για τη βελτίωση των ακουστικών συνθηκών γύρω από το προσκέφαλο του επιβάτη.

#### 4. Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικά κονδύλια μέσω του Horizon 2020 / Clean Sky JU, υπό την πρόσκληση ενδιαφέροντος H2020-CS2\_CFP10-2019-01 (Clean sky), με θέμα JTI-CS2-2019-CFP10-AIR-02-82, τύπο δράσης CS2-RIA και όνομα έργου PIANO: Path Identification for Active Noise Control ( αριθμός έργου: 885976).

#### 5. Αναφορές

- [1] I. Dimino, F. Aliabadi, Active Control of Aircraft Cabin Noise, Imperial College Press, London (2015).
- [2] G. Benardini, C. Testa, M. Gennaretti, “Tiltrotor cabin noise control through smart actuators”, *Journal of Vibration and Control*, **22**, pp 3-17 (2016).
- [3] A. D. Marano, T. Pollito, M. Guida, M. Barbarino, M. Belardo, A. Perazzolo, F. Marulo, “Tiltrotor Acoustic Data Acquisition and Analysis”, *Aerotecnica Missili and Spazio*, **100**, pp 111-122 (2021).
- [4] H. F. Olson, E. G. May, “Electronic sound absorber”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **25**, pp 1130–1136 (1953).
- [5] I. Dimino, C. Colangeli, J. Cuenca, P. Vitiello, M. Barbarino, “Active noise control for aircraft cabin seats”, *Applied Sciences*, **12**, (2022).
- [6] W. Jung, S.J. Elliot, J. Cheer, “Combining the remote microphone technique with head tracking for local active sound control”, *Journal of the Acoustical Society of America*, **142**, pp 298-307 (2017).
- [7] D. Moreau, B. Cazzolato, A. Zander, C. Petersen, “A review of virtual sensing algorithms for active noise control”, *Algorithms*, **1**, pp 69-99 (2008).
- [8] D. Mylonas, A. Erspamer, C. Yiakopoulos, I. Antoniadis, “An extrapolation-based virtual sensing technique of improving the control performance of the FxLMS algorithm in a maritime environment”, *Applied Acoustics*, **193**, (2022).
- [9] D.P. Das, G. Panda, “Active mitigation of Nonlinear Noise Processes using a novel filtered-s LMS Algorithm”, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, **12**, pp 313-322 (2004).

## **Χρήση εμπορικού λογισμικού προσομοίωσης ακουστικής για την μελέτη μείωσης θορύβου σε χώρο παραγωγής εργοστασίου**

Γαβριήλ Καμάρης  
GK Audio & Acoustics  
gpkamaris@gmail.com

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει να ζητά η αγορά μελέτες μείωσης θορύβου στο εργασιακό περιβάλλον. Η ανάγκη αυτή ξεκινάει είτε από ευαισθητοποίηση των ίδιων των εταιριών που θέλουν να προσφέρουν ένα ανταγωνιστικό εργασιακό περιβάλλον είτε γιατί κάποιος κανονισμός το επιβάλλει [1,2]. Στην Ελλάδα παρά το ότι οι έλεγχοι πραγματοποιούνται σε μικρό βαθμό, η νομοθεσία έχει θεσπιστεί βασιζόμενη στις οδηγίες της ΕΕ [3]. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η διαδικασία μελέτης μείωσης θορύβου σε γραμμή παραγωγής εργοστασίου. Η μελέτη ξεκινάει από την μέτρηση της Στάθμης Ηχητικής Πίεσης (Σ.Η.Π.). Ακολουθεί η ανάπτυξη του μοντέλου, ο έλεγχος συμβατότητας του μοντέλου με τις μετρήσεις και η διερεύνηση των πιθανών λύσεων. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά αισιόδοξα και είναι εμφανής η σημαντικότητα της ορθότητας ανάπτυξης του μοντέλου και ο βοηθητικός ρόλος που μπορεί αυτό να έχει στην διεξαγωγή αντίστοιχων μελετών. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης και η προτεινόμενη λύση, όπου φαίνεται να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά αποτελέσματα.

### ***Use of commercial acoustics simulation software for studying noise reduction in industrial working environment***

#### **ABSTRACT**

*In later years, the awareness on noise reduction in working places is rising. There are rules and laws from the government [1,2] or, in the best cases, the employer is willing to provide a better working place for the employees. In Greece there are laws derived from EU recommendations [3]. In this paper, a case study in a production line of a factory is discussed. The measurements, the model development and the study of the solution are described. The utilization of commercially available acoustics simulation software [4] and the way it can support the study is highlighted. Details on the model setup and the simulations are discussed. Finally, the results look promising and are presented along with the proposed solution.*

## Εισαγωγή

Ο θόρυβος στο εργασιακό περιβάλλον είναι ένα από τα ζητήματα που έχει εντοπίσει η κοινότητα εδώ και πολλές δεκαετίες [1] και η πολιτεία έχει επίσης θεσπίσει τους αντίστοιχους νόμους [2]. Ωστόσο παρά τις προειδοποιήσεις, τις συστάσεις και τη νομοθεσία, ακόμα υπάρχουν χώρες και χώροι όπου ο θόρυβος στον οποίο εκτίθενται οι εργαζόμενοι πολλές φορές αναπόφευκτα ξεπερνάει τα όρια και γίνεται επικίνδυνος [5].

Θα μπορούσαμε να χωρίσουμε τον θόρυβο στο εργασιακό περιβάλλον σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τον θόρυβο που παράγεται μέσα στον ίδιο τον χώρο εργασίας και στον θόρυβο που εισέρχεται στον χώρο εργασίας από εξωτερική περιβαλλοντική δραστηριότητα. Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με την πρώτη κατηγορία και μάλιστα σε ένα περιβάλλον όπου είναι εγκατεστημένη η γραμμής παραγωγής εργοστασίου. Να αναφερθεί ότι οι συνθήκες και τα ζητούμενα μιας μελέτης θορύβου σε γραφεία είναι αρκετά διαφορετικά αν και οι διάφορες ποιοτικές παράμετροι που εξετάζονται έχουν την ίδια θεωρητική βάση [6,7].

Στην περίπτωση αυτή η νομοθεσία του ελληνικού κράτους [2] ακολουθεί οδηγίες της ΕΕ [3] και τα όρια έκθεσης των εργαζομένων, ορίζονται όπως φαίνονται στον Πίνακα 0.1.

Πίνακας 0.1 Τα όρια έκθεσης των εργαζομένων σε υψηλές στάθμες ηχητικής πίεσης, όπως ορίζονται από την νομοθεσία [6].

	$L_{EX,8H}$ (dBA)	$L_{peak}$ (dBC)
Οριακές τιμές έκθεσης	87	140
Ανώτερες τιμές για ανάληψη δράσης	85	137
Κατώτερες τιμές για ανάληψη δράσης	80	135

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία αποτύπωσης και μελέτης για την μείωση του ακουστικού θορύβου στον χώρο που στεγάζεται η γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου. Στον χώρο αυτό υπάρχουν εγκατεστημένες 11 μηχανές τύπου πρέσας. Οι κύριες πηγές θορύβου είναι τα πνευματικά συστήματα πίεσης και η ροή του υλικού στους μεταλλικούς αγωγούς παροχής. Υπάρχουν επίσης κρουστικοί θόρυβοι οι οποίοι δεν είναι συνεχόμενοι και προέρχονται από την δόνηση παλέτας η οποία φέρει δοχείο με το τελικό προϊόν. Ο όγκος της αίθουσας υπολογίζεται στα 15.300 m<sup>3</sup> και η τοιχοποιία του είναι κατασκευασμένη από πάνελ πολυουρεθάνης, το δε πάτωμα είναι βαμμένο βιομηχανικό τσιμέντο.

### 1. Μετρήσεις Στάθμης Ηχητικής Πίεσης

Σύμφωνα με την νομοθεσία [2] και τις οδηγίες [6] η παράμετρος η οποία πρέπει να αποτυπωθεί είναι η ισοδύναμη στάθμη έκθεσης του εργαζόμενου ανά οκτάωρη εργασία ( $L_{EX,8H}$ ) ή σε εβδομαδιαία βάση ανάλογα με την φύση της θέσης εργασίας. Η στάθμη αυτή μπορεί να αποτυπωθεί είτε με ειδική συσκευή μέτρησης, δοσίμετρο, την

οποία φέρει ο εργαζόμενος κατά την διάρκεια της διερεύνησης είτε με την χρήση ηχομέτρου με την δυνατότητα μέτρησης ισοδύναμης ηχητικής στάθμης (*Leq (dBA)*) και αναγωγή στο ωράριο εργασίας με χρονικό συντελεστή βάρους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο ηχομέτρου και ένα παράδειγμα των υπολογισμών φαίνεται στο Σχήμα 1.1 Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το NTi Audio XL2 με το μικρόφωνο M2230 που ολοκληρώνουν ένα όργανο Class A [8].

**NTi**  
AUDIO

**Daily Noise Exposure Level Post Processing Form** v1.01  
Calculates the noise exposure level  $LEX_{8h}$  at steady noise with stepwise level variations

1. Measure the  $LA_{eq}$  at the different sound levels  
2. Enter the  $LA_{eq}$  results and the corresponding exposure time in the table below.

Nr.	Description	Exposure Time [hours]	Level $LA_{eq}$ [dB]
1	1a	7.00	88.6
2	1b	0.25	90.2
3	1c	0.25	89.6
4	break	0.50	50.0
5			
6			
7			
8			
9			
10			
		Sum Exposure Time [hours]	$LEX_{8h}$
		8.00	88.4

Σχήμα 1.2 Παράδειγμα φύλλου υπολογισμού της ημερήσιας έκθεσης εργαζομένου.

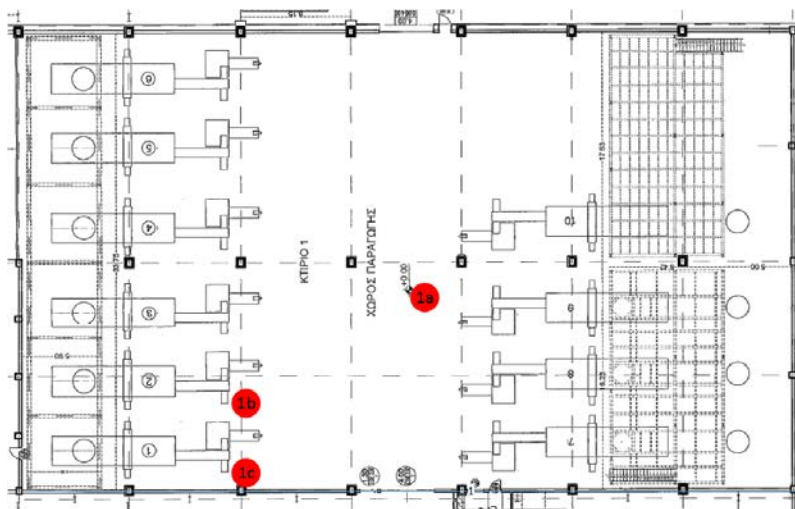
### 1.1 Μετρήσεις έκθεσης εργαζομένων

Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις στον χώρο έγινε συζήτηση με τους εργαζόμενους και τους υπεύθυνους για τις διάφορες ειδικότητες των εργαζομένων που κινούνται στον προς διερεύνηση χώρο, την φύση της εργασίας και το χρονοδιάγραμμα κίνησης της κάθε ειδικότητας κατά την διάρκεια του ωραρίου τους. Από την συζήτηση αυτή προέκυψε ότι, στον χώρο παραγωγής κινούνται 3 με 5 υπάλληλοι ανά βάρδια. Στην πρωινή βάρδια υπάρχει ομάδα «συντηρητών» που επίσης αλλάζει τα καλούπια συνήθως σε 2-3 μηχανές οι οποίες δεν λειτουργούν για περίπου 5 ώρες. Κατά την διάρκεια της μέτρησης βρίσκονταν σε λειτουργία οι 8 από τις 10 μηχανές και η κατάσταση αυτή θεωρείται οριακή κατώτατη.

Οι εργαζόμενοι βρίσκονται στον χώρο παραγωγής καθ' όλη τη διάρκεια της βάρδιας τους και πλησιάζουν στις μηχανές μόνο για την αλλαγή του κάδου. Η διαδικασία αλλαγής διαρκεί περίπου 1 λεπτό και συμβαίνει σε κάθε ολοκλήρωση του κύκλου πλήρωσης του κάδου που διαρκεί περίπου 35 λεπτά. Οι εργαζόμενοι επίσης κάνουν διάλειμμα συνολικής διάρκειας όχι μεγαλύτερης των 30 λεπτών.

Οι «συντηρητές» βρίσκονται κοντά στις μηχανές παραγωγής για περίπου 4 ώρες μόνο κατά την πρωινή βάρδια και για να αλλάξουν την γραμμή παραγωγής (καλούπια) ή να κάνουν συντήρηση στις μηχανές. Οι ίδιοι μπορεί να βρεθούν στον χώρο του

μηχανουργείου για μηχανουργικές εργασίες όπως και να επιβλέπουν και ελέγχουν την λειτουργία του υπόλοιπου μηχανολογικού εξοπλισμού και στις αίθουσες αεροσυμπιεστών. Στην εικόνα 1.1 φαίνονται ενδεικτικές θέσεις κίνησης των εργαζομένων. Στο κέντρο της αίθουσας (Σχήμα 1.2, θέση 1a) υπάρχει εγκατεστημένος υπολογιστής χειρισμού και ελέγχου όπου κινούνται οι εργαζόμενοι. Οι μετρήσεις μαζί με τα σενάρια εισάγονται σε ειδικό πίνακα υπολογισμού και εργάζεται η ισοδύναμη ηχητική στάθμη έκθεσης για κάθε εργαζόμενο.



Σχήμα 1.2 Διαμόρφωση σελίδας

Πίνακας 1.1 Οι μετρήσεις έκθεσης των εργαζομένων.

Θέση	$L_{EX,8H}$ (dBA)	$L_{peak}$ (dBC)	Διάρκεια (min)
1a	88.6	113.5	20
1b	90.2	122.4	23
1c	89.6	117.9	35

Πίνακας 1.2 Τα όρια έκθεσης των εργαζομένων σε υψηλές στάθμες ηχητικής πίεσης, όπως ορίζονται από την νομοθεσία [6].

Ρόλος εργαζόμενου	$L_{EX,8H}$ (dBA)
Υπάλληλος στο χώρο παραγωγής	88.4
Μηχανικοί συντήρησης	88.3

### 1.2 Μετρήσεις στάθμης ηχητικής πίεσης στον χώρο

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές μετρήσεις σε τέσσερις θέσεις στον χώρο όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Η ομοιομορφία των επιφανειών και η μικρή απόκλιση της



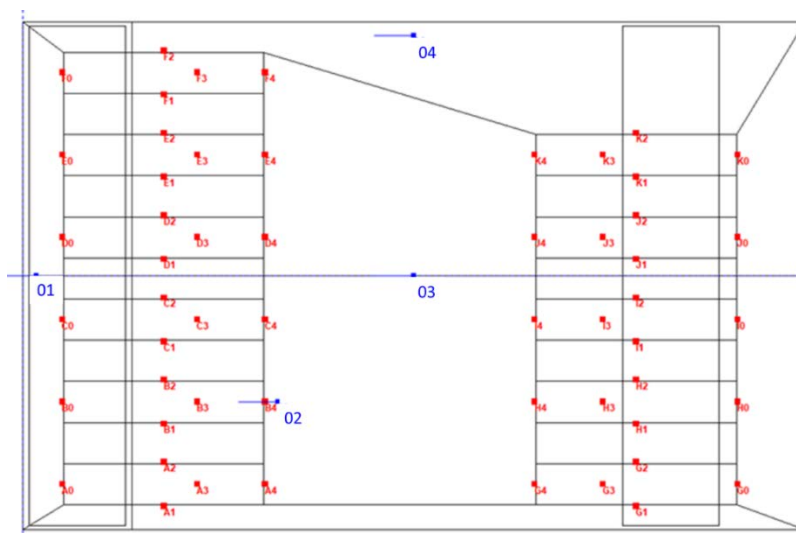
απορρόφησης των τοίχων και της οροφής σε σχέση με το δάπεδο μας επιτρέπουν να θεωρήσουμε ένα διάχυτο ηχητικό πεδίο (diffused sound field) για την διερεύνηση του οποίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την θεωρία της στατιστικής ακουστικής [10] και τις αρχές που την διέπουν. Επίσης στον Η/Υ με την χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic v9.1f [4] αναπτύσσουμε μοντέλο του χώρου για την διερεύνηση πιθανών λύσεων μείωσης της στάθμης του θορύβου.

Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται οι θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αυτές πάνω στην κάτοψη του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

### 1.3 Μετρήσεις για την ανάπτυξη μοντέλου της ηχητικής πηγής.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου απαιτείται ο ορισμός της ηχητικής πηγής. Στον υπό εξέταση χώρο, οι κύριες ηχητικές πηγές είναι οι μηχανές οι οποίες είναι όγκοι διαστάσεων  $W \times L \times H = 3 \times 14.6 \times 3 \text{ m}$ . Για τον ορισμό τους σαν ηχητικές πηγές πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 3 μηχανές εν λειτουργία και σε 7 θέσεις περιμετρικά και πάνω από τις μηχανές. Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται το φάσμα του μέσου όρου της ισοδύναμης στάθμης που μετρήθηκε στις 7 θέσεις.

Παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές η στάθμη και το φάσμα είναι ομοιόμορφα στις μεσαίες και χαμηλές συχνότητες, ενώ για συχνότητες πάνω από 4kHz έχουμε απόκλιση. Επίσης στην πάνω πλευρά της μηχανής υπάρχουν κάποιες διακριτές συχνότητες οι οποίες παρουσιάζουν υψηλότερη στάθμη.

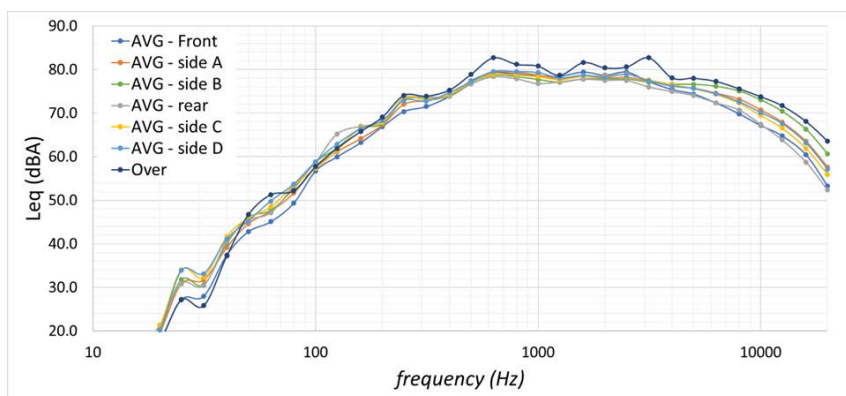


Σχήμα 1.3 Διαμόρφωση σελίδας

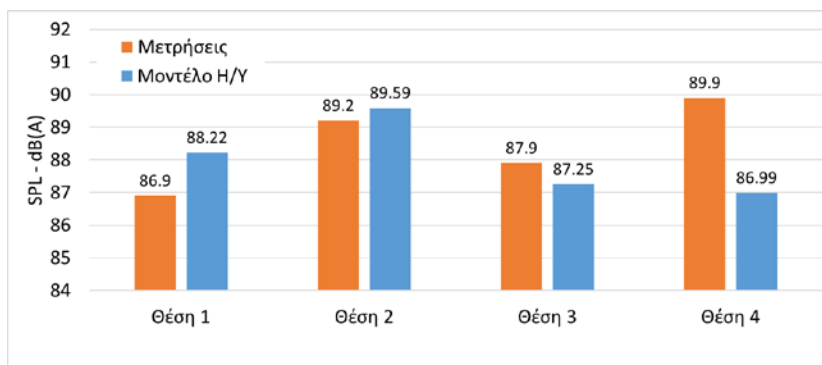
## 2. Το μοντέλο στον Η/Υ

Για την διερεύνηση των πιθανών λύσεων μείωσης της στάθμης ακουστικής πίεσης, αναπτύχθηκε μοντέλο του χώρου με την χρήση του εμπορικού λογισμικού CATT-Acoustic v9.1f. Η γεωμετρία του χώρου αναπτύχθηκε με οδηγώ σχέδια του χώρου και

επί τόπου μετρήσεις επαλήθευσης. Οι ηχητικές πηγές του χώρου μοντελοποιήθηκαν με την βοήθεια των μετρήσεων και κάθε μηχανή αποτελείται από τον όγκο της και 6 σημειακές παντοκατευθυντικές πηγές περιμετρικά της (Σχήμα 2.2 κόκκινες τελείες). Επίσης στον χώρο οι δέκτες τοποθετήθηκαν στις αντίστοιχες θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ώστε να γίνει έλεγχος της ορθότητας και συμβατότητας του μοντέλου με την πραγματικότητα. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ο χρόνος αντήχησης που έχει υπολογιστεί από το λογισμικό και στο Σχήμα 1.5 φαίνεται η ισοδύναμη ηχητική στάθμη που υπολογίστηκε από το λογισμικό σε σχέση με τις μετρήσεις.



Σχήμα 1.4 Μέσο φάσμα μεταξύ των 3 μηχανών που μετρήθηκαν για τις διάφορες θέσεις μέτρησης γύρω από αυτές.

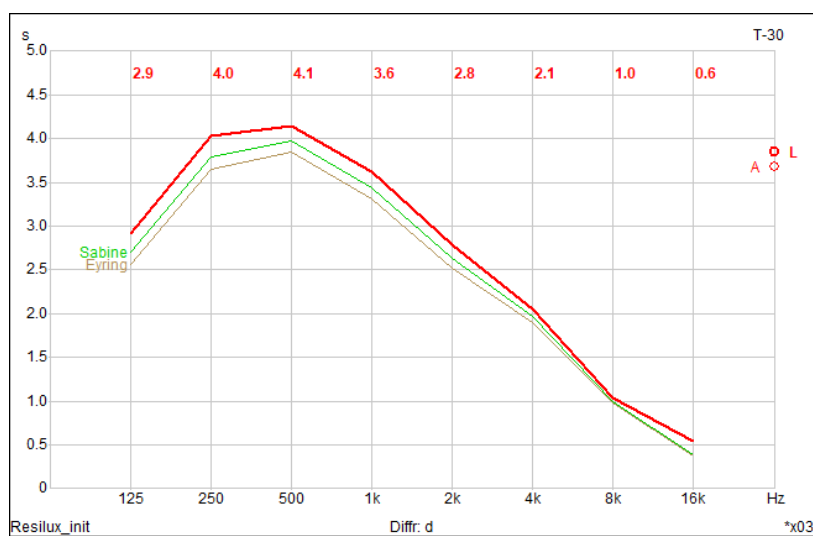


Σχήμα 1.5 Τιμές της ΣΗΠ μεταξύ των μετρήσεων και του μοντέλου στον Υ/Η.

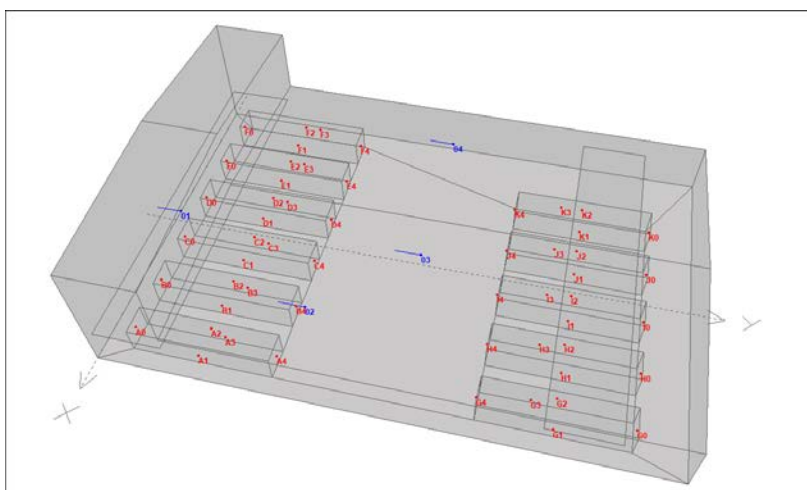
Φαίνεται ότι στην αρχική του κατάσταση το μοντέλο με τις μετρήσεις παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση για θέσεις κοντά στις πηγές και κοντά στο κέντρο του χώρου (θέσεις 2 και 3) ενώ σε θέσεις πίσω από τις μηχανές (θέση 1) και στην απομακρυσμένη θέση 4 η απόκλιση είναι 1.3 και 3 dB αντίστοιχα, μία απόκλιση η οποία θεωρείται φυσιολογική και είναι αποδεκτή για να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για περαιτέρω διερεύνηση. Επίσης τα αποτελέσματα εκφράζονται με τον δείκτη IL

(Insertion Loss) που είναι διαφορικός δείκτης και ουσιαστικά δεν επηρεάζεται από τις απόλυτες τιμές τις ΣΗΠ.

Τα σενάρια που υλοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη αφορούν διαφορετικές επικαλύψεις του χώρου με ηχοαπορροφητικό υλικό αλλά και διαφορετικές ρυθμίσεις κατά την προσομοίωση της ακουστικής του χώρου. Οι διαφορετικές ρυθμίσεις είναι μια τακτική ελέγχου του μοντέλου και τα διαφορετικά σενάρια που εξετάστηκαν αποτελούν τις διαφορετικές λύσεις που προτείνονται για την μείωση του θορύβου. Αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα των αποτελεσμάτων.



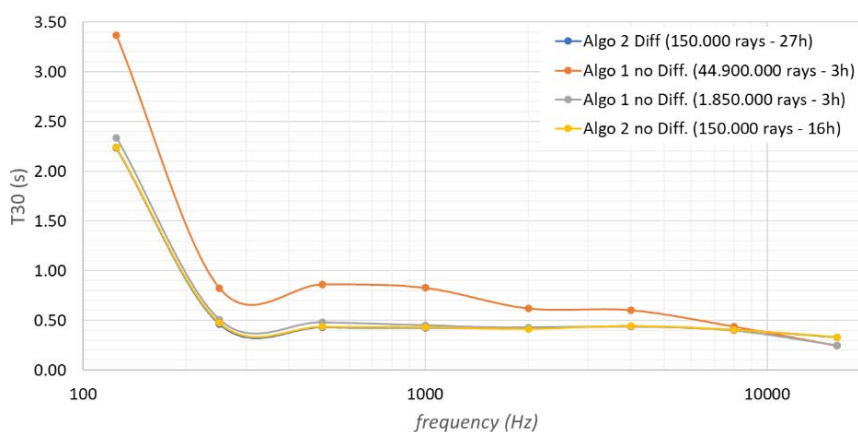
Σχήμα 2.1 Διαμόρφωση σελίδας



Σχήμα 2.2 Διαμόρφωση σελίδας

### 3. Αποτελέσματα σχόλια

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η διαφορά του χρόνου αντήχησης που υπολογίστηκε από το λογισμικό για τις διάφορες ρυθμίσεις. Η κάθε καμπύλη αποτελεί τον μέσο όρο για τις 4 θέσεις υπολογισμού στο μοντέλο. Ενδιαφέρον έχει η διαφορά στον προτεινόμενο πλήθος ακτινών για την διεξαγωγή της προσομοίωσης όπως και ο χρόνος εκτέλεσης. Η μελέτη βασίστηκε στον «Αλγόριθμο 2» και στην χρήση διάθλασης και περίθλασης κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι ο «Αλγόριθμος 1» με 44 εκατομμύρια ακτίνες δεν έχει δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι υπόλοιπες περιπτώσεις συγκλίνουν. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω του διάχυτου πεδίου δεν αναμένονται πολλές διαφορές στους διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού και αυτό επιβεβαιώνεται.



Σχήμα 3.2 Διαμόρφωση σελίδας

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ο δείκτης IL για τα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν ως πιθανές λύσεις. Αυτά συνοψίζονται στην προσθήκη ηχοαπορροφητικού υλικού στις διαθέσιμες επιφάνειες του χώρου. Επίσης εξετάστηκε η πιθανότητα οφέλους χρήσης κάθετων ηχοαπορροφητικών πάνελ αναρτημένων από την οροφή του κτιρίου. Όπως φαίνεται οι πιο αποδοτικές λύσεις καλύπτουν με Η/Α υλικό όλες τις διαθέσιμες επιφάνειες. Επίσης η χρήση κάθετων πάνελ δεν ωφελεί όσο η πλήρης κάλυψη της οροφής.

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το IL σε κάθε θέση με ένδειξη σε πράσινο φόντο για την επίτευξη ικανοποιητικής στάθμης ή όχι. Όπως φαίνεται επίσης οι λύσεις που πετυχαίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτές με συνδυασμό κάλυψης με Η/Α υλικό σε τοίχους και οροφή. Στην θέση 2 παρατηρούμε ότι καμία λύση δεν μπορεί να πετύχει αποδεκτή στάθμη. Αυτό συμβαίνει γιατί η θέση αυτή βρίσκεται μπροστά από την μηχανή και υπερισχύει ο απευθείας ήχος. Η πρόταση προς τον πελάτη για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση πλωτών ηχοπετασμάτων. Ωστόσο για λόγους λειτουργικότητας του χώρου η λύση αυτή δεν είναι εύκολα αποδεκτή.

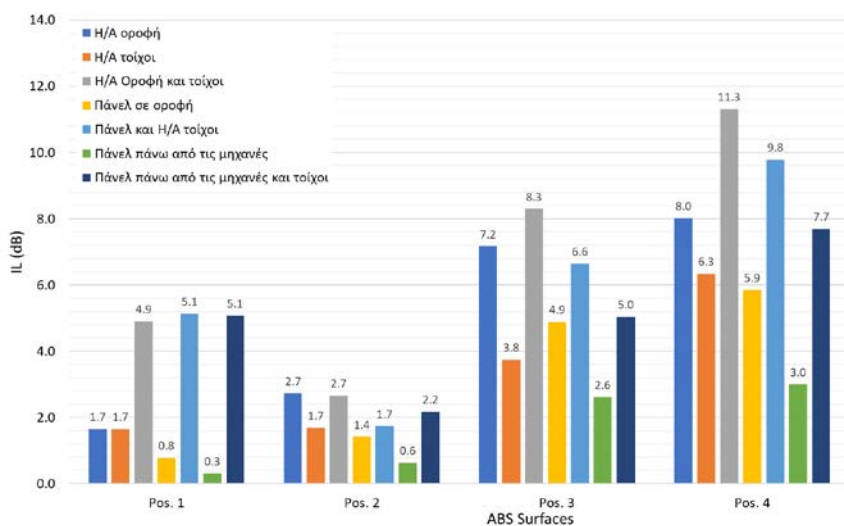
Κατά την διερεύνηση υπολογίστηκες επίσης η αναμενόμενη ΣΗΠ με χρήση μαθηματικών μοντέλων από την στατιστική ακουστική [10]. Τα Αποτελέσματα που λαμβάνουμε για την περίπτωση δείχνουν βελτίωση 2 dB για την περίπτωση χρήσης

H/A υλικού στους τοίχους και 2.23 dB μείωση για την περίπτωση χρήσης H/A υλικού σε τοίχους και οροφή.

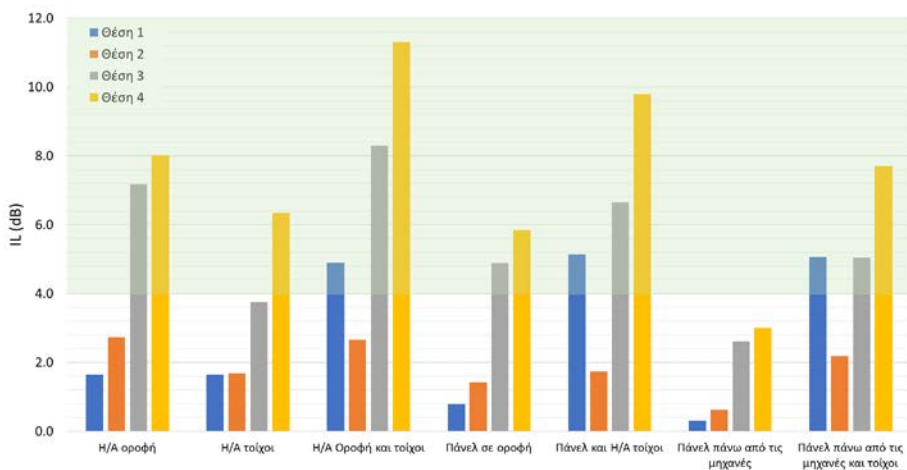
$$SPL = SWL + 10 \text{Log} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) dB \quad (3.1)$$

$$R = \frac{s\bar{a}}{1-\bar{a}} \quad (3.2)$$

Όπου SWL η ακουστική ενέργεια της πηγής η οποία προσδιορίζεται άμεσα από τις μετρήσεις, Q ο δείκτης εκπομπής της πηγής, εδώ θεωρείται 2 [10] για πηγή κοντά σε μία μόνο επιφάνεια, αυτή του πατώματος και R η σταθερά του δωματίου (τύπος 3.2), που είναι και ο παράγοντας ο οποίος θα μεταβληθεί για να μας δώσει την διαφορά ακουστικής πίεσης.



Σχήμα 3.2 Διαμόρφωση σελίδας



Σχήμα 3.3 Διαμόρφωση σελίδας

#### 4. Αναφορές

- [1] Cohen, A., “The influence of a company hearing conservation program on extra-auditory problems in workers,” J. Safety Res. 8(4), 146–162. (1976).
- [2] Π.Δ. 149/2006 – Ελάχιστες προδιαγραφές υγείας και ασφάλειας; Όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (θόρυβος) σε εναρμόνιση με την οδηγία 2003/10/EK.
- [3] Οδηγία 89/391/EOK – πρόσβαση <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/10/oj/ell>
- [4] CATT-Acoustic v9.1f ([www.catt.se](http://www.catt.se))
- [5] Elke Schneider et. Al, “Noise in figures”, European Agency for Safety and Health at Work, 2005
- [6] ISO 1996-2:2017 Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 2: Determination of sound pressure levels
- [7] B.I.Dalenbaek, “ DLf and DL2 (D2,S) Application Notes (v3)”, [http://www.catt.se/DLf\\_and\\_DL2\\_Application\\_notes.pdf](http://www.catt.se/DLf_and_DL2_Application_notes.pdf) (πρόσβαση 15/09/2022)
- [8] <https://www.nti-audio.com/en/products/sound-level-meters/xl2-audio-acoustic-analyzer> (πρόσβαση 15/09/2022)
- [9] M. Hodgson, “When is diffuse-field theory accurate?” in Proc. WallaceClement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, MA, 1994, pp. 157–160.
- [10] Noise Control in Industry, Third Edition 3rd Edition, by Sound Research Laboratories. ISBN-13: 978-0419171706

## Εστίαση του ήχου σε αντηχητικό δονητικό-ακουστικό περιβάλλον με χρήση της χρονικής αντιστρεψιμότητας

Σπύρος Κουζούπης  
skouzo@hmu.gr

Χρήστος Παναγιωτόπουλος  
pchr@hmu.gr

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ρέθυμνο 74133, Κρήτη.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία της χρονικής αντιστρεψιμότητας έχει δύο στάδια, το ευθύ και το ανάστροφο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εστίαση του ήχου που προέρχεται από μία ή περισσότερες απομακρυσμένες πηγές. Έχει τύχει εφαρμογής στις περιοχές της υποβρύχιας ακουστικής, της βιοιατρικής και σε άλλες. Η παρούσα εργασία καταπιάνεται με την αριθμητική εφαρμογή της διαδικασίας της χρονικής αντιστρεψιμότητας σε ένα δονητικό-ακουστικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό μελετάμε ένα δισδιάστατο αντηχητικό μέσο σε συνλειτουργία με πεπερασμένο αριθμό στοιχείων δοκού. Παρόλο που το θέμα της χρονικής αντιστρεψιμότητας σε ένα αντηχητικό περιβάλλον έχει διερευνηθεί στο παρελθόν, η παρούσα εργασία συμπεριλαμβάνει και την αλληλεπίδραση με ελαστικά σώματα τα οποία βρίσκονται εντός του ακουστικού μέσου, στοιχείο το οποίο αποτελεί και την καινοτομία της εργασίας αυτής. Στα αριθμητικά πειράματα που παρουσιάζονται το ελαστοακουστικό μέσο διεγείρεται με τον κατάλληλο κρουστικό παλμό ενώ τα κύματα καταγράφονται σε σημεία τα οποία βρίσκονται εντός του χωρίου διάδοσης, στα σύνορα του χωρίου και επάνω στα ελαστικά σώματα. Υπάρχει πεπερασμένος αριθμός καταγραφών και η διάρκεια της προσομοίωσης είναι μεταβαλλόμενη. Τα πειράματα γίνονται σε ελαστικό μέσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στο ανάστροφο στάδιο τα σήματα αντιστρέφονται και εκπέμπονται στο ελαστοακουστικό μέσο, δημιουργώντας σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή μία ισχυρά εστιασμένη εικονική πηγή. Χρησιμοποιώντας διάφορους δείκτες θα αξιολογηθεί η ποιότητα της εστίασης, ανάλογα με το πόσα και ποια σήματα χρησιμοποιούνται στο ανάστροφο στάδιο, συγκρίνοντας για παράδειγμα το πρωτεύον μέγιστο της ακουστικής πίεσης κατά την χρονική στιγμή της μέγιστης εστίασης με το δευτερεύον μέγιστο. Αποδεικνύεται ότι η παρουσία ελαστικών σωμάτων βελτιώνει τους δείκτες εστίασης όπως προκύπτει από συγκρίσεις όταν στο χωρίο υπάρχουν ελαστικοί δοκοί με την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν. Θα συζητηθούν και πιθανές εφαρμογές των ευρημάτων.

## Sound focusing in a reverberant vibro-acoustic environment using time reversal

### ABSTRACT

*The process of time reversal has the forward and the backward stage and can be used to focus sound coming from one or more distant sources. The method has been applied to the areas of underwater acoustics, biomedicine and a few other. The present work deals with the numerical implementation of the time-reversibility process in a vibro-acoustic environment. We study a two-dimensional resonant medium in conjunction with a finite number of beam elements. Although the topic of time reversibility in a reverberant environment has been investigated in the past, the present work also includes the interaction with elastic bodies that are inside the acoustic medium, an element that constitutes the innovation of this work. In the numerical experiments presented, the elastoacoustic medium is excited with the appropriate shock pulse while the waves are recorded at points located within the domain of propagation, at the boundaries of the domain and on the elastic bodies. There is a finite number of recorders and the duration of the simulation is variable, while the finite element method is used for the experiments. In the backward stage the signals are inverted and emitted into the elastoacoustic medium, creating at a specific time a strongly focused virtual source. Using various indicators the quality of the focus will be assessed, depending on which and how many signals are used in the backward stage, by comparing for example the primary maximum of the sound pressure at the time of the maximum focus with the secondary maximum. By comparing two scenarios when there are elastic beams in the domain with the case where they are not, it is shown that the presence of elastic bodies improves the focusing indices. Possible applications of the findings will also be discussed.*

### Εισαγωγή

Η διαδικασία της χρονικής αντιστρεψιμότητας εισήχθη πριν από καιρό στην επιστημονική κοινότητα ως μια φυσική διαδικασία που συγκεντρώνει εκ νέου τα κύματα πίσω στην αρχική πηγή που τα δημιούργησε [1]. Από τότε η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί ως υπολογιστικό εργαλείο για την επίλυση αντίστροφων προβλημάτων κυματικής διάδοσης. Το ένα ή και τα δύο στάδια της μεθόδου, που αναφέρθηκαν στην περίληψη, μπορούν να υλοποιηθούν αριθμητικά. Εδώ μας ενδιαφέρει το πρόβλημα της τοποθέτησης της εστίας της ενέργειας στο χώρο, για το οποίο το ζητούμενο είναι το αντίστροφο στάδιο να γίνει πειραματικά αν και εδώ πραγματοποιείται αριθμητικά. Πρόσφατα έχουν γίνει μελέτες [5,6] που ποσοτικοποιούν με διάφορους δείκτες την εστίαση της ενέργειας μέσα σε ένα φραγμένο χώρο, εξετάζοντας και το ρόλο των θέσεων των αισθητήρων, αλλά και τεχνικές για την αναγνώριση σχεδαστών στο χώρο. Σε αυτή την εργασία εξετάζουμε την εστίαση του ήχου μέσω της χρονικής αντιστρεψιμότητας σε ένα αντηχητικό περιβάλλον, όταν μέσα σε αυτό υπάρχουν κατασκευές που αλληλοεπιδρούν δονητικά με το ακουστικό μέσο.



## 1 Εξισώσεις που διέπουν τη σύζευξη του ακουστικού με το δονητικό μέσο

Συμβολίζουμε το χωρίο που καταλαμβάνει ένα δομικό στοιχείο με  $\Omega_s$ , την μετατόπιση του με  $u^s$ , ενώ οι ταυιστές της παραμόρφωσης και της τάσης είναι  $\varepsilon(u^s)$  και  $\sigma(u^s)$ , αντίστοιχα. Η εξίσωση κίνησης για στερεό το οποίο κρατιέται ακίνητο σε ένα μέρος  $\Gamma_u$  του συνόρου και δέχεται δύναμη ανά επιφάνεια  $F^d$  στο υπόλοιπο μέρος του συνόρου  $\Gamma_t$ , γράφεται,

$$\operatorname{div} \sigma(u^s) - \rho_s \frac{\partial^2 u^s}{\partial t^2} = f \text{ στο } \Omega_s, \quad (1\alpha')$$

$$u^s = 0 \quad \text{στο } \Gamma_u, \quad (1\beta')$$

$$\sigma(u^s)n^s = F^d \quad \text{στο } \Gamma_t, \quad (1\gamma')$$

όπου οι αρχικές συνθήκες είναι μηδενικές. Το ακουστικό μέσο είναι συμπιεστό και δεν υποστηρίζει διατμητικές δυνάμεις, οπότε η εξίσωση κίνησης με βάση την ακουστική πίεση  $p$  γράφεται,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_f^2 \nabla^2 p = c_f^2 \frac{\partial q_f}{\partial t} \text{ στο } \Omega_f, \quad (2\alpha')$$

$$p = \tilde{p} \quad \text{στο } \Gamma_p, \quad (2\beta')$$

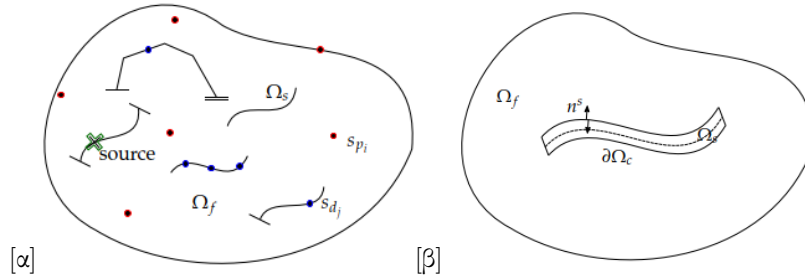
$$\nabla p n^f = 0 \quad \text{στο } \Gamma_v, \quad (2\gamma')$$

όπου  $c_f$  είναι η ταχύτητα του ήχου στο ακουστικό μέσο και  $q_f$  το επιπρόσθετο φορτίο ανά μονάδα όγκου, ενώ το ρευστό θεωρείται ότι βρίσκεται σε ηρεμία. Θεωρώντας το μέρος του συνόρου όπου το στερεό εφάπτεται με το ρευστό ως  $\partial\Omega_c$  και ότι τα σωματίδια του ρευστού κινούνται μαζί με το στερεό κάθετα στο  $\partial\Omega_c$ , με το μοναδιαίο διάνυσμα προς την εξωτερική πλευρά του ρευστού να είναι  $n^f$  και με το μοναδιαίο διάνυσμα προς την εξωτερική πλευρά του στερεού να είναι  $n^s$ , τότε στο κοινό τους μέρος, ισχύει  $n^f = -n^s$ . Η συνέχεια της ακουστικής πίεσης επιβάλλει:

$$\sigma(u^s)n^s = -p. \quad (3)$$

Ακολουθήθηκε η επιλογή της Neumann-Neumann σύζευξης για τις εξισώσεις, όπου η (3) υλοποιεί την (1γ'), [2]. Με χρήση της εξίσωσης του Euler και επειδή οι μετατοπίσεις είναι ίδιες στο κοινό σύνορο ρευστού-στερεού προκύπτει η εξίσωση:  $\nabla p n = -\rho_f \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} n$ . Χωρίς να πλήττεται η γενικότητα της μεθόδου, θεωρούμε εδώ ότι τα στερεά σώματα είναι ράβδοι τα οποία βρίσκονται μέσα σε ένα δισδιάστατο ακουστικό πεδίο, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1β.

Τα παραπάνω έχουν υλοποιηθεί με χρήση του SDE που είναι ένα περιβάλλον βασισμένο σε Java με δυνατότητες αριθμητικών υπολογισμών [3]. Έγινε και περαιτέρω επαλήθευση των αποτελεσμάτων συγκρίνοντάς τα με αυτά που προήλθαν μέσω του προγράμματος COMSOL [4], δίνοντας πολύ καλή συμφωνία. Θα πρέπει να αναφέρουμε, ότι στην εφαρμογή μας έχουμε υιοθετήσει την υπόθεση της συνέχειας πίεσης πάνω στην ευθεία της δοκού, η οποία είναι μια λογική υπόθεση για τα προβλήματα αυτού του είδους αν και δεν είναι κατάλληλη για την μελέτη προβλημάτων όπου παρουσιάζονται άλματα στην ακουστική πίεση. Χρησιμοποιώντας



Σχήμα 1.1 (α) Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής ακουστο-δονητικής χρονικής αντιστρεψιμότητας. Οι κόκκινες και μπλέ τελείες παριστάνουν αισθητήρες ακουστικής πίεσης και μετακίνησης, αντίστοιχα. (β) Η ράβδος ως ένα στοιχείο δύο κόμβων μέσα στο ρευστό.

πεπερασμένα στοιχεία για το δονητικό σύστημα η διακριτικοποιημένη εξίσωση κίνησης για το συζευγμένο σύστημα σε μορφή μήτρας, φαίνεται στις εξισώσεις,

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_f c_f^2 H^T & M_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{d} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -H \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_s \\ f_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

όπου  $M_s$  και  $K_s$  αντιπροσωπεύουν τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας για τα δομικά στοιχεία και  $M_f$  και  $K_f$  για το ρευστό, αντίστοιχα. Οι βαθμοί ελευθερίας που υποδηλώνονται με  $d$  αναφέρονται σε κινηματικές μεταβλητές (δηλαδή μετακινήσεις και στροφές), ενώ το  $p$  αντιπροσωπεύει την ακουστική πίεση με τα  $f_s, f_f$  να είναι δυνάμεις διέγερσης στο δομικό και ακουστικό πεδίο, αντίστοιχα. Το μητρώο  $H$  περιέχει στην πραγματικότητα τους συντελεστές σύζευξης. Εάν θέλουμε να εισάγουμε αποσβέσεις αυτό θα μπορούσε να γίνει μέσω του μοντέλου απόσβεσης Rayleigh, για παράδειγμα.

## 2 Υπολογιστική ακουστο-δονητική χρονική αντιστρεψιμότητα

Στην υπολογιστική χρονική αντιστρεψιμότητα, υποτίθεται ότι τουλάχιστον ένα από τα δύο βήματα (ευθύ ή αντίστροφο), εκτελείται αριθμητικά χρησιμοποιώντας κάποια κατάλληλη μέθοδο, π.χ. την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), όπως γίνεται σε αυτή την εργασία. Εδώ χρησιμοποιούμε την συμβατική FEM, η οποία είναι πολύ συνηθισμένη για την επίλυση προβλημάτων δομικής δυναμικής. Παρουσιάζουμε αριθμητικά πειράματα μέσω των οποίων λαμβάνουμε δεδομένα κατά το ευθύ στάδιο του προβλήματος, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επανεστίαση κατά το αντίστροφο στάδιο. Η μεθοδολογία θα μπορούσε να περιγραφεί σύμφωνα με τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1α. Θεωρούμε ένα συζευγμένο δονητικό ακουστικό σύστημα, το οποίο αναπαρίσταται εδώ από ένα ακουστικό πεδίο που ενσωματώνει έναν αριθμό δοκών. Σε αυτή την εργασία μας ενδιαφέρει πρωτίστως με ποιό τρόπο, αλλά και από ποιές και πόσες πηγές (σημεία) μπορούμε να στέλνουμε σήματα για να εστιάσουμε σε ένα επιθυμητό σημείο. Στο ευθύ στάδιο υποθέτουμε ότι μια πηγή (ακουστική ή μηχανική) δρα σε κάποιο σημείο  $x_s$  και ότι η απόκριση  $u_r(t)$  καταγράφεται σε ένα ή περισσότερα σημεία  $x_r$ .

για μια χρονική διάρκεια  $T$ . Είναι εφικτό να καταγράφονται σήματα ακουστικής πίεσης αλλά και κινηματικά σήματα. Στο αντίστροφο στάδιο το χρονικά αντεστραμμένο σήμα της απόκρισης  $u_r(T-t)$  εκπέμπεται εκ νέου ως διέγερση από το αντίστοιχο σημείο  $x_r$ , οπότε μια ενεργειακή επανεστίαση θα εμφανιστεί στο σημείο  $x_s$  μετά από χρονική διάρκεια  $T$ . Αυτό αποτελεί την κύρια εφαρμογή της επανεστίασης της ενέργειας. Άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι ο επανενοτοπισμός μίας αρχικής πηγής ή ο εντοπισμός κάποιας μορφής «βλάβης» σε κάποια θέση  $x_d$  του μέσου διάδοσης ή του στερεού σώματος, [7], που μπορεί να νοηθεί ως μία δευτερεύουσα πηγή με τέτοιου είδους όμως προβλήματα δεν θα ασχοληθούμε εδώ.

### 2.1 Το ευθύ στάδιο

Για ένα χρονικό διάστημα  $T$  που μας ενδιαφέρει, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός συστήματος  $N$  βαθμών ελευθερίας κάτω από δυναμικές συνθήκες θα διέπεται από τις εξισώσεις κίνησης,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \mathbf{f} \quad (5)$$

όπου  $\mathbf{f}$  είναι το διάνυσμα του φορτίου που συνήθως περιέχει μοναδιαίες τιμές για τα στοιχεία που αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας που λειτουργούν ως καταγραφείς σημάτων, διαφορετικά περιέχουν μηδενικά. Το  $\mathbf{K}$  είναι το τυπικό μητρώο δυσκαμψίας, το  $\mathbf{M}$  το μητρώο μάζας και το  $\mathbf{C}$  το μητρώο απόσβεσης. Η χρονική συνάρτηση  $\mathbf{f}(t)$  έχει την μορφή ενός παλμού Ricker, δηλαδή:

$$f(t) = (1 - 2\pi^2 s^2 (t - t_0)^2) e^{-\pi^2 s^2 (t - t_0)^2} \quad (6)$$

Συμβολίζουμε το υποσύνολο των βαθμών ελευθερίας του συστήματος με  $\mathbf{u}_r$ , όπου  $\mathbf{u}_r \subseteq \mathbf{u}$ , για τους οποίους πραγματοποιείται καταγραφή της χρονοϊστορίας των αποκρίσεων.

### 2.2 Το αντίστροφο στάδιο

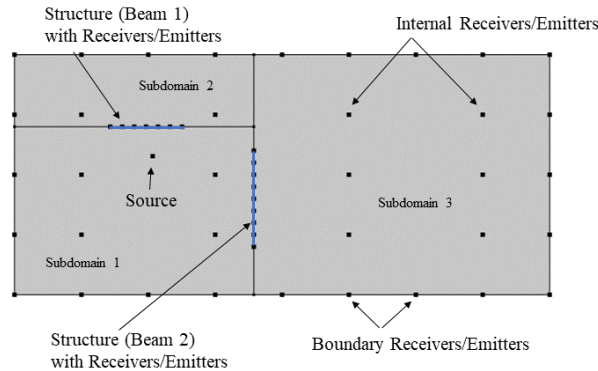
Τα χρονικά καταγεγραμμένα σήματα αφού αντιστραφούν χρονικά επανεκπέμπονται στο μέσο από τις εκάστοτε πηγές που θα χρησιμοποιηθούν. Στις πηγές αυτές θεωρούμε ότι αντιστοιχούν οι μόνες μη μηδενικές τιμές  $\hat{\mathbf{f}}$  οι οποίες προέρχονται από αντεστραμμένα χρονικά σήματα, [5,6].

$$\mathbf{M}\ddot{\hat{\mathbf{u}}}(t) + \mathbf{C}\dot{\hat{\mathbf{u}}}(t) + \mathbf{K}\hat{\mathbf{u}}(t) = \hat{\mathbf{f}}(t) \quad (7)$$

Για το πρόβλημα που μελετάμε εδώ εξετάζουμε την επανεστίαση της ακουστικής πίεσης στη θέση της πηγής κατά τη χρονική στιγμή  $T - t_0$ , όπου  $t_0$  είναι το κέντρο του παλμού που δίνεται στη σχέση (6). Για την καταγραφή των σημάτων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες (μικρόφωνα)  $s_{p_i}$  μέσα στο ρευστό σε διάφορες θέσεις, αλλά και αισθητήρες  $s_{d_j}$  (πχ. επιταχυνσιόμετρα) πάνω στις κατασκευές, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1α.

## 3 Παραδείγματα

Ο χώρος του σχήματος 2.1 με διαστάσεις  $H = 0.1 \text{ m}$  και  $L = H\sqrt{5}$ , χρησιμοποιήθηκε για τα παραδείγματα που θα δείξουμε εδώ, ο οποίος περιέχει και



Σχήμα 2.1 Ορθογώνιος χώρος στον οποίον υπάρχουν δύο δοκοί.

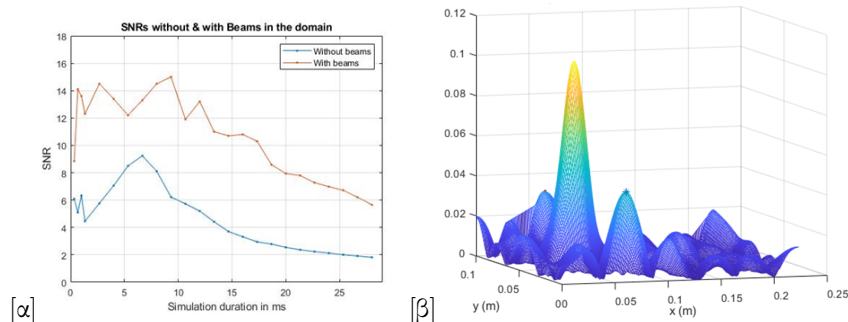
δύο ράβδους μία οριζόντια (Ράβδος 1) και μία κάθετη (Ράβδος 2). Η πυκνότητα και η ταχύτητα του ήχου του ρευστού είναι  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  και  $c = 1500 \text{ m/s}$ , αντίστοιχα, ενώ το υλικό των δοκών έχει μέτρο ελαστικότητας,  $E=68.9 \text{ GPa}$ , λόγο Poisson  $\nu=0.3$  και πυκνότητα  $\rho=2690 \text{ kg/m}^3$ . Το δικτύωμα αποτελείται από 4213 τετράπλευρα στοιχεία των τεσσάρων κόμβων. Έχουν τοποθετηθεί 48 συνολικά δέκτες/εκπομποί από τους οποίους οι 12 είναι μέσα στο ρευστό, οι 24 στα σύνορα του χώρου ενώ στις ράβδους 1 & 2, υπάρχουν 5 & 7, αντίστοιχα. Η πηγή είναι για κάθε περίπτωση ο παλμός Ricker της σχέσης (6), με παραμέτρους  $s = 37740.14 \text{ s}^{-1}$  και  $t_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ s}$ . Στο πεδίο συχνοτήτων ο παλμός αυτός έχει ένα μέγιστο στην περιοχή των  $40.759 \text{ kHz}$  ενώ καλύπτει μία περιοχή που αρχίζει από τις χαμηλές συχνότητες πέφτοντας σταδιακά μετά την μέγιστη τιμή του, φτάνοντας στα  $14 \text{ kHz}$  να είναι  $-80 \text{ dB}$  κάτω από την μέγιστη τιμή του.

### 3.1 Η επίδραση των δοκών στην εστίαση του ήχου

Εδώ καλούμαστε να διερευνήσουμε εάν η παρουσία των δοκών μέσα στο χώρο βελτιώνει την εστίαση του ήχου υπολογίζοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), που στην περίπτωση μας είναι ο λόγος της στάθμης του βασικού μεγίστου ακουστικής πίεσης στη θέση της πηγής, προς την τιμή του δευτερεύοντος τοπικού μεγίστου. Από προγενέστερα αριθμητικά πειράματα (που δεν παρουσιάζουμε εδώ) ήταν φανερό ότι όταν οι δέκτες/πομποί τοποθετούνται στα σύνορα του χωρίου έχουμε αποδοτικότερη εστίαση. Ως εκ τούτου λάβαμε ως ενεργούς μόνο τους 24 περιμετρικούς δέκτες/πομπούς, και υπολογίσαμε τους λόγους σήματος προς θόρυβο (SNR), για τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση δεν υπήρχε καμία κατασκευή μέσα στο πεδίο ενώ στη δεύτερη περίπτωση εισήχθησαν οι δύο δοκοί. Τα αποτελέσματα υπολογισμού των SNR για τις δύο περιπτώσεις και τις αντίστοιχες διάρκειες προσομοίωσης εμφανίζονται στο Σχ. 3.1α.

Η μεγαλύτερη διάρκεια προσομοίωσης αντιστοιχεί σε 84k χρονικά βήματα ή μία απόσταση διάδοσης  $187L$ , όπου  $L$  είναι το μήκος της οριζόντιας πλευράς του χώρου. Παρατηρούμε ότι η παρουσία των δοκών βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της εστίασης όπως εκφράζεται από τις τιμές του SNR.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία των δοκών στον ακουστικό χώρο μπορεί



Σχήμα 3.1 (α) Σύγκριση λόγων σήματος προς θόρυβο με δοκούς και χωρίς δοκούς μέσα στο χώρο. (β) Τυπική εστίαση στη θέση της πηγής για εκπομπή από 4 σημεία πάνω στις δοκούς. Αντιστοιχεί στην 4η γραμμή από το τέλος στον Πίνακα 3.1

να είναι σημαντική στη συνολική απόκριση του συστήματος. Σε αυτό το πλαίσιο κατά το αντίστροφο στάδιο, στον ακουστικό χώρο που δεν περιείχε δοκούς, στείλαμε πίσω σήματα που είχαν καταγραφεί με την παρουσία των δοκών. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα δεν ήταν αποδεκτά. Για παράδειγμα, σε δύο πειράματα με διάρκεια προσομοίωσης που αντιστοιχούν σε αποστάσεις διάδοσης  $125L$  &  $187L$ , στους αναμενόμενους χρόνους εστίασης της πηγής, οι υψηλότερες τιμές πίεσης δεν βρέθηκαν στην τοποθεσία της πηγής. Αυτό δείχνει ότι σε ένα μέσον έχει σημασία να λάβουμε υπόψη την παρουσία δομικών στοιχείων και την αλληλεπίδραση τους με το μέσο.

### 3.2 Εκπομπή ήχου μόνο από τις δοκούς

Εδώ παρουσιάζουμε αποτελέσματα για τις περιπτώσεις που τα σήματα καταγράφηκαν μόνο πάνω στις δοκούς και εκπέμπονταν πάλι από εκεί μετά τη χρονική τους αντιστροφή. Τα σήματα αυτά είναι πολύ μικρότερα από αυτά που καταγράφονται στα σύνορα (ή εντός του πεδίου), επομένως θα ήταν απαραίτητη κάποια ενίσχυση εάν επιθυμούσαμε να συνδυάσουμε αυτά τα σήματα με αυτά που καταγράφονται εντός του ρευστού. Στην τελευταία στήλη του Πίνακα 3.1 δίδονται οι λόγοι SNR για χρόνο προσομοίωσης 28k χρονικών βημάτων ( $\approx 62L$ ) και για αρκετούς συνδυασμούς εκπομπών πάνω στις δοκούς. Πρώτα, ενεργοποιούνται μόνο ένας ή δύο πομποί σε κάθε δοκό, μετά ένας από τη μία δοκό και ένας από την άλλη, μετά δύο και δύο, κ.λπ. Οι παρατηρήσεις μας σχετικά με αυτά τα πειράματα είναι οι εξής: Όταν υπάρχει μόνο ένας πομπός (σε κάθε δοκό) το SNR ποικίλλει από 1.08 έως 1.67. Με δύο πομπούς στην ίδια δοκό το SNR βρίσκεται μεταξύ 1.55 και 1.64, ενώ με έναν πομπό σε κάθε δοκό το SNR αυξάνεται και είναι μεταξύ 1.83 και 2.29. Με δύο εκπομπούς σε κάθε δοκό (μία τυπική μορφή της εστίασης του ήχου για αυτή την περίπτωση φαίνεται στο. Σχ. 3.1β), το SNR είναι περίπου 2.28 που είναι αξιοσημείωτο αφού όταν όλοι οι εκπομποί είναι ενεργοί η τιμή SNR είναι 2.50. Επίσης, για μικρότερη διάρκεια προσομοίωσης στην οποία είχαμε αντίστοιχα είτε τους πομπούς 1 & 5 στη δοκό 1 είτε τους πομπούς 1 & 7 στη δοκό 2, λάβαμε τιμές του SNR, 1.61 & 1.51, οπότε συμπεραίνουμε ότι δεν

είναι απαραίτητη μια μεγάλη διάρκεια χρόνου προσομοίωσης για να λάβουμε μία ικανοποιητική τιμή για το SNR. Τα παραπάνω παραδείγματα υπογραμμίζουν τη

Πομποί στη Ράβδο 1	Πομποί στη Ράβδο 2	SNR
1		1.08
1,2		1.12
1,5		1.64
	1	1.67
	1,7	1.55
1	1	1.83
5	7	2.83
3	4	2.29
1,5	1,7	2.28
1,2,3,4,5		1.88
	1,2,3,4,5,6,7	2.31
1,2,3,4,5	1,2,3,4,5,6,7	2.5

Πίνακας 3.1 Οι λόγοι SNR για μερικούς συνδυασμούς εκπομπών από τις δοκούς 1 & 2 για συνολικό χρόνο προσομοίωσης 28 k χρονικών βημάτων.

σημασία των δομικών στοιχείων καθώς όταν υπάρχουν αυτά, η πολυπλοκότητα του μέσου αυξάνεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του SNR. Παρατηρούμε επίσης, ότι στο αντίστροφο στάδιο όταν δεν λάβουμε υπόψη τις δοκούς, δεν γίνεται εστίαση στη θέση της πηγής. Με βάση αυτό, ακόμα και η ακρίβεια με την οποία θα μοντελοποιηθούν τα δομικά στοιχεία μπορεί να παίζει ρόλο, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικών εργασιών.

#### 4 Αναφορές

- [1] Fink, Mathias and Prada, Claire, Acoustic time-reversal mirrors, *Inverse problems*, 2001, Vol. 17(1), R1.
- [2] Quarteroni, Alfio and Valli, Alberto, *Domain decomposition methods for partial differential equations*, Oxford University Press, 1999.
- [3] Symplegma project, Panagiotopoulos, C., <http://symplegma.org>
- [4] COMSOL, COMSOL Multiphysics v.4.4, [www.comsol.com](http://www.comsol.com), Stockholm, Sweden.
- [5] Petromichelakis, I., Tsogka, C. and Panagiotopoulos, C.G. Signal-to-Noise Ratio analysis for time-reversal based imaging techniques in bounded domains, *Wave Motion*, 79, 23–43, 2018, Elsevier
- [6] Panagiotopoulos, C.G., Petromichelakis, Y. and Tsogka, C., Time reversal and imaging for structures, in *Dynamic Response of Infrastructure to Environmentally Induced Loads*, pp.159–182, 2017, Springer.
- [7] Panagiotopoulos, C.G., Kouzoupis S. and Tsogka, C., Computational vibro-acoustic time reversal for source and novelty localization, *Signals 2022*, (submitted).

## **Πρόταση απλοποιημένης μεθοδολογίας αξιολόγησης παραγόμενου θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες.**

Γεώργιος Καρπούζας  
Σύμβουλος Ακουστικής (MSc) /  
Πατριάρχου Φωτίου Β1, Κοζάνη.  
acousone@hotmail.com

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας απλοποιημένης και αξιόπιστης μεθοδολογίας για την αξιολόγηση του παραγόμενου θορύβου μεγάλων ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα προτείνεται η προσαρμογή της διαδικασίας αξιολόγησης της σχετικής Ελληνικής νομοθεσίας στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά παραγόμενου θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες. Η αξιολόγηση αναφέρεται στην μέθοδο μέτρησης του θορύβου με τις κατάλληλες τεχνικές-εξοπλισμό και όχι την αξιολόγηση του παραγόμενου θορύβου με ανθρωποκεντρικές μεθόδους (όπως ερωτηματολόγια). Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας βασίστηκε στο πρότυπο *British Standard (BS) 4142: 2014, ETSUR97(1996)* και στην απλοποίηση της τεχνικής *IEC61400: Part 11*. Εισάγονται πρόσθετα κριτήρια αξιολόγησης του παραγόμενου θορύβου, εφαρμόζοντας κατά την διαδικασία ποινές στην στάθμη για την περίπτωση που ο θόρυβος χαρακτηριστεί τονικός.

## ***Proposal of a simplified methodology for the evaluation of noise produced by large wind turbines.***

### **ABSTRACT**

*The purpose of this paper is the development of a simplified and reliable methodology for the evaluation of the noise produced by large wind turbines. It is also proposed the adaptation of the evaluation process of the relevant Greek legislation to the specific characteristics of noise produced by large wind turbines. The assessment refers to the technique of measuring the noise with the appropriate precision methods-instrumentation and not the assessment of the produced noise with anthropocentric methods (such as questionnaires). The development of the methodology was based on the *British Standard (BS) 4142: 2014, ETSUR97(1996)* and the simplification of the *IEC61400: Part 11* technique. Additional evaluation criteria of the generated noise are introduced, applying level penalties in the process in case the noise characterized by tonality*

### **1.Εισαγωγή**

Η διεύθυνση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας και οι μελλοντικές απαιτήσεις για αύξηση της ποσόστωσης των ΑΠΕ οδηγεί στην ανάγκη επέκτασης των αιολικών πάρκων και στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών υψηλής

ισχύος. Αυτή η εξέλιξη τόσο στον αριθμό των εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών υψηλής ισχύος, εγείρει ζητήματα που έχουν διάφορες επιπτώσεις οι οποίες σχετίζονται με την πιθανότητα όχλησης από θόρυβο, και άλλων παραπόνων όπως η υποβάθμιση του φυσικού τοπίου και οι αρνητικές επιπτώσεις στην πανίδα.

Με την ταχεία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, υπήρξε ανάγκη να δημιουργηθεί νομικό πλαίσιο και διαδικασίες για αξιολόγηση τέτοιων εγκαταστάσεων προς αποφυγή και περιορισμό πιθανών επιπτώσεων. Ένας αξιόσεβαστος αριθμός προτύπων έχει αναπτυχθεί από διάφορους οργανισμούς και φορείς, που πολλές φορές χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα και δυσκολία στην εφαρμογή, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός περιβάλλοντος άρνησης ή αδυναμίας εφαρμογής των διαδικασιών από τους αρμόδιους φορείς.

Τα διεθνή πρότυπα και οι διαδικασίες έχουν βελτιωθεί και προσαρμοστεί με την πάροδο των ετών, καθώς η εκτεταμένη ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και η προσέγγισή τους σε κατοικημένες περιοχές απαιτούν ένα σχέδιο αναθεώρησης των εφαρμοζόμενων προτύπων. Στην Ελλάδα, η ισχύουσα νομοθεσία για τον έλεγχο και αξιολόγηση της στάθμης θορύβου δεν είναι προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες των ανεμογεννητριών, ισχύουν οδηγίες και κανόνες που ισχύουν για τον παραγόμενο θόρυβο από συμβατικές σταθερές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Αυτή η προσέγγιση είναι πιθανόν να οδηγήσει στην αποτυχία της σωστής αξιολόγησης του θορύβου και στην όχλησης που μπορεί να προκληθεί. Το κύριο χαρακτηριστικό του παραγόμενου θορύβου μεγάλων ανεμογεννητριών είναι η αυξημένη στάθμη χαμηλής συχνότητας, ο θόρυβος διαμόρφωσης πλάτους, η δυσκολία παρέμβασης προς εξασθένηση του παραγόμενου θορύβου και οι συνθήκες διάδοσης του θορύβου σε ανοικτό πεδίο. Το σχετικά χαμηλό επίπεδο παραγόμενου θορύβου είναι πιθανόν υπό περιβαλλοντικές συνθήκες και εδαφικής μορφολογίας στο ημι-ανοικτό πεδίο να προκαλέσει όχληση σε μεγάλες αποστάσεις. Οι συνθήκες διάδοσης και η φύση του παραγόμενου θορύβου, κάνουν τις ανεμογεννήτριες να διαφέρουν σημαντικά από τις συμβατικές πηγές ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων.

## **2. Απλοποιημένη τεχνική διαδικασία αξιολόγησης**

### *2.1 Ανάγκη για αξιολόγηση μεγάλων αιολικών πάρκων*

Η διαδικασία αξιολόγησης του αιολικού πάρκου είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει τεχνικές μέτρησης θορύβου καθώς και διαδικασίες ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης. Η ανάγκη δημιουργίας νέων διαδικασιών ή ενημέρωσης των καθιερωμένων, είναι ζωτικής σημασίας διότι αφενός θα αποσαφηνίσουν εάν τέτοιες εγκαταστάσεις οδηγούν σε όχληση και αφετέρου θα κατευνάσουν τις ανησυχίες του πληθυσμού.

### *2.2 Υφιστάμενη τεχνική αξιολόγησης θορύβου μεγάλων ανεμογεννητριών και οι δυσκολίες εφαρμογής της στο πεδίο.*

Το διεθνές πρότυπο IEC61400-11[3] περιέχει λεπτομερές οδηγίες για την διαδικασία λήψης θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες, στις οδηγίες περιγράφονται οι προδιαγραφές σχετικά με τον τύπο και την ακρίβεια του απαιτητού



εξοπλισμού, καθώς επίσης και οι τεχνικές λήψης του θορύβου (Θέση λήψης, απόσταση, κ.τ.λ). Οι βασικές πληροφορίες που λαμβάνονται κατά την ακουστική μέτρηση είναι η στάθμη του θορύβου ( $LA_{90,T10min}$ ), το συχνοτικό περιεχόμενο (1/3 της οκτάβας,  $T_{10min}, L_{zeq}$ ) και η ταχύτητα του ανέμου (m/sec).

Μία από τις δυσκολίες στην εκτέλεση της μεθοδολογίας IEC61400:11[3] είναι η διαδικασία λήψης της ταχύτητας ανέμου. Το πρότυπο IEC απαιτεί λήψη της ταχύτητας σε ύψος 10 μέτρων με κάθε επίσκεψη στο πεδίο να απαιτείται η μεταφορά ενός μεγάλου γερανού αυξάνοντας τον βαθμό δυσκολίας της διαδικασίας. Στην παρούσα απλοποιημένη μεθοδολογία, η ταχύτητα ανέμου λαμβάνεται στα 2,5 μέτρα και στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός (Εξίσωση-2.1) της ταχύτητας του ανέμου στα 10 μέτρα.

Πίνακας 2.1 Συνοπτικός πίνακας διαφοροποίησης της παρούσας μεθόδου και του προτύπου IEC61400-11.

Περιγραφή	IEC 61400-11	Προτεινόμενη Μέθοδος
Θέση λήψης στάθμης θορύβου	4 (1 Αναφοράς, 3 Προαιρετικές)	1 (1 Αναφοράς-Μία θέση λήψης)
Απόσταση λήψης από το κέντρο του ρότορα	Κυμαινόμενο σύμφωνα με την παρακάτω σχέση $R_0 = H + \frac{D}{2}$	Σταθερή, 500m από το κέντρο του ρότορα και στην οικία με μεγαλύτερη εγγύτητα στην πλησιέστερη ανεμογεννήτρια.
Λήψη ταχύτητας ανέμου	10 μέτρα από το έδαφος	2.5 μέτρα από το έδαφος (υπολογισμός με την παρακάτω σχέση) $V \approx V_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$

### 2.3 Υφιστάμενο Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο αξιολόγησης και αδειοδότησης αιολικών πάρκων

Προϋπόθεση για την λειτουργία αιολικού πάρκου είναι η συμμόρφωση στα με το ΠΔ 1180/1981 και τις ΥΑ 2640/270 (ΦΕΚ 689/Β/18.8.78), ΥΑ 56206/1613 (ΦΕΚ 570/Β/9.9.1986), ΥΑ 69001/1921 (ΦΕΚ 51/Β/18.8.1988), ΥΑ 765/1991 (ΦΕΚ 81/Β/21.2.1991), ΥΑ Α5/2375/78 (ΦΕΚ 698Β). Η ανώτερη επιτρεπτή ηχητική στάθμη εκπεμπόμενη στο περιβάλλον από εγκαταστάσεις για αστικές περιοχές ανέρχεται στα 50dB(A). Σύμφωνα με την Έγκριση ειδικού πλαισίου χωροταξικού σχεδιασμού και αιωφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτών' ΦΕΚ 2464/3.12. Παράρτημα II σελίδα 18 το όριο θορύβου για νομίμως υφιστάμενη μεμονωμένη κατοικία περιορίζεται τα 45 dB(A).

Το ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και η ΚΥΑ 49828/2008 - Κριτήριο Δ προς αδειοδότηση αιολικών πάρκων αναφέρεται στις ελάχιστες αποστάσεις από οικισμούς και την ηχητική στάθμη όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 2.2 Απόσπασμα του Παραρτήματος ΙΙ της ΚΥΑ 49828/2008 - Κριτήριο Δ Αποστάσεις από οικιστικές δραστηριότητες*

Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Πόλεις και οικισμοί με πληθυσμό >2000 κατοίκων ή οικισμοί με πληθυσμό <2000 κατοίκων που χαρακτηρίζονται ως δυναμικοί, τουριστικοί ή αξιόλογοι κατά την έννοια του άρθρου 2 που π.δ 24.4/3.5.1985	1.000 μέτρα από το όριο του οικισμού ή σχεδίου πόλης κατά περίπτωση
Παραδοσιακοί οικισμοί	1.500 μέτρα από το όριο του οικισμού Κατά παρέκκλιση από τα παραπάνω είναι δυνατή με απόφαση του Γ.Γ. Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε ύστερα από την εισήγηση της αρμόδιας Δ/νσης του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε η μείωση της ως πάνω απόστασης μέχρι τα 1000 μέτρα εφόσον ο αριθμός των κατοίκων που συνθέτουν τον οικισμό είναι μικρότερος των είκοσι.
Λοιποί οικισμοί	500 μέτρα από τα όρια του οικισμού
Οργανωμένη δόμηση Α' ή Β' κατοικίας (Π.Ε.Ρ.Π.Ο., Συνεταιρισμοί κ.λ.π) ή και διαμορφωμένες περιοχές Β' κατοικίας, όπως αναγνωρίζεται στα πλαίσια της Μ.Π.Ε κάθε μεμονωμένης εγκατάστασης αιολικού πάρκου.	1.000 μέτρα από τα όρια του σχεδίου ή της διαμορφωμένης περιοχής αντίστοιχα.
Ιερές Μονές	500 μέτρα από τα όρια της Μονής
Μεμονωμένη κατοικία (Νομίμως Υφιστάμενη)	Εξασφάλιση ελάχιστου επιπέδου θορύβου μικρότερου των 45dB.

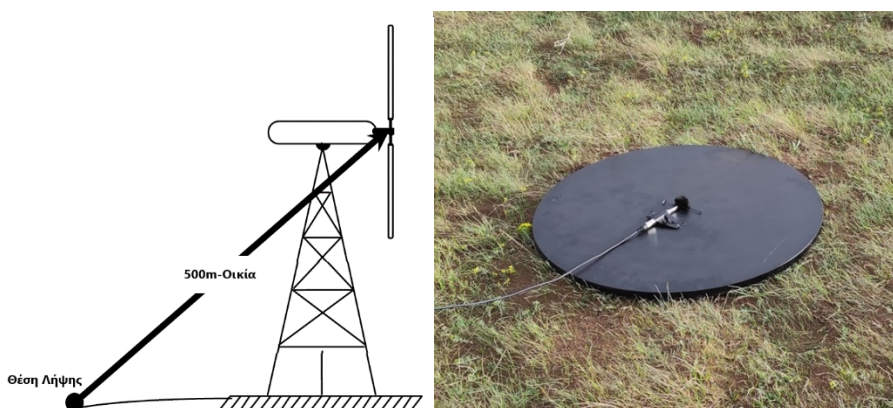
Προτείνεται η προσαρμογή του ελληνικού νομικού πλαισίου για εποπτεία των εγκατεστημένων μεγάλων ανεμογεννητριών (>2MW) στις ιδιαιτερότητες του παραγόμενου θορύβου, με τον διαχωρισμό των αιολικών πάρκων από τις υπόλοιπες Η/Μ εγκαταστάσεις. Είναι επιτακτικό να εισαχθούν πρόσθετα κριτήρια καταλληλότητας, τα οποία θα εξετάζουν το συχνοτικό περιεχόμενο, την εγγύτητα της οικίας στο αιολικό πάρκο, τη θέσπιση λεπτομερών οδηγιών παρακολούθησης του παραγόμενου θορύβου καθώς επίσης και της ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης των κατοίκων παρακείμενων κοινοτήτων.

#### 2.4 Μεθοδολογία αξιολόγησης παραγόμενου θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες

#### 2.4.1 Διαδικασία λήψης στάθμης θορύβου στο πεδίο

Με στόχο την καλύτερη σχέση σήματος-θορύβου, τα σημεία λήψης της στάθμης θορύβου και θορύβου υποβάθρου είναι δύο. Το πρώτο είναι σε απόσταση 500 μέτρων από την θέση της κοντινότερης ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 (ελάχιστη απόσταση κατά ΚΥΑ 49828/2008 - Κριτήριο Δ).

*Εικόνα 2.1: Σταθερή θέση μέτρησης 500m (όψη τομής) - Τυπική θέση λήψης - Τοποθέτηση μικροφώνου σε ανακλαστική πλάκα. Το μικρόφωνο τοποθετείται στο κέντρο της κυκλικής ανακλαστικής επιφάνειας με διάμετρο 1 μέτρο. Ένα αντιανεμικό τοποθετείται στο μικρόφωνο. Προτείνεται μία θέση λήψης κατά του ανέμου προσδιορίζεται ως η θέση αναφοράς. Η κατεύθυνση των θέσεων πρέπει να είναι εντός  $\pm 15^\circ$  σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου της ανεμογεννήτριας τη στιγμή της μέτρησης.*



Δεύτερη θέση ορίζεται εξωτερική λήψη στην οικία με την μεγαλύτερη εγγύτητα στο αιολικό πάρκο (ανεμογεννήτρια). Σε περίπτωση που υπάρχει όχληση σε οικία, αυτή λαμβάνεται ως πρόσθετη θέση λήψης. Οι λήψεις γίνονται πάντα με οπτική επαφή στην ανεμογεννήτρια. Πραγματοποιείται μοναδιαία λήψη θορύβου σε ανακλαστήρα για το σημείο των 500 μέτρων σύμφωνα με το IEC61400-11 και λήψη στην οικία με την μέγιστη εγγύτητα ή στην οικία όχλησης με το μικρόφωνο τοποθετημένο σε τρίποδο σε ύψος 1,2-1,5 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους σύμφωνα με τις απαιτήσεις του BS 4142[1]. Η θέση λήψης επιλέγεται για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των κτηριακών αντανάκλασεων και πρέπει να απέχει τουλάχιστον 10 μέτρα από την πρόσοψη του κτηρίου.

Απαιτείται μια σειρά λήψεων οι οποίες περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερες περιβαλλοντικές μεταβλητές (ταχύτητα ανέμου, θορύβου υποβάθρου κ.α). Η θέση λήψης του θορύβου υποβάθρου είναι πάντα στην πλησιέστερη οικία ή στην οικία που παρατηρείται όχληση. Οι ακουστικοί δείκτες που λαμβάνονται είναι οι  $LA_{90,T10min}$ , και η ανάλυση συχνότητας 1/3 της οκτάβας,  $T_{10min}, L_{Zeq}$ . Για κάθε λήψη στάθμης θορύβου λαμβάνεται ταυτόχρονα και η μέση ή ολοκληρωμένη ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται σε ύψος 2.5 μέτρων και υπολογίζεται με την σχέση (1.1). Μία σειρά εκτεταμένων λήψεων είναι απαιτητές με στόχο την

ενσωμάτωση διευρυμένων καιρικών μεταβλητών. Η στάθμη θορύβου πρέπει να λαμβάνεται για ταχύτητες 2-10m/sec.

Κατά την διαδικασία αξιολόγησης (ακουστικής μέτρησης στις προκαθορισμένες θέσεις 500μέτρων και της οικίας με την μέγιστη εγγύτητα) πρέπει να αφαιρείται ο θόρυβος υποβάθρου της κοινότητας και όχι ο θόρυβος υποβάθρου της περιοχής ανάπτυξης του αιολικού πάρκου. Ο θόρυβος υποβάθρου σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου, δύναται να είναι αρκετά αυξημένος λόγω των καιρικών συνθηκών που επικρατούν.

#### *2.4.2 Προσδιορισμός κρίσιμων περιόδων λήψης για την περίπτωση παραπόνων*

Οι μετρήσεις υλοποιούνται σε οικία ως απόκριση σε καταγγελίες. Οι μετρήσεις γίνονται σε συνθήκες που σύμφωνα με τον καταγγέλλοντα δημιουργούν την μεγαλύτερη όχληση. Λαμβάνονται υπόψιν αυτές οι συνθήκες ταχύτητας του ανέμου, και υλοποιούνται μετρήσεις με όγκο δεδομένων για να δοθεί μια αξιόπιστη εκτίμηση των τυπικών επιπέδων θορύβου από την ανεμογεννήτρια. Απαιτούνται τουλάχιστον 20 μετρήσεις του  $L_{A90,T10min}$  να πραγματοποιηθούν εντός  $\pm 2$  m/s από την ταχύτητα του ανέμου που κατά τον καταγγέλλοντα προκαλούν μεγαλύτερη όχληση. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες και όχι για παράδειγμα όταν ο άνεμος είναι σε κατεύθυνση που συναντάμε σπάνια. Για να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις των εξωτερικών πηγών θορύβου, μπορεί να είναι απαραίτητο να εκτελούνται αυτές οι μετρήσεις κατά τις νυχτερινές περιόδους όπου άλλες πηγές θορύβου από ανθρώπινη και ζωική δραστηριότητα είναι πιθανό να είναι στο ελάχιστο.

#### *2.4.3 Μεθοδολογία Αξιολόγησης θορύβου και εισαγωγή κατάλληλων ποινών*

Η αξιολόγηση τονικότητας του θορύβου περιλαμβάνει τη μέτρηση του ενός τρίτου μιας ζώνης οκτάβας επιπέδων ηχητικής πίεσης, όπως περιγράφεται στο BS4142: 2014 (Παράρτημα γ). Η παρουσία διακριτών τόνων περιεχομένου ήχου προσδιορίζεται συγκρίνοντας την στάθμη του ενός τρίτου οκτάβας με τις τιμές σε δύο γειτονικές ζώνες. Για την περίπτωση που ο παραγόμενος θόρυβος χαρακτηρίζεται από τονικότητα σύμφωνα με τον πίνακα 2.3 εφαρμόζονται ποινές στην στάθμη θορύβου μετά την απαγωγή του θορύβου υποβάθρου (Εξίσωση 2.2). Η ποινή εισάγεται μία φορά για κάθε ζώνη συχνότητας για οποιοδήποτε σημείο λήψης παρατηρηθεί η τονικότητα. Στην περίπτωση που υπάρχει κατοικημένη οικία σε απόσταση από αιολικό πάρκο 500-1000 μέτρων, εφαρμόζεται σχετική ποινή εγγύτητας. Ο μέγιστος αριθμός ποινών που είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κατά την αξιολόγηση είναι δύο.

*Πίνακας 2.3: Διαφορά επιπέδου ζωνών συχνότητων. Σε περίπτωση διαφορών εφαρμόζεται ποινή στην στάθμη  $L_{A90,T10min}$ . (Η ποινή εφαρμόζεται στην περίπτωση τονικότητας στην θέση των 500 μέτρων ή στην θέση της οικίας. Στην περίπτωση που υπάρχει τονικότητα και στις δύο θέσεις εφαρμόζεται μία ποινή-Μπορούν να εφαρμοστούν μέχρι δύο ποινές για την περίπτωση τονικότητας σε περισσότερες από μία ζώνη συχνότητας και οικίας σε εγγύτητα) Η τιμή ποινής των 6 και 3 dB είναι αυθαίρετη,*

καθώς η προσθήκη 6 dB δεν είναι απαραίτητη ή αντικατοπτρίζει με ακρίβεια πώς αλλάζει η αντίληψη της ενόχλησης.

Εύρος συχνότητας-(1/3 octave)	Προτεινόμενη εισαγωγή ποινής προσαρμογής σε dB, $L_{A90,10min}$	BS:4142 Ποινή προσαρμογής dB, $L_{A90,10min}$	ΠΔ1180
15 dB στις ζώνες χαμηλής συχνότητας του ενός τρίτου οκτάβας (25–125 Hz)	+3dB	+6dB	-
8 dB σε ζώνες μεσαίας συχνότητας (160–400 Hz)	+3dB	+6dB	-
5 dB σε ζώνες υψηλής συχνότητας (500–10.000 Hz)	+3dB	+6dB	-
Ποινή εγγύτητας Όταν υπάρχει κατοικημένη οικία σε απόσταση 500-1000 μέτρων από την πλησιέστερη ανεμογεννήτρια	+3dB	-	-

Πίνακας 2.4 Συνοπτικός πίνακας ακουστικής αξιολόγησης παραγόμενου θορύβου

Απαιτητές διεργασίες ακουστικής αξιολόγησης	Περιγραφή
Χρονική διάρκεια λήψεων στάθμης θορύβου	Διενέργεια σειράς ακουστικών μετρήσεων αυξημένου εύρους μεταβλητών. Ελάχιστα προτείνεται εβδομαδιαία υλοποίηση μετρήσεων τους καλοκαιρινούς και χειμερινούς μήνες με στόχο να ληφθούν τα ελάχιστα και τα μέγιστα επίπεδα θορύβου.(Δεδομένα λήψης θορύβου για ταχύτητα ανέμου 2-10m/sec στην θέση 500m) ή/και στην πλησιέστερη οικία/οικία όχλησης.
Μεθοδολογία Λήψης στάθμης θορύβου και θορύβου υποβάθρου	Όπως περιγράφεται από το πρότυπο 61400 με προσαρμογή της θέσης λήψης της ταχύτητας του ανέμου (Εξίσωση 1.1)
Δείκτες προς λήψη	Για στάθμη θορύβου και θορύβου υποβάθρου – $L_{A90,T10min}$ , ταχύτητα του

	ανέμου m/s (ταυτόχρονη λήψη με την στάθμη θορύβου)
Ανάλυση συχνοτικού εύρους	1/3 της οκτάβας
Θέση λήψης του θορύβου υποβάθρου	Ο θόρυβος υποβάθρου λαμβάνεται στην οικία με την μεγαλύτερη εγγύτητα στην υπο αξιολόγηση αιολικού πάρκου
Θέση λήψης παραγόμενης στάθμης θορύβου	Λήψη σε δύο σταθερές θέσεις. Στα 500 μέτρα από την τελευταία ανεμογεννήτρια και στην πλησιέστερη οικία όπως αναφέρεται στις τεχνικές οδηγίες (Με οπτική επαφή στη θέση της νασέλλας) ή/και οικία όχλησης.
Προσαρμογή της μετρούμενης στάθμης για θόρυβο με τονικά χαρακτηριστικά.	Σε περίπτωση τονικότητα σύμφωνα με τον πίνακα 2.3, εφαρμόζονται οι προβλεπόμενες ποινές μετά την απαγωγή του θορύβου υποβάθρου
Προσαρμογή της μετρούμενης στάθμης για οικία σε απόσταση 500-1000 μέτρων από την πλησιέστερη ανεμογεννήτρια – Ποινή εγγύτητας	+3dB στην στάθμη μετά την απαγωγή θορύβου υποβάθρου.

### 2.5 Εξισώσεις

Υπολογισμός ταχύτητας ανέμου:

$$V \approx V_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (1.1)$$

**Όπου:**

V= η ταχύτητα που πρέπει να υπολογιστεί σε ύψος (ταχύτητα ανέμου m/s σε ύψος 10 μέτρων)

Z = το ύψος πάνω από το επίπεδο του εδάφους για ταχύτητα V (10 μέτρα ύψος)

V<sub>ref</sub> = γνωστή ταχύτητα σε ύψος Z<sub>ref</sub> (ταχύτητα ανέμου m/s σε ύψος 2,5 μέτρα)

Z<sub>ref</sub> = ύψος αναφοράς όπου είναι γνωστό το V<sub>ref</sub> (2,5 μέτρα ύψος)

Z<sub>0</sub> = τραχύτητα του εδάφους

Αφαίρεση στου θορύβου υποβάθρου από της στάθμη λήψης

$$L_p = 10 \text{Log}_{10} \left( 10^{L_p/10} - 10^{L_{Bgn}/10} \right) \quad (2.2)$$

### 3. Εκπόνηση τεχνικής έκθεσης αξιολόγησης.

Η τεχνική έκθεση είναι μία σημαντική πηγή πληροφόρησης προς κάθε αρμόδιο φορέα αξιολόγησης και εποπτείας αιολικών πάρκων. Η έκθεση πρέπει να περιέχει

σημαντικές πληροφορίες της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και συνοψίζονται παρακάτω.

- Μια δήλωση που περιγράφει τον σκοπό και τους στόχους της έκθεσης.
- Περιγραφή της γύρω περιοχής και των πηγών θορύβου που αξιολογούνται.
- Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση του θορύβου, συμπεριλαμβανομένων των θέσεων λήψης, του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, των λεπτομερειών βαθμονόμησης, μιας περίληψης καιρού και του χρόνου διεξαγωγής της έρευνας.
- Μια σύνοψη των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την έρευνα, τα οποία περιλαμβάνουν,  $LA_{90,T10min}$ , και  $1/3$  οκτάβας  $L_{Zeq,T10min}$ .
- Συστάσεις και μέτρα μετριασμού που απαιτούνται για την προστασία του πληθυσμού.

#### **4. Προτεινόμενα μέτρα προς εφαρμογή προσαρμοσμένα στον παραγόμενο θόρυβο από μεγάλες ανεμογεννήτριες**

##### *4.1 Νομοθετική προσαρμογή-μέτρα ανακούφισης των κοινοτήτων*

- Εισαγωγή νέων ορίων ελαχίστων αποστάσεων από κατοικημένη περιοχή λαμβάνοντας υπόψιν όχι μόνον τις αποστάσεις της ανεμογεννήτριας σε εγγύτητα με την πλησιέστερη κατοικία αλλά και συνεκτίμηση του αριθμού των υπο εγκατάσταση ανεμογεννητριών.
- Εισαγωγή σχετικών ποινών στην περίπτωση τονικού θορύβου στα όρια της εγκατάστασης ή στην περιοχή όχλησης.
- Για την περίπτωση που πληρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις από το εγκατεστημένο αιολικό πάρκο και υπάρχει όχληση σύμφωνα με τα παραπάνω, προτείνεται να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο αντισταθμιστικών μέτρων για την κοινότητα (χρηματοδότηση για βελτίωση ηχομονωτικής ικανότητας των κτηρίων και σε περιπτώσεις χρηματοδότηση ή μετεγκατάσταση οικιών)

##### *4.2 Ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικής αξιολόγησης του παραγόμενου θορύβου*

- Ανάπτυξη μίας απλοποιημένης αξιόπιστης μεθόδου τεχνικής αξιολόγησης (ηχομέτρησης/υπολογισμούς) που θα είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στο πεδίο από αρμόδιους φορείς.
- Τεχνικό πλαίσιο ανάλυσης συχνοτικού περιεχομένου και την εφαρμογή σχετικών ποινών για τονικότητα σε ζώνες χαμηλών, μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων.
- Αξιολόγηση του θορύβου και θορύβου υποβάθρου της κοινότητας σε εγγύτητα. Η αξιολόγηση πρέπει να είναι εκτεταμένη χρονικής περιόδου 1 έτους και να λαμβάνει υπόψιν το συνολικό εύρος των καιρικών φαινομένων καθώς επίσης και την δραστηριότητα της κοινότητας.

##### *4.3 Ανάπτυξη μεθοδολογίας ανθρωποκεντρικής αξιολόγησης και πλαισίου επιτήρησης του αντικτύπου στις κοινότητες με εγγύτητα σε αιολικό πάρκο.*

-Διενέργεια ερωτηματολογίων στις κοινότητες σχετικά με την αποδοχή η όχι ανάπτυξης τέτοιων εγκαταστάσεων σε παρακείμενες περιοχές (κατά τη φάση μελέτης του έργου).

-Ισχυρά αντισταθμιστικά μέτρα στις τοπικές κοινότητες οικονομικά και ανθρωποκεντρικά.

-Συνεχής επιτήρηση των επιπτώσεων των εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων, με την επαναλαμβανόμενη αξιολόγηση κάθε 5 έτη.

## **5. Επίλογος**

Η ταχεία ανάπτυξη της αιολικής τεχνολογίας έχει δημιουργήσει την ανάγκη εφαρμογής εποπτικών κανονισμών καθώς και εργαλείων αξιολόγησης που σχετίζονται με τον θόρυβο. Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μια απλοποιημένη μη ανθρωποκεντρική διαδικασία αξιολόγησης του παραγόμενου θορύβου η οποία περιλαμβάνει την τεχνική διαδικασία λήψης της στάθμης θορύβου από μεγάλες ανεμογεννήτριες και προτείνει μια ολιστική αξιολόγηση του θορύβου λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητες του θορύβου από ανεμογεννήτριες με τονικά χαρακτηριστικά, την διάδοση στο ημι-ανοικτό πεδίο, την εγγύτητα οικιών στην εγκατάσταση και την αδυναμία ακουστικής παρέμβασης-εξασθένησης του παραγόμενου θορύβου. Μια ολοκληρωμένη εκτίμηση επιπτώσεων απαιτεί τη χρήση ανθρωποκεντρικών εργαλείων αξιολόγησης, όπως η έρευνα κοινωνιών κοντά σε τέτοιες εγκαταστάσεις μέσω ερωτηματολογίου. Η αξιολόγηση άλλων κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων μπορεί επίσης να είναι ένα σημαντικό εργαλείο ανάδειξης πιθανής όχλησης και επιπτώσεων στην υγεία καθώς και στη συνολική ποιότητα ζωής των εν λόγω εγκαταστάσεων στις κοντινές κοινότητες. Μια πρόταση για το μέλλον είναι να δημιουργηθεί ένα ισχυρό πλαίσιο που να συμμορφώνεται με ανθρωποκεντρικές και μη ανθρωποκεντρικές απαιτήσεις, διασφαλίζοντας την περαιτέρω ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας, ελαχιστοποιώντας τον αντίκτυπο, καθισχάζοντας τους πολίτες και κατευνάζοντας τις αντιδράσεις που στοχεύουν στην αναστολή της τεχνολογίας.

## **6. Αναφορές**

- [1] British Standard (BS)4142:2014 «Method for rating and assessing industrial and commercial sound», Τόμος,(2014)
- [2] The Working Group on Noise from Wind turbines «The Assessment and Rating of the Noise From Wind Farms» ETSU-R-97,(1996)
- [3] International Electrotechnical Commission «Wind Turbines-Acoustic noise measurement techniques-IEC61400-11» ISBN 978-2-8322-5826-2, (2018)



**Περιπτωσιολογική μελέτη (case study)  
αντιμετώπισης στερεόφερτου θορύβου από μονάδα  
συμπίεσης Φυσικού Αερίου**

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](mailto:tech@alphacoustic.com)

Αντώνιος Αργουδέλης  
B. Eng Industrial  
Engineering  
M. Sc. Environmental and  
Architectural Acoustics  
M. Sc. Project Management  
Αποστολοπούλου 73,  
Χαλάνδρι  
antonios@alphacoustic.com

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία αυτή αφορά περιπτωσιολογική μελέτη (case study) σύγκρισης και ανάλυσης στερεόφερτου θορύβου (κραδασμών) που προκαλούνταν σε διαμέρισμα πρώτου ορόφου και προέρχονται από τη λειτουργία μονάδας συμπίεσης φυσικού αερίου παρακείμενου πρατηρίου καυσίμων στην Αττική. Την αρχική μέτρηση κραδασμών για την αξιολόγηση και διερεύνηση του προβλήματος, ακολούθησε η πρόταση βελτιωτικών δράσεων για αντικραδασμική προστασία η οποία λόγω των τεχνικών περιορισμών εκτελέστηκε σε τέσσερα διαφορετικά στάδια. Η αποτελεσματικότητα κάθε ενέργειας διαπιστώθηκε και αξιολογήθηκε μετά το πέρας κάθε σταδίου με διαδοχικές σειρές μετρήσεων κραδασμών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπέδων κραδασμών και η αξιολόγηση των επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι συγκριτική μεταξύ των φάσεων των εργασιών που υλοποιήθηκαν με στόχο την ποσοτικοποίηση της επιτευχθείσας μείωσης σε κάθε φάση.*

***Case study of structure borne noise analysis occurring  
from a natural gas compression unit***

**ABSTRACT**

*This paper presents a case study comparing and analyzing structure borne noise (vibrations) that were transmitted in a first-floor apartment due to the operation of a natural gas compression unit in an adjacent gas station in Attica, Greece. Following the initial measurement of the vibration transmission the proposal of gradual vibration transmission reduction actions in four different stages was carried out. The effectiveness of each stage was with successive series of vibration measurements. The aim of this paper is to investigate the vibration levels and to evaluate the interventions carried out. The presentation of the results is comparative between the phases of the anti-vibration improvement actions. The aim was to collect adequate data in order to quantify the reduction achieved in each phase.*

## Εισαγωγή

Η εργασία αφορά μια ιδιαίτερη περίπτωση διάδοσης στερεόφερτου θορύβου (κραδασμών) που προκαλούνταν σε οικία στον πρώτο όροφο και προέρχονταν από τη λειτουργία μονάδας συμπίεσης φυσικού αερίου για χρήση σε οχήματα παρακείμενου πρατηρίου καυσίμων. Οι διαστάσεις της ήταν 6 x 2.5 x 2.5m. Στο διαμέρισμα προέκυπτε σημαντικό πρόβλημα μεταφερόμενων κραδασμών εξαιτίας της λειτουργίας της μονάδας που ήταν τοποθετημένη σε διπλανό αύλειο χώρο περί τα 10 μέτρα μακριά από το σύνορο της διπλοκατοικίας. Ο αερόφερτος θόρυβος λειτουργίας της μονάδας, μετά τις ηχομονωτικές επεμβάσεις που εφαρμόστηκαν σε πρότερο στάδιο, ήταν εντός των νομίμων ορίων χωρίς να δημιουργεί όχληση.

Σημαντική παράμετρος κατά τις φάσεις επίλυσης του προβλήματος αποτέλεσε το γεγονός ότι λόγω της φύσης της μονάδας συμπίεσης απαιτείται πολύ αυστηρή ζυγοστάθμιση λόγω προδιαγραφών ασφαλείας. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για την εύρεση μιας ιδιαίτερης ισορροπίας μεταξύ σταθερότητας (fixation) και ελαστικότητας/υποχώρησης (elasticity/deflection) στην έδραση του συνόλου της μονάδας συμπίεσης. Επομένως τα τέσσερα στάδια επεμβάσεων προέκυψαν με βάση αυτή την παράμετρο που αποτέλεσε προτεραιότητα του κατασκευαστή και χρήστη της εγκατάστασης.

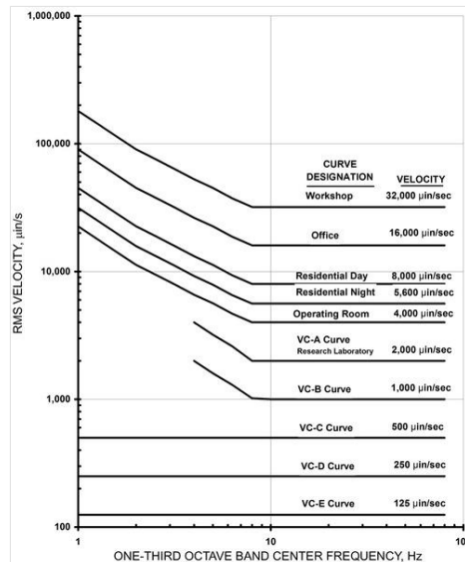
Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και λόγω της μέχρι τώρα έλλειψης Εθνικών Νομοθετημένων ορίων κραδασμών σε κτίρια με στόχο την ακουστική άνεση των ανθρώπων που βρίσκονται εντός αυτών, χρησιμοποιήθηκε το εγχειρίδιο «ASHRAE-HANDBOOK-Sound-and-Vibration-Control» [1], καθώς και το πρότυπο BS6472:1 -1992. [2]

### 1. Πληροφορίες από τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα

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 Εικόνα 1.1. Τα όρια αυτά βασίζονται σε οδηγίες που αναφέρονται στα πρότυπα ANSI S2.71-1983 και ISO Standard 2631-2.

Λόγω του ότι οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τιμές επιτάχυνσης [ $\text{mm/s}^2$ ], ήταν απαραίτητη η μετατροπή αυτών των τιμών σε ταχύτητα προκειμένου να γίνει η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα όρια που προτείνει η ASHRAE.

Ακόμα, στο πρότυπο BS6472:1 -1992, όπως αυτό αναφέρεται στο Department of Environment and Conservation NSW [2],[3], συμπεριλαμβάνονται κριτήρια έκθεσης των ατόμων σε συνεχείς ή διακοπτόμενους κραδασμούς, ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου. Ο πίνακας με τις οριακές τιμές ταχύτητας και επιτάχυνσης για διαφορετικές εφαρμογές περιλαμβάνεται στο [3].



Εικόνα 1.1. Διάγραμμα ορίων ταχύτητας κραδασμού ανάλογα με χρήση του κτιρίου κατά ASHRAE [1]

## 2. Μεθοδολογία μέτρησης κραδασμών

Οι μετρήσεις κραδασμών έγιναν με το όργανο μέτρησης NTi XL2 Acoustic Analyzer και το επιταχυνσιόμετρο Accelerometer A4580, τα οποία αμφότερα ικανοποιούν το διεθνές πρότυπο ISO 8041:2005. Το μετρητικό όργανο κατέγραψε τις επιταχύνσεις ( $\text{mm/s}^2$ ) στον κατακόρυφο άξονα Z.

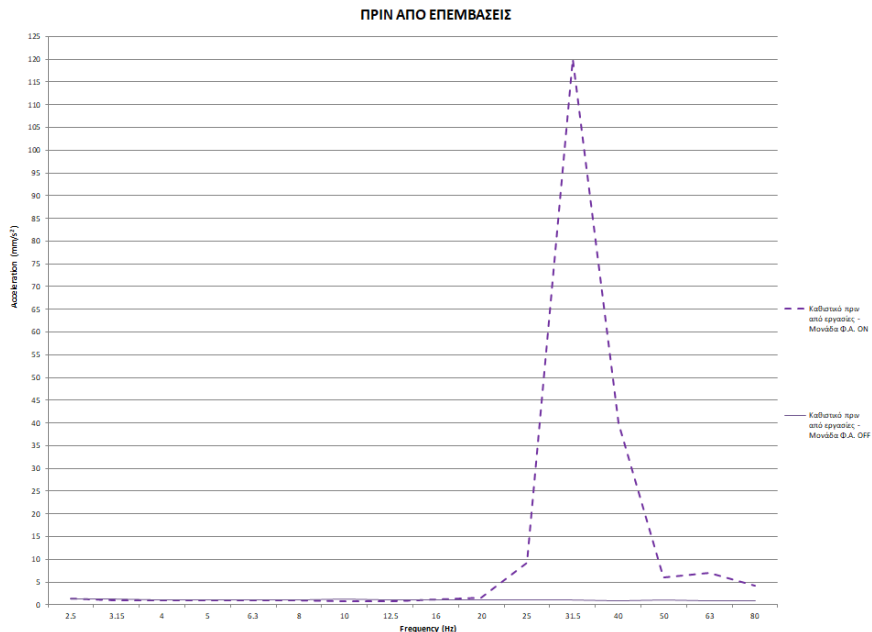
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία εντός της οικίας ώστε να εντοπιστούν τα δυσμενέστερα εξ' αυτών. Με αυτή την μεθοδολογία βρέθηκαν τρεις περιοχές ενδιαφέροντος.

Μετά το πέρας της κάθε φάσης αντικραδασμικών επεμβάσεων, ακολούθησαν μετρήσεις κραδασμών στις περιοχές ενδιαφέροντος με στόχο την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και τη σύγκριση με τα προηγούμενα δεδομένα.

## 3. Φάσεις εφαρμογής επεμβάσεων αντικραδασμικής προστασίας

Αρχικά, πριν την έναρξη των επεμβάσεων έπρεπε να εξακριβωθεί ότι η μονάδα συμπίεσης ΦΑ ήταν η κύρια αιτία της δημιουργίας του προβλήματος μετάδοσης στερεοφαινομένου θορύβου.

Για να εξακριβωθεί αυτό, έγινε μέτρηση κραδασμών με την μονάδα συμπίεσης σε λειτουργία (ON) και εκτός λειτουργίας (OFF) τόσο για την επιβεβαίωση της αιτίας του φαινομένου, όσο και για την ποσοτικοποίηση αυτού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα, όπου είναι αντιληπτό ότι η λειτουργία της μονάδας είναι η κύρια και μόνη αιτία δημιουργίας των κραδασμών.



*Διάγραμμα 3.2 Μετρήσεις πριν τις αντικραδασμικές επεμβάσεις με την μονάδα συμπίεσης εντός και εκτός λειτουργίας στο καθιστικό της οικίας*

Απομονώνοντας το κάθε ένα ξεχωριστά από τα επιμέρους υποσυστήματα της μονάδας και πραγματοποιώντας αντίστοιχες μετρήσεις κραδασμών, εξήχθει το συμπέρασμα πως η κύρια επί μέρους πηγή είναι ο εμβολοφόρος συμπίεστης τριών σταδίων. Οι υπόλοιπες πηγές δονητικής διέγερσης, όπως το υδραυλικό συγκρότημα, ο μικρός αεροσυμπιεστής, το ψυγείο νερού στην οροφή του container καθώς και η αντλία λαδιού του booster δε συνεισέφεραν στη δονητική διέγερση.

Όπως αναφέρθηκε και πρότερα, ειδικοί περιορισμοί ασφαλείας οδήγησαν στην παρακάτω χρονική σειρά των αντικραδασμικών επεμβάσεων που επελέγησαν από τον αναθέτη. Περιγράφονται συνοπτικά:

- **Α Φάση.** Κατά την αρχική αυτή φάση αποκόπηκαν οι ηχογέφυρες από αντηρίδες της υπάρχουσας ηχομονωτικής κατασκευής και πραγματοποιήθηκε κοπή του σκυροδέματος περιμετρικά από την μονάδα συμπίεσης ΦΑ σε απόσταση 30cm και σε βάθος 60cm.
- **Β Φάση.** Αποκοπή της πλάκας σκυροδέματος σε απόσταση 3m από την μονάδα συμπίεσης ΦΑ και βάθος 60cm, μεταξύ της πηγής (μονάδα συμπίεσης ΦΑ) και του δέκτη (οικία).
- **Γ Φάση.** Σε αυτό το στάδιο προτάθηκε στον αναθέτη αυστηρότερη ζυγοστάθμιση του συμπίεστη της μονάδας ώστε να περιοριστούν πιθανές αζυγοσταθμίες και να μειωθεί εν τει γενέσει του ο κραδασμός. Αυξήθηκε ακόμα το βάθος αποκοπής και των δύο διακένων κατά το μέγιστο δυνατό (συνολικό βάθος 200cm).

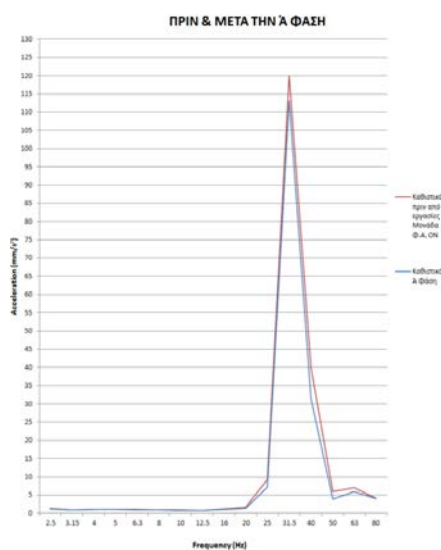
- Δ Φάση. Τοποθέτηση ειδικού αντικραδαστικού υλικού αφρώδους ελαστικού διογκωμένης πολουρεθάνης ημίκλειστων κυψελίδων πάχους 25mm σε κατάλληλη διάταξη κάτω από το container που στεγαζόταν η μονάδα συμπίεσης, όπως ήταν και η αρχική πρόταση προς τον αναθέτη.

#### 4. Αποτελέσματα μετρήσεων

Αρχικά, καθορίστηκε ποσοτικά η τιμή της επιτάχυνσης στο δυσμενέστερο από τα σημεία εντός της οικίας που αντιμετώπιζε πρόβλημα. Το σημείο αυτό ήταν το καθιστικό του πρώτου ορόφου, όπου συγκεκριμένα μετρήθηκε η τιμή των 120 mm/s<sup>2</sup>. Ακόμα, εντοπίστηκε η συχνότητα συντονισμού στα 31.5 Hz, σε όλα τα σημεία της οικίας και αυτή των 63 Hz πλησίον (20 cm) της μονάδας συμπίεσης ΦΑ.

Η τιμή της επιτάχυνσης μετατράπηκε στην αντίστοιχη ταχύτητα, προκειμένου να συγκριθεί με τα προτεινόμενα όρια της διεθνούς βιβλιογραφίας. Διαπιστώθηκε πως η μετρηθείσα ταχύτητα 0.606 mm/sec ξεπερνούσε κατά πολύ το όριο που αφορά τις κατοικίες που διαβιών μόνιμα άνθρωποι ήτοι 0.203 mm/sec για μέρα κι 0.142 mm/sec για νύκτα [1].

##### 4.1 Α Φάση

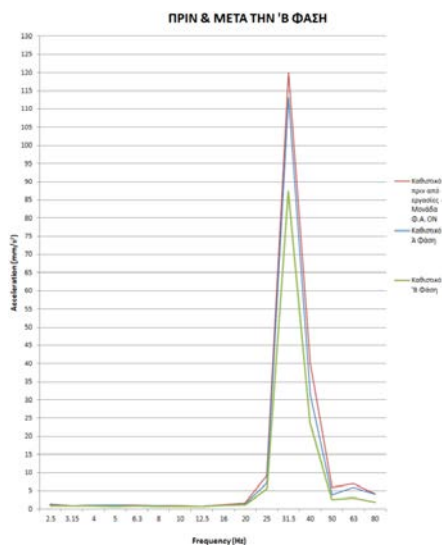


Διάγραμμα 4.3 Μετρήσεις στο καθιστικό της οικίας πριν και μετά την Α Φάση επεμβάσεων

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.1, στο δυσμενέστερο σημείο των μετρήσεων η πρώτη φάση επεμβάσεων είχε ελάχιστο αντίκτυπο στο μετρούμενο μέγεθος. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε ήταν 113 mm/s<sup>2</sup>, δηλαδή 7 mm/s<sup>2</sup> λιγότερα από την προηγούμενη μέτρηση, στην δεσπόζουσα συχνότητα των 31.5 Hz.

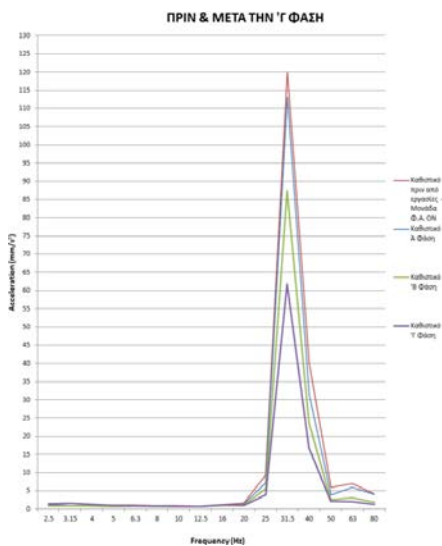
##### 4.2 Β Φάση

Στην φάση αυτή παρατηρήθηκε μια μείωση της τάξης των  $25 \text{ mm/s}^2$  στο επίπεδο της επιτάχυνσης των κραδασμών λόγω της αποκοπής της πλάκας σκυροδέματος. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε στο δυσμενέστερο σημείο ήταν  $88 \text{ mm/s}^2$ , η οποία όμως ήταν ακόμα εκτός των προτεινόμενων βιβλιογραφικών ορίων. Κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω μείωση των κραδασμών.



Διάγραμμα 4.2 Μετρήσεις στο καθιστικό της οικίας πριν και μετά την 'B' Φάση επεμβάσεων

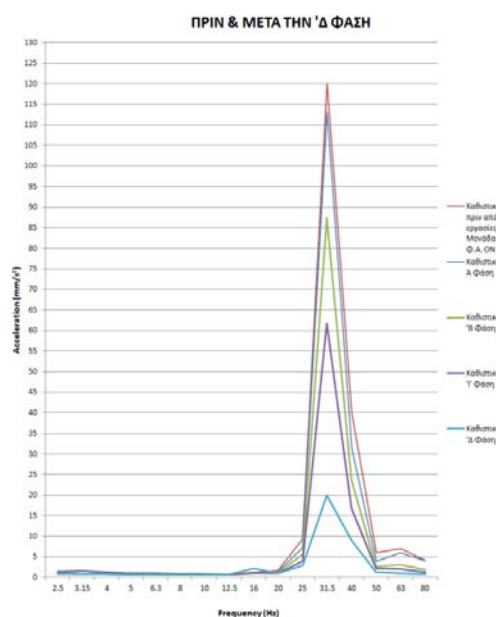
#### 4.3 'Γ' Φάση



Διάγραμμα 4.3 Μετρήσεις στο καθιστικό της οικίας πριν και μετά την 'Γ' Φάση επεμβάσεων

Η βελτίωση της ζυγοστάθμισης του συμπίεστη σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη κατά βάθος διάνοιξη της αποκοπής της πλάκας, είχε ως αποτέλεσμα την μείωση κατά 26 mm/s<sup>2</sup> της μετρηθείσας επιτάχυνσης. Πάλι όμως η τιμή των 62 mm/s<sup>2</sup> ήταν εκτός ορίων, γεγονός που οδήγησε στην τελική απόφαση εκ μέρους του αναθέτη για την εκ νέου έδραση του συγκροτήματος της μονάδας συμπίεσης ΦΑ σύμφωνα με τις αρχικές μας προτάσεις.

#### 4.4 ΈΔ Φάση



Διάγραμμα 4.4 Μετρήσεις στο καθιστικό της οικίας πριν και μετά την ΈΔ Φάση επεμβάσεων – Συγκριτικό όλων των επεμβάσεων

Οι τιμές των μετρήσεων επιτάχυνσης είναι πλέον αρκετά χαμηλές και κρίνονται αποδεκτές σε σχέση με τα βιβλιογραφικά όρια. Συγκεκριμένα η έδραση της μονάδας συμπίεσης ΦΑ σε αντικραδασμικό επέφερε μείωση της επιτάχυνσης κατά 42 mm/s<sup>2</sup>, μιας και η μετρούμενη τιμή ήταν 20 mm/s<sup>2</sup>. Η μείωση αυτή ήταν μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή από όλες τις προηγούμενες φάσεις και φαίνεται κι εποπτικά στο Διάγραμμα 4.4 και τον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Οι μετρήσεις συγκεντρωτικά στο καθιστικό της οικίας

Φάσεις Επεμβάσεων	Επιτάχυνση στα 31.5 Hz [mm/s <sup>2</sup> ]	Ταχύτητα στα 31.5 Hz [mm/s]
Πριν τις επεμβάσεις	120	0.606
Α Φάση	113	0.571
Β Φάση	88	0.445
Γ Φάση	62	0.313
Δ Φάση	20	0.101

## 5. Συμπεράσματα

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων και κάνοντας χρήση της βιβλιογραφίας εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- (1) Τα επίπεδα κραδασμών στον δέκτη (εντός της οικίας), συσχετίζονται άμεσα με την λειτουργία της μονάδας συμπίεσης ΦΑ του παρακείμενου πρατηρίου. Συγκεκριμένα δε, από συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η κύρια επί μέρους πηγή είναι ο εμβολοφόρος συμπιεστής τριών σταδίων.
- (2) Η συχνότητα συντονισμού στην οποία έπρεπε να επιτευχθεί μείωση των δονήσεων ήταν εμφανώς τα 31.5 Hz στον δέκτη και τα 63 Hz στην πηγή, συχνότητες που εξαρτώνται κυρίως από το γεωλογικό υπόβαθρο, ιδιότητες των επιμέρους δομικών υλικών και λοιπές συνθήκες του πεδίου [4].
- (3) Ο στερεόφερτος θόρυβος και συγκεκριμένα η ταχύτητα που προέκυψε, ξεπερνούσε κατά πολύ (~ 4,3 φορές στο βασικό σημείο ενδιαφέροντος) το κριτήριο για την ακουστική άνεση των ανθρώπων εντός κτηρίων διαμονής, που αναφέρεται στο εγχειρίδιο «ASHRAE-HANDBOOK-Sound-and-Vibration-Control» [1].
- (4) Η τελική επιτευχθείσα μείωση των κραδασμών κρίνεται ιδιαίτερα υψηλή (~ 6 φορές στο βασικό σημείο ενδιαφέροντος), ειδικά κατά την 'Δ Φάση των αντικραδασμικών εργασιών, όπου και σημειώθηκε η μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή μείωση των μετρούμενων επιταχύνσεων. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η αποτελεσματικότητα των μέτρων που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση των κραδασμών, είναι σαφώς μεγαλύτερη όσο πιο κοντά στην πηγή λαμβάνονται, και πως η επιλογή έδρασης της μονάδας πάνω σε ειδικό υλικό αφρώδους ελαστικού διογκωμένης πολυουρεθάνης ημίκλειστων κυψελίδων ήταν αυτή που ουσιαστικά προσέφερε την εντυπωσιακά υψηλή μείωση των μετρούμενων επιπέδων κραδασμών.

## 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)

[4] Güllü, A. & Hasanoglu, S. “A statistical investigation to determine dominant frequency of layered soil profiles” Turkish Journal of Engineering, 6, 95-105 (2022)



## **Υπολογιστικός προσδιορισμός πηγών θορύβου από ηχομετρήσεις κανονικής λειτουργίας βιομηχανικών εγκαταστάσεων**

Σ. Μουζακίτης  
Δρ Μηχανολόγος  
Μηχανικός, Τεχνικός  
Δ/ντης Group Science  
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι  
smouzak@groupscience.gr  
210 8053121

Γ. Χαραλαμπίδης  
Δρ Μηχανολόγος  
Μηχανικός, Γενικός  
Δ/ντης Group Science  
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι  
charal@groupscience.gr  
210 8053121

Μ. Καλογεράκου  
Υπ. Δρ Πολιτικός  
Μηχανικός  
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι  
m.kalog@groupscience.gr  
210 8053121

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία ασχολείται με τον προσδιορισμό της ηχητικής ισχύος κάθε μίας από πολλαπλές πηγές βιομηχανικού θορύβου από ηχομετρήσεις πίεσης που έχουν ληφθεί στην κανονική λειτουργία μιας σύνθετης εγκατάστασης. Παρουσιάζεται μία αριθμητική μέθοδος που συνδέει δεδομένα ηχητικής πίεσης σε διάφορα σημεία του εξεταζόμενου πεδίου με τις άγνωστες ισχύεις των πηγών και υπολογίζει τις τελευταίες μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης. Μπορεί έτσι να προσδιοριστεί η στάθμη ακουστικής πίεσης σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου καθώς και η ηχοέκθεση των εργαζομένων ώστε να προταθούν τα βέλτιστα μέτρα ηχομόνωσης. Η εργασία παρουσιάζει την εφαρμογή σε μία πραγματική βιομηχανική γραμμή παραγωγής, στην οποία τεκμηριώνεται τόσο η ακρίβεια της μεθόδου όσο και η αποτελεσματικότητα της συνολικής στρατηγικής.*

### ***Computational determination of noise sources from sound measurements in industrial facilities during normal operation***

#### **ABSTRACT**

*This research deals with the determination of sound power levels for each one of multiple sound sources based on sound pressure measurements taken during normal operation of complex industrial facilities. The numerical method presented correlates the data from sound pressure measurements at various points with the unknown sound power levels and calculates the latter through numerical optimization. It is thus possible to determine the sound pressure levels at any point in the examined space as well as the sound exposures of operators in order to propose the optimal noise control measures. The effectiveness of the method is demonstrated through a real case study realized for an industrial production line.*

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στον υπολογισμό της ηχητικής ισχύος κάθε μίας από πολλαπλές πηγές βιομηχανικού θορύβου βάσει ηχομετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας μιας σύνθετης εγκατάστασης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα απαντάται σε περιπτώσεις αντιμετώπισης πηγών βιομηχανικού θορύβου οι οποίες δεν λειτουργούν απομονωμένα, όπου θα μπορούσε να προσδιοριστεί απλά η ισχύς τους, αλλά συνδυασμένα με άλλες πηγές θορύβου, όπως συχνά συμβαίνει σε πολύπλοκες γραμμές παραγωγής βιομηχανικών χώρων. Ως αποτέλεσμα, οι ηχομετρήσεις που πραγματοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη σύνθεση πολλαπλών επιδράσεων από πηγές θορύβου - μηχανήματα στο εκάστοτε σημείο ηχομέτρησης.

Προκύπτει επομένως η ανάγκη εύρεσης μιας μεθοδολογίας που επιτυγχάνει τον διαχωρισμό των πηγών και συγκεκριμένα τον υπολογισμό της ισχύος κάθε πηγής, ώστε να είναι δυνατός στη συνέχεια ο σχεδιασμός μίας αξιόπιστης και οικονομικής λύσης ηχομόνωσης για όποιες από αυτές διαπιστωθεί πως απαιτείται. Για το σκοπό αυτό η εν λόγω εργασία προτείνει μία νέα αριθμητική μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί τα δεδομένα συνόλου ηχομετρήσεων σε διάφορα σημεία ενός εξεταζόμενου πεδίου σε συνδυασμό με τις μοντελοποιημένες σχέσεις που συνδέουν την άγνωστη ισχύ κάθε πηγής με την ηχοστάθμη κάθε σημείου μέτρησης.

Έχοντας υπολογίσει την ισχύ των πηγών, γίνεται εφικτή η επίλυση του προβλήματος ηχοπροστασίας, εφόσον είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της στάθμης ακουστικής πίεσης σε οποιοδήποτε σημείο του εξεταζόμενου πεδίου και σε οποιοδήποτε σενάριο λειτουργίας των πηγών. Προσδιορίζονται έτσι με τον πλέον αποδοτικό τρόπο τα βέλτιστα μέτρα ηχομόνωσης για την προστασία των εργαζομένων. Συγκεκριμένα, στην εν λόγω εργασία παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου σε μία πραγματική βιομηχανική γραμμή παραγωγής με χειριστή 8-ωρης βάρδιας, στην οποία τεκμηριώνεται τόσο η ακρίβεια της ίδιας της μεθόδου στον προσδιορισμό των πραγματικά σημαντικών πηγών θορύβου προς ηχομόνωση όσο και η αποτελεσματικότητα της συνολικής στρατηγικής για την ηχοπροστασία του χειριστή.

Η αντιμετώπιση του συνολικού προβλήματος απαιτεί την υλοποίηση μελέτης τεσσάρων βασικών σταδίων: 1) Μετρήσεις ηχητικών εκπομπών μηχανής και υποσυστημάτων, 2) υπολογισμός ηχομονωτικών μέτρων, 3) διερεύνηση εργονομίας και 4) χάραξη σχεδίων και προδιαγραφών εφαρμογής. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται μόνο στα στάδια που αφορούν την ακουστική πλευρά του προβλήματος.

Σχετικά με το είδος των μετρήσεων και τους αντίστοιχους δείκτες θορύβου και ηχοέκθεσης των εργαζομένων ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) έχει δημοσιεύσει το πρότυπο ISO 9612: 2009 (ISO, 2009), το οποίο προτείνει τρεις διαφορετικές στρατηγικές για την εκτίμηση της επαγγελματικής ημερήσιας έκθεσης στο θόρυβο, καθώς και τη σχετική αβεβαιότητα [1]. Οι στρατηγικές αυτές αναφέρονται ως εξής: The Task Based Measurement (TBM), the Job Based Measurement (JBM) and the Full Day Measurement (FDM). Κατά την εφαρμογή της πρώτης στρατηγικής, καθορίζεται ο χρόνος εργασιών κατά τη διάρκεια της ημέρας των εργαζομένων και μετριέται η ισοδύναμη στάθμη  $L_{p,A,eqT,m}$ . Σύμφωνα με την σταθμισμένη καμπύλη-A υπολογίζεται η συμβολή του θορύβου κάθε εργασίας

στο ημερήσιο επίπεδο ηχοέκθεσης. Η στρατηγική JBM περιλαμβάνει ένα σχέδιο μετρήσεων, καθορίζοντας τον αριθμό, τη διάρκεια και τη κατανομή των μετρήσεων σε μια ομογενοποιημένη ομάδα εργαζομένων όπου προσδιορίζεται το ημερήσιο επίπεδο έκθεσης στο θόρυβο και η αντίστοιχη εκτίμηση αβεβαιότητας. Η στρατηγική FDM συνεπάγεται μία ημερήσια μέτρηση ηχοέκθεσης του εργαζομένου στο θόρυβο. Η πρώτη στρατηγική υλοποιείται έχοντας ως εξοπλισμό δύο ηχόμετρα, ενώ οι υπόλοιπες απαιτούν δύο ηχοδοσίμετρα. Οι τρόποι αντιμετώπισης του θορύβου στον εργασιακό χώρο ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις ηχομείωσης και εργονομίας [2].

Η μεθοδολογία της παρούσας εργασίας δίνει επίγνωση ως προς τις πραγματικές επιδράσεις των δομών μιας εγκατάστασης στην ηχοέκθεσης των εργαζομένων εφ' όσον η γνώση της ισχύος κάθε πηγής θορύβου επιτρέπει τον προσδιορισμό της στάθμης ηχητικής πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου, άρα και στις θέσεις εργασίας. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία όταν πρέπει να καθοριστούν υπολογιστικά, χωρίς σημαντικά κόστη, τεχνο-οικονομικά βέλτιστες επεμβάσεις για την επιχείρηση.

## 1. Περιγραφή μεθόδου

Η αριθμητική μέθοδος επίλυσης που προτείνεται βασίζεται στη συσχέτιση της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ένα χώρο με μία ή περισσότερες ισχύεις πηγών θορύβου. Μια απλή προσέγγιση χρησιμοποιεί τη θεωρία ανάπτυξης ήχου σε κλειστούς χώρους [3]. Σύμφωνα με τη θεωρία, η στάθμη πίεσης σε ένα κλειστό χώρο όπου υπάρχει σημειακή πηγή στάθμης ισχύος  $L_w$  σε απόσταση  $r$  από αυτήν, δίνεται από τη σχέση:

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_c} \right) \quad (1.1)$$

όπου:

$Q$ : ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής

$R_c$ : η σταθερά δωματίου (room constant)

Η σταθερά δωματίου δίνεται από τη σχέση:

$$R_c = \frac{s\bar{a}}{1 - \bar{a}} \quad (1.2)$$

όπου  $s$  το σύνολο των εμβαδών των επιφανειών που ορίζουν το χώρο, και  $\bar{a}$  ο μέσος συντελεστής ηχοαπορρόφησης. Ο χρόνος αντήχησης  $T$  με την σταθερά δωματίου, συνδέονται με την εξής σχέση:

$$R_c = \frac{V}{\frac{T}{0.16} - \frac{V}{s}} \quad (1.3)$$

όπου  $V$  ο όγκος του δωματίου.

Αν έχουμε  $N$  πηγές θορύβου, η συνολική ηχοστάθμη σε κάθε σημείο υπολογίζεται από το ενεργειακό άθροισμα των  $i$  συνιστωσών:

$$L_{p,total} = 10 \log \sum_{i=0}^N 10^{0.1 \left( L_{w,i} + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r_i^2} + \frac{4}{R_c} \right) \right)} \quad (1.4)$$

Μπορεί έτσι να καταρτιστεί ένα σύστημα  $M$  εξισώσεων από τις ηχομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, διαθέτουμε  $M$  τιμές για τα  $L_{p,total}$ , με γνωστές αποστάσεις  $r_{i,j}$  μεταξύ της  $i$  πηγής θορύβου και της  $j$  θέσης μέτρησης. Η ισχύς  $L_{w,i}$  της  $i$  πηγής θορύβου είναι οι παράμετροι που επιθυμούμε να υπολογίσουμε, ενώ η σταθερά δωματίου  $R_c$ , μπορεί, είτε να υπολογιστεί βάσει των χαρακτηριστικών του χώρου (εξ. (1.2)), είτε να μετρηθεί μέσω της αντήχησης (εξ. (1.3)), είτε να θεωρηθεί ότι ανήκει στους αγνώστους του συστήματος.

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό  $x_i = 10^{\frac{L_{w,i}}{10}}$  καταλήγουμε σε ένα σύστημα το οποίο είναι γραμμικό ως προς τους αγνώστους  $x_i$ :

$$b_j = \sum_{i=0}^N x_i a_{ij} \quad (1.5)$$

όπου  $b_j = 10^{\frac{L_{p,j}}{10}}$  και  $a_{ij} = \frac{Q}{4\pi r_{ij}^2} + \frac{4}{R_c}$ .

Το ανωτέρω σύστημα εξισώσεων, όταν  $N \neq M$ , εισάγεται σε μία αριθμητική μέθοδο βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το σφάλμα (error - διαφορά τετραγώνων) μεταξύ των  $M$  υπολογιζόμενων τιμών  $L_{p,total,optim}$  και των πραγματικά μετρούμενων  $L_{p,total}$ . Από την παραπάνω αριθμητική διαδικασία υπολογίζεται η ισχύς της κάθε μίας από τις  $N$  εξεταζόμενες πηγές θορύβου. Στο τέλος της διαδικασίας ελέγχεται ότι το αριθμητικό σφάλμα μεταξύ των υπολογιζόμενων ηχοσταθμών  $L_{p,total,optim}$  και των μετρούμενων  $L_{p,total}$  είναι πράγματι ικανοποιητικά μικρό.

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι φραγμένο μέσω περιορισμών για τις τιμές των παραμέτρων. Η κάθε ισχύς πρέπει να είναι  $> 0$  και δεν μπορεί να υπερβαίνει την ανώτατη δυνατή τιμή που μπορεί να μετρήσει ένα ηχόμετρο. Αντίστοιχα φραγμένο είναι και το πεδίο τιμών που μπορεί να πάρει η σταθερά δωματίου  $R_c$ .

Έχοντας υπολογίσει την ισχύ κάθε μιας εκ των πηγών, είναι επιπλέον δυνατός ο υπολογισμός της ηχοέκθεσης χειριστών που κινούνται περιμετρικά μιας γραμμής παραγωγής εκτελώντας ένα θεωρούμενο μονοπάτι  $C$  κατά τη διάρκεια της εργασίας τους και του διαλείμματός τους. Η ημερήσια ηχοέκθεσή τους υπολογίζεται από τη μέση ηχοστάθμη κατά μήκος του μονοπατιού:

$$L_{EX,8h} = 10 \log \int_C 10^{\frac{L(s)}{10}} ds \quad (1.6)$$

Η ηχοστάθμη σε κάθε σημείο  $(x,y,z)$  κατά μήκος της καμπύλης  $C$  υπολογίζεται από τη συνισταμένη των επιδράσεων των  $N$  πηγών θορύβου (ισχύος  $L_{w,i}$ ) που προσδιορίστηκε προηγουμένως:

$$L(s) = 10 \log \sum_{i=0}^N 10^{0.1 \left( L_{w,i} + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r_i^2 + R_c} \right) \right)} \quad (1.7)$$

όπου  $r_i$  είναι η απόσταση του σημείου  $(x,y,z)$  από την  $i$  πηγή θορύβου/συνιστώσα.

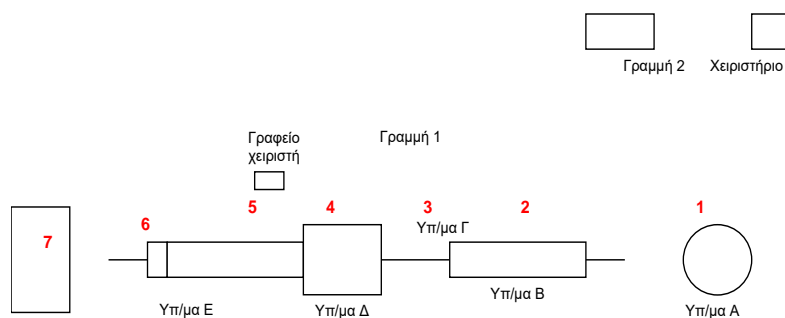
Επισημαίνεται ότι η παραπάνω μέθοδος επίλυσης του προβλήματος διαχωρισμού των πηγών θορύβου είναι πρακτικά ανεξάρτητη του τρόπου υπολογισμού της στάθμης ηχητικής πίεσης. Μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί όποια μέθοδος είναι επιθυμητή, εφόσον αυτή καταλήγει σε σχέσεις που συνδέουν ισχύ με πίεση. Η μέθοδος πρακτικά χρησιμοποιείται για κάθε συχνότητα / συχνοτική μπάντα ενδιαφέροντος.

## 2. Εφαρμογή σε εγκατάσταση

### 2.1 Περιγραφή εξεταζόμενου προβλήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος ηχομόνωσης σε γραμμή παραγωγής εργοστασίου καλωδίων. Σκοπός των ηχομετρήσεων ήταν η ανίχνευση των επί μέρους πηγών θορύβου της γραμμής 1 και η ιεράρχησή τους ώστε να εκτιμηθούν οι δράσεις μείωσης θορύβου.

Κατά την επίσκεψη μετρήθηκε το σύνολο των υποσυστημάτων (Υπ/ματα Α-Ε) σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της γραμμής 1 (βλ. Σχήμα 2.1). Η γραμμή 2 λειτουργούσε ανεξάρτητα και ελήφθη υπόψη ως background noise στο πρόβλημά μας. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία απαλοιφής των θορύβων που δεν είναι μέρος του προβλήματος [4], η επίδραση της γραμμής 1 μπορεί να απομονωθεί, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 2.1.



Σχήμα 2.1 Θέσεις ηχομετρήσεων

Το μέγεθος που μετρήθηκε ήταν η μέση ισοδύναμη συνεχής στάθμη ( $L_{eq}$ ) για το προαναφερόμενο διάστημα της μέτρησης με στάθμιση συχνότητας A ( $L_{Aeq}$ ) και στάθμιση χρόνου F (fast), καθώς και οι αιχμές ηχητικής στάθμης ( $L_{peak}$ ) με στάθμιση συχνότητας C. Το ηχόμετρο πραγματοποιούσε ταυτόχρονα φασματικές αναλύσεις σε 1/3-οκτάβας (1/3-OBA), ωστόσο για λόγους απλότητας στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για τις συνολικές ηχοστάθμες.

## 2.2 Παρουσίαση ηχομετρήσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας με τις μετρήσεις κατά μήκος της γραμμής 1, έχοντας αφαιρέσει το background noise (επίδραση της γραμμής 2), ώστε οι τελικές τιμές να αφορούν μόνο στην επίδραση των συστημάτων της γραμμής 1 στο κάθε σημείο:

Πίνακας 2.1 Ηχοστάθμες κατά μήκος γραμμής 1

No	Σημείο μέτρησης	Total (γραμμή 1&2)	Background (γραμμή 2)	Απομονωμένη γραμμή 1
1	Πλησίον Υπ/ματος Α	90.2	75.2	90.1
2	Πλησίον Υπ/ματος Β	92.8	77.9	92.7
3	Πλησίον Υπ/ματος Γ	90.4	76.8	90.2
4	Πλησίον Υπ/ματος Δ	93.6	77.5	93.5
5	Γραφείο χειριστή	83.6	74	83.1
6	Μπροστά από Υπ/μα Ε	91.5	73.5	91.4
7	Εντός δωματ. τύλιξης	81.0	73.4	80.2

## 2.3 Εφαρμογή βελτιστοποίησης - αποτελέσματα ισχύος πηγών - έλεγχος σφάλματος βελτιστοποίησης

Με βάση τα αποτελέσματα των ανωτέρω μετρήσεων, τις αποστάσεις μεταξύ των πηγών (Υπο/μάτων Α – Ε) και των σημείων μέτρησης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά/ηχοαπορρόφηση του χώρου, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ισοδύναμης ηχητικής ισχύος κάθε μίας από τις ανωτέρω πηγές.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ενότητας 1, καταρτίζεται σύστημα  $M=7$  εξισώσεων για τις  $N=5$  πηγές θορύβου. Το σύστημα έχει ως αντικειμενική συνάρτηση τη διαφορά τετραγώνων μεταξύ των 7 υπολογιζόμενων τιμών  $L_{p,total,optim}$  (εξίσωση (1.1) για  $L_{w,i}$ ,  $i=1-5$ ) και των πραγματικά μετρούμενων  $L_{p,total}$  από τον Πίνακα 2.1, μετασχηματισμένη στην γραμμική μορφή της εξ. (1.5).

Από το σύστημα 7 εξισώσεων που προκύπτουν από τις μετρήσεις θορύβου υπολογίζεται η ισχύς της κάθε μίας από τις ανωτέρω πηγές θορύβου μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης:

$$L_{w1}=103.1\text{dB(A)} \text{ Υπ/μα Α}$$

$$L_{w2}=106.3\text{dB(A)} \text{ Υπ/μα Β}$$

$$L_{w3}=85.6\text{dB(A)} \text{ Υπ/μα Γ}$$

$$L_{w4}=107.4\text{dB(A)} \text{ Υπ/μα Δ}$$

$$L_{w5}=105.1\text{dB(A)} \text{ Υπ/μα Ε}$$

#### 2.4 Προσδιορισμός ηχοέκθεσης χειριστή συναρτήσει της ισχύος των πηγών θορύβου

Με γνωστή την ισχύ κάθε μιας εκ των πηγών υπολογίζεται η ηχοέκθεση χειριστών που κινούνται περιμετρικά της γραμμής 1. Αν θεωρήσουμε ότι οι εργαζόμενοι εκτελούν εργασίες για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα σε συγκεκριμένες θέσεις της γραμμής 1, η ημερήσια ηχοέκθεσή τους υπολογίζεται από την εξίσωση (1.6), μέσω των συσχετισμών της εξ. (1.7).

#### 2.5 Προσδιορισμός συνόλου επεμβάσεων/ηχομειώσεων στις πηγές

Από τις ανωτέρω ηχοστάθμες, τα γεωμετρικά στοιχεία της γραμμής (αποστάσεις πηγών θορύβου από εκάστοτε θέση μέτρηση) και τους χρόνους έκθεσης του χειριστή στο κάθε σημείο, εξετάζονται σενάρια ηχομείωσης των πηγών. Στόχος είναι η μείωση της ημερήσιας ηχοέκθεσης του χειριστή της γραμμής 1 σε επίπεδα κάτω των 85dB(A).

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα φάνηκε ότι οι κύριες πηγές θορύβου είναι τα υποσυστήματα Β,Δ, Ε. Έτσι, **σχεδιάζεται η υλοποίηση επεμβάσεων μείωσης θορύβου με ιεράρχηση τις σημαντικότερες πηγές θορύβου με στόχο την τεχνο-οικονομικά βέλτιστη λύση.** Έτσι, εφαρμόζοντας το ακόλουθο σύστημα ηχομειώσεων:

- $\Delta L_{w2} = 5\text{dB}$  (βιομηχανικός κλωβός σε Υπ/μα Β)
- $\Delta L_{w4} = 10\text{dB}$  (ηχομονωτικά ρολά σε Υπ/μα Δ)
- $\Delta L_{w5} = 5\text{dB}$  (ηχομονωτικό κάλυμμα σε Υπ/μα Ε)

η ηχοέκθεση του χειριστή της γραμμής 1 υπολογίζεται  $L_{EX,shr}=84.1\text{dB(A)}$ .

#### 2.6 Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου μετά την υλοποίηση ηχομονωτικών επεμβάσεων

Μετά την ολοκλήρωση των κατασκευών ηχομόνωσης πραγματοποιήθηκαν ηχομετρήσεις τεκμηρίωσης του αποτελέσματος, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια. Γίνεται φανερή η αποτελεσματική μείωση της ηχοστάθμης πλησίον της γραμμής 1 αλλά και στο γραφείο του χειριστή που εξασφαλίζουν αποδεκτά χαμηλή ηχοέκθεση, όπως είχε προβλεφθεί.

Πίνακας 2.2 Αποτελέσματα ηχομετρήσεων μετά την ηχομόνωση

Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου προ παρεμβάσεων		Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου μετά τις προτεινόμενες παρεμβάσεις	
Θέση - Περιγραφή	$L_{eq}$ [dB(A)]	Θέση - Περιγραφή	$L_{eq}$ [dB(A)]
Μέτρηση πλησίον Υπ/ματος Β	<b>92.8</b>	Μέτρηση πλησίον Υπ/ματος Β	81.6
Μέτρηση στο γραφείο χειριστή Γραμμής 1	<b>83.6</b>	Μέτρηση στο γραφείο χειριστή Γραμμής 1	79.9

### 3. Σύνοψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το πρόβλημα του προσδιορισμού της ηχητικής ισχύος κάθε μίας από πολλαπλές πηγές βιομηχανικού θορύβου από ηχομετρήσεις που έχουν ληφθεί σε κανονική λειτουργία μιας σύνθετης εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, προτείνεται μία αριθμητική μέθοδος η οποία συσχετίζει τις μετρήσεις ηχητικής πίεσης που έχουν ληφθεί σε διάφορα σημεία του εξεταζόμενου πεδίου με τις άγνωστες ισχύεις των πηγών, και υπολογίζει τις τελευταίες μέσω αριθμητικής βελτιστοποίησης. **Επισημαίνεται ότι η παραπάνω μέθοδος είναι ανεξάρτητη του τρόπου υπολογισμού της στάθμης ηχητικής πίεσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε συχνότητα / συχνοτική μπάντα ενδιαφέροντος.** Έχοντας γνωστή την ισχύ των πηγών μπορεί να προσδιοριστεί η ηχοέκθεση εργαζομένων και να προσδιοριστούν τα βέλτιστα μέτρα ηχομόνωσης για την προστασία τους. Για την καλύτερη τεκμηρίωση της ακρίβειας της μεθόδου και την αποτελεσματικότητας της συνολικής στρατηγικής, στην παρούσα εργασία συμπεριλαμβάνεται μία εφαρμογή σε πραγματική βιομηχανική γραμμή παραγωγής με χειριστή 8-ωρης βάρδιας.

Από την ανωτέρω ανάλυση συμπεραίνεται ότι η παραπάνω μεθοδολογία προσδιορισμού ηχητικής ισχύος οδηγεί στην επιτυχή αντιμετώπιση βιομηχανικού θορύβου με **τον βέλτιστο τεχνο-οικονομικά τρόπο**, καθώς καθιστά δυνατό **τον περιορισμό των παρεμβάσεων μόνο στις κύριες πηγές θορύβου**, χωρίς να απαιτεί εγκλεισμό όλης της γραμμής παραγωγής. Παράλληλα, επιτρέπει την πραγματοποίηση της ανάλυσης και τον σχεδιασμό μέτρων βελτίωσης **χωρίς την ανάγκη διαχωρισμού των πηγών σε 'ελεγχόμενες συνθήκες ON/OFF'**, κάτι το οποίο θα είχε σημαντικό λειτουργικό και οικονομικό κόστος για την βιομηχανία ή θα ήταν ανέφικτο.

### 4. Αναφορές

[1] Pedro M. Arezes, C.A. Bernardo, Olga A. Mateus «Measurement strategies for occupational noise exposure assessment: A comparison study in different industrial environments», *International Journal of Industrial Ergonomics* **42** 172-177 (2012)

[2] Professor Colin H. Hansen, Dr Berenice I.F. Goelzer *ENGINEERING NOISE CONTROL* Department of Mechanical Engineering World Health Organization, University of Adelaide (1996)

[3] Δ. Σκαρλάτος *Εφαρμοσμένη Ακουστική - Ηχοπροστασία* 5<sup>η</sup> έκδοση (2018)

[4] Γ. Χαραλαμπίδης, Σ. Μουζακίτης, Γ. Μπαμπάνης, «Σχεδιασμός και κατασκευή ηχομονωτικού κλωβού βιομηχανικής μηχανής παραγωγής με πολλαπλά υποσυστήματα», 8<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ακουστικής, Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής (2016)



## ***Η προστασία από τις εκπομπές θορύβου μουσικής των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος μέσα από τη νομολογία***

Νίκη Τσαφούρου - Δικηγόρος  
LLM Εμπορικού & Δημοσίου Δικαίου Νομικής Παν/μίου Αθηνών  
LLM Droit Public Université Montesquieu Bordeaux IV  
MSc Περιβάλλον και Ανάπτυξη ΕΜΠ  
Φειδιππίδου 12, Αμπελόκηποι, Αθήνα - [nikktaf@gmail.com](mailto:nikktaf@gmail.com) - 6972743712

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ηχορρύπανση από μουσική των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος συνιστά διαταρακτικό της ομαλής κοινωνικής συμβίωσης φαινόμενο και ως τέτοιο έχει παράξει σχετική νομοθεσία τόσο ιδιωτικού όσο και δημοσίου δικαίου: Μέσω αυτής προστατεύονται τα επιμέρους ιδιωτικά δικαιώματα κατά της ηχορρύπανσης καθώς και το αντίστοιχου περιεχομένου δημόσιο συμφέρον. Η ερμηνεία και εφαρμογή της νομοθεσίας αυτής προσφέρεται από τη νομολογία. Έτσι, γίνεται κωδικοποίηση της νομοθεσίας καθώς και αναφορά στον τρόπο ερμηνείας και εφαρμογής της μέσα από τη νομολογία. Επί της υφιστάμενης νομοθεσίας και νομολογίας συνάγονται συμπεράσματα σχετικά με το επαρκές και ικανοποιητικό της νομικής κάλυψης του προβλήματος.*

### ***Legal protection against noise pollution coming from food stores using music (restaurants, pubs, bars, cafes) in the light of the jurisprudence***

### **ABSTRACT**

*Noise pollution from food stores (restaurants, pubs, bars, cafés) during their function and provision of services when using music, is a frequent phenomenon disturbing the peace and quiet of individuals all around the area and also causing problems to social coexistence. As a phenomenon of a dual nature, it is faced by our legal order through both private and public law. The interpretation and application of this legislation is provided by the jurisprudence (case law). Thus, this work includes the whole existing legislation, as well as the relevant jurisprudence, and ends with conclusions on that legislation and jurisprudence.*

### **Εισαγωγή**

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής και η κοινωνικότητα περιστρέφονται γύρω από τη λειτουργία καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος (καφετέριες, αναψυκτήρια, εστιατόρια, κέντρα διασκέδασης), τα οποία παρέχουν υπηρεσίες με χρήση μουσικής δημιουργώντας συχνά πρόβλημα ηχορρύπανσης. Η τελευταία λογίζεται ως εκπομπή «υπερβολικού» θορύβου, ήτοι θορύβου «που υπερβαίνει τα όρια», κάτι που κρίνεται από το εάν αυτός διαταράσσει την ομαλή κοινωνική συμβίωση, γεννώντας ιδιωτικές διαφορές ή προσβάλλοντας το δημόσιο συμφέρον. Αντίστοιχα, υπάρχει πρόβλεψη νομοθεσίας ιδιωτικού και δημοσίου δικαίου, για την προστασία των βλαπτόμενων ιδιωτικών δικαιωμάτων και του βλαπτόμενου δημοσίου συμφέροντος. Η νομοθεσία δημιουργεί δικαστηριακή ύλη, φερόμενη ενώπιον των δικαστηρίων προς εφαρμογή και ερμηνεία. Υπό το πρίσμα αυτών συνάγονται συμπεράσματα.

### **1. Πραγματικές περιπτώσεις ηχορρύπανσης από καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος**

Σύμφωνα με την εγκύκλιο ΥΜ/3131/89 του Υπουργείου Υγείας [9,11] αλλά και με τη νομολογία [1,2,4] το μεγαλύτερο μέρος των ενοχλήσεων οφείλεται στις περιπτώσεις καταστημάτων που α) στερούνται άδειας λειτουργίας (πλέον γνωστοποίησης λειτουργίας) [4] ή άδειας λειτουργίας με μουσική (πλέον γνωστοποίησης χρήσης μουσικής) [2], β) τροποποιούν αυθαίρετα τις συνθήκες ή τις ώρες λειτουργίας τους [2], γ) παραβιάζουν το ανώτατο όριο της επιτρεπομένης ηχοστάθμης (παράβαση υγειονομικής νομοθεσίας) [1]. Επίσης, σύμφωνα με τον Σνήγορο του Πολίτη [10] αλλά και τη νομολογία [1,2,4,5], το πρόβλημα υφίσταται και όταν δ) γίνεται υπέρβαση του νόμιμου ωραρίου λειτουργίας μουσικής (παράβαση διατάξεων κοινής ησυχίας) [1], ε) τα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος λειτουργούν με ανοιχτές πόρτες και παράθυρα [2], στ) τοποθετούνται ηχεία σε εξωτερικούς (υπαίθριους) χώρους των καταστημάτων, υπάρχουν αυθαίρετες κατασκευές σε κοινόχρηστους χώρους [4], ζ) παρατηρείται υπερσυγκέντρωση καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος σε συγκεκριμένες περιοχές [5].

### **2. Νομοθεσία προστασίας από την ηχορρύπανση - ιδιωτικό δίκαιο - απευθείας προστασία σχετικών ιδιωτικών δικαιωμάτων - δυνατότητες ιδιωτών**

Στη διάθεση του θιγόμενου από την ηχορρύπανση βρίσκεται το ασφαλιστικό μέτρο της προσωρινής ρύθμισης κατάστασης, με το οποίο μπορεί να ζητήσει να αρθεί η προσβολή της κυριότητας-νομής ή της προσωπικότητας και να μην επαναληφθεί στο μέλλον. Επειδή όμως το ασφαλιστικό μέτρο της προσωρινής ρύθμισης κατάστασης δεν μπορεί εκ φύσεως να ικανοποιήσει πλήρως το επίδικο δικαίωμα, παρά μόνο να το εξασφαλίσει και να το διατηρήσει προσωρινά (άρθρο 692 παρ. 4ΑΚ), θα πρέπει ο θιγόμενος να ασκήσει στη συνέχεια τακτική αγωγή βάσει του άρθρου 57ΑΚ (δικαίωμα στην προσωπικότητα) ή των άρθρων 1003ΑΚ [και 3 του ν. 3741/1929 αν πρόκειται για οροφοκτησία] (περιορισμοί κυριότητας) και 989ΑΚ (αγωγή διατάραξης της νομής) ή 1003ΑΚ (περιορισμοί κυριότητας) και 1108ΑΚ

(αγωγή διατάραξης της κυριότητας), ώστε να επιλυθεί οριστικά η διαφορά. Σημειωτέον ότι, προσθετικά προς τα παραπάνω άρθρα μπορεί αναλόγως να γίνει επίκληση και των άρθρων 914ΑΚ (αδικοπραξία) και 59ΑΚ (ικανοποίηση ηθικής βλάβης), τηρουμένων των προϋποθέσεών τους και στο πλαίσιο τακτικής πάντα αγωγής. Και στην περίπτωση της αίτησης του ασφαλιστικού μέτρου της προσωρινής ρύθμισης κατάστασης και στην περίπτωση της τακτικής αγωγής, το δικαστήριο μπορεί να διατάξει την άρση της προσβολής και την παράλειψή της στο μέλλον καθώς και να επιβάλει χρηματική ποινή εις βάρος του εναγομένου στην περίπτωση που δεν συμμορφώνεται εκουσίως προς την απόφαση που διατάσσει την άρση της προσβολής ή την παράλειψή της στο μέλλον. Επίσης, το δικαστήριο μπορεί να επιβάλει και προσωπική κράτηση σε βάρος του εναγομένου στην περίπτωση παραβίασης της απόφασης και εξακολούθησης της παράνομης συμπεριφοράς. Τέλος, η απόφαση επί της τακτικής αγωγής μπορεί να επιδικάζει και αποζημίωση στην περίπτωση που η προσβολή θεωρηθεί αδικοπραξία με συνέπεια την περιουσιακή ζημία ή την ηθική βλάβη του ενάγοντος.

### **3. Νομοθεσία προστασίας από την ηχορρύπανση - δημόσιο δίκαιο (ποινικό και διοικητικό) - δημόσιο συμφέρον και ομαλή κοινωνική συμβίωση**

-Υπουργική Απόφαση - Υγειονομική Διάταξη (ΥΔ) Α5/3010/85 «Μέτρα προστασίας της Δημόσιας Υγείας από θορύβους μουσικής των κέντρων διασκέδασης και λοιπών καταστημάτων» (άρθρα 4 και 10 της Υγειονομικής Διάταξης, με το άρθρο 10 αλλαγμένο βάσει του άρθρου 37 παρ. 3 ν. 4055/12) που αναφέρεται στα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια εκπεμπόμενου ήχου σε ντεσιμπέλ. Στο άρθρο 4 της Υγειονομικής Διάταξης καθορίζονται ως μέγιστη επιτρεπόμενη ηχοστάθμη τα 100 dB για τα κέντρα διασκέδασης και τα 80 dB για τα λοιπά καταστήματα με μουσική. Στο άρθρο 10 της Υγειονομικής Διάταξης (όπως αυτό αντικαταστάθηκε με το άρθρο 37 παρ. 3 του ν. 4055/12) προβλέπεται ως κύρωση, για την περίπτωση της παράβασης της μέγιστης επιτρεπόμενης ηχοστάθμης, φυλάκιση μέχρι 1 έτος και χρηματική ποινή τουλάχιστον 5.000 ευρώ (πλημμέλημα).

-Άρθρο 417 ΠΚ και Αστυνομική Διάταξη 3/1995 (ΦΕΚ Β 15/12.1.1996) για τα μέτρα τήρησης κοινής ησυχίας κατά σχετικής διατάραξης, με τις πρόσφατες αλλαγές του ν. 4442/2016 «Νέο θεσμικό πλαίσιο για την άσκηση οικονομικής δραστηριότητας και άλλες διατάξεις» και του άρθρου 10 του ν. 4637/2019 «Τροποποιήσεις Ποινικού Κώδικα, Κώδικα Ποινικής Δικονομίας και συναφείς διατάξεις».

-Άρθρο 232Α ΠΚ για τη μη συμμόρφωση προς το περιεχόμενο δικαστικής απόφασης (λόγου χάριν προς το περιεχόμενο προσωρινής διαταγής ή απόφασης ασφαλιστικών μέτρων που διατάσσουν άρση της ηχορρύπανσης και παράλειψή της στο μέλλον προς όφελος του βλαπτόμενου εξ αυτής). Το εν λόγω αδίκημα συνιστά πλημμέλημα. Εδώ, προκύπτει η υποστηρικτική συμβολή του δημοσίου δικαίου στην άσκηση και ικανοποίηση των ιδιωτικών δικαιωμάτων.

-Άρθρα 417 επ. του ΚΠΔ για εφαρμογή της αυτόφωρης διαδικασίας σε όλα τα πλημμελήματα. Αυτό το άρθρο συνδυάζεται, λόγου χάριν με την παραβίαση των ανώτατων επιτρεπόμενων ντεσιμπέλ ή την παραβίαση κοινής ησυχίας ή τη μη

συμμόρφωση προς το περιεχόμενο δικαστικής απόφασης, που συνιστούν πλημμελήματα. Έτσι δε, καθίσταται εφικτή η άμεση παραπομπή του κατηγορουμένου στο ακροατήριο.

-Άρθρο 2 παρ. 2α του π.δ. 180/1979 «Περί των όρων λειτουργίας καταστημάτων πωλήσεως οινοπνευματωδών ποτών και κέντρων διασκεδάσεως» που προβλέπει τη διοικητική κύρωση αφαίρεσης της άδειας του καταστήματος και σφράγισης του για χρονικό διάστημα 10 μέχρι 60 ημερών, εφόσον βεβαιώθηκαν από αστυνομικούς ή άλλα αρμόδια όργανα 3 συνολικά παραβάσεις, εντός έτους των υγειονομικών διατάξεων που καθορίζουν μέτρα προστασίας της Δημόσιας Υγείας από θορύβους μουσικής των κέντρων διασκέδασης και των λοιπών καταστημάτων που επιίτουν στις διατάξεις του διατάγματος, των διατάξεων που ισχύουν κάθε φορά για την κοινή ησυχία, τη λειτουργία μουσικής χωρίς άδεια, την παραβίαση των όρων και προϋποθέσεων της κατεχόμενης άδειας λειτουργίας μουσικής και το ωράριο λειτουργίας του καταστήματος.

-Κοινή Υπουργική Απόφαση οικ. 16228/17.5.2017 (ΦΕΚ Β 1723 2017) «Απλούστευση και προτυποποίηση των διοικητικών διαδικασιών γνωστοποίησης λειτουργίας Καταστημάτων Υγειονομικού Ενδιαφέροντος, Θεάτρων και Κινηματογράφων». Το άρθρο 15 παρ. 2 της ΚΥΑ παραπέμπει στο σημείο α της παραγράφου 2 του άρθρου 2 του π.δ. 180/1979 που προβλέπει τη διοικητική κύρωση προσωρινής αφαίρεσης της άδειας του καταστήματος και σφράγισης του υπό τις προϋποθέσεις που προεκτέθηκαν.

Επίσης, η εν λόγω ΚΥΑ και ο νόμος 4442/2016 αναφέρονται στο νέο καθεστώς της γνωστοποίησης το οποίο αντικαθιστά το καθεστώς της άδειας λειτουργίας. Έτσι, ο ενδιαφερόμενος έχει απλώς την υποχρέωση να γνωστοποιεί τη δραστηριότητά του στην αρμόδια αρχή και να πληροί όλους τους όρους της υπάρχουσας πολεοδομικής, υγειονομικής και πυροσβεστικής νομοθεσίας (άρθρο 3 ΚΥΑ). Και όπου στην υπάρχουσα νομοθεσία προβλέπεται η κύρωση της προσωρινής ή οριστικής αφαίρεσης άδειας λειτουργίας, νοείται εφεξής η προσωρινή ή οριστική διακοπή λειτουργίας για τα καταστήματα που υπόκεινται σε γνωστοποίηση (άρθρο 15 παρ. 1 ΚΥΑ). Η γνωστοποίηση κοινοποιείται από τον Δήμο στην Υπηρεσία Δόμησης, στην Υγειονομική Υπηρεσία, στην Πυροσβεστική Υπηρεσία, στην αρμόδια Υπηρεσία του Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού και στην Αστυνομία, ώστε οι αρχές αυτές να λάβουν γνώση για την έναρξη λειτουργίας του καταστήματος και να είναι σε θέση να ασκήσουν τα ελεγκτικά τους καθήκοντα. Μετά την υποβολή της γνωστοποίησης, το κατάστημα μπορεί να λειτουργήσει νομίμως, υποκείμενο στον έλεγχο των αρχών (άρθρο 6 παρ. 7 ν. 4442/2016). Ας διευκρινιστεί ότι κατά την παραπάνω ΚΥΑ (16228/17.5.2017), ειδικά για τα κέντρα διασκέδασης διατηρείται το καθεστώς της άδειας λειτουργίας και εξακολουθεί να εφαρμόζεται η ΚΥΑ ΔΙΑΔΠ/Φ.Α.2.1/31600/20.11.2013 «Απλούστευση των διοικητικών διαδικασιών έκδοσης άδειας ίδρυσης και λειτουργίας Καταστήματος Υγειονομικού Ενδιαφέροντος, Θεάτρου και Κινηματογράφου».

Η παρ. 1 του άρθρου 7 της ΚΥΑ (16228/17.5.2017) αναφέρεται κι αυτή στο νέο καθεστώς της γνωστοποίησης το οποίο αντικαθιστά επιπλέον και το καθεστώς της άδειας χρήσης μουσικής και μουσικών οργάνων. Έτσι, ο ενδιαφερόμενος γνωστοποιεί σε ειδικό πεδίο της γνωστοποίησης λειτουργίας τη χρήση μουσικής, με προσδιορισμό της μέγιστης Α-ηχοστάθμης, του χώρου κτλ. Μπορεί όμως η

γνωστοποίηση να αφορά και αυτοτελώς τη μουσική και να έπεται της γνωστοποίησης της λειτουργίας του καταστήματος. Σε κάθε περίπτωση, όταν η γνωστοποίηση αφορά έστω εν μέρει μουσική, ο Δήμος, που την παραλαμβάνει, την κοινοποιεί στην Υγειονομική Υπηρεσία και στην Αστυνομία (άρθρο 7 παρ. 1 ΚΥΑ και άρθρο 29 παρ. 1 και 2 ν. 4442/2016). Πριν την αλλαγή του καθεστώτος, για τη χορήγηση της άδειας χρήσης μουσικής απαιτείτο προηγούμενη γνωμοδότηση της Υγειονομικής Υπηρεσίας (άρθρο 5 παρ. 3 ΚΥΑ ΔΙΑΔΠ/Φ.Α.2.1/31600/20.11.2013). Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι το νέο καθεστώς της γνωστοποίησης, κατά την παρ. 3 του άρθρου 7 της ΚΥΑ, δεν αφορά στην περίπτωση της παράτασης του ωραρίου μουσικής, για την οποία εξακολουθεί να ισχύει το καθεστώς της άδειας της παραγράφου 3 του άρθρου 3 της 3/1995 Αστυνομικής Διάταξης περί παράτασης ωραρίου κατά τα οριζόμενα στην παράγραφο 3 του άρθρου 29 του ν. 4442/2016.

Αν παραλειφθεί η γνωστοποίηση, σχετικά είτε με τη λειτουργία καταστήματος είτε με τη χρήση μουσικής και μουσικών οργάνων, επισύρεται διοικητική κύρωση, υπό τη μορφή διοικητικού προστίμου κυμαινόμενου από 100 έως 20.000 ευρώ, κατά το άρθρο 34 παρ. 1 και το άρθρο 15 του ν. 4442/2016. Ενώ, αν γίνει υπέρβαση της άδειας παράτασης του ωραρίου χρήσης της μουσικής, επισύρεται ποινική κύρωση. Μέχρι πρότινος αυτή η ποινική κύρωση συνίστατο σε κράτηση ή πρόστιμο (πταίσμα) με βάση το άρθρο 5 της 3/1995 Αστυνομικής Διάταξης σε συνδυασμό με την παρ. 6 του άρθρου 12 του ν. 1481/1984. Με την τελευταία τροποποίηση του Ποινικού Κώδικα με το άρθρο 10 του ν. 4637/2019, σύμφωνα με την οποία όλες οι παραβάσεις των αστυνομικών διατάξεων της παραγράφου 3 εδάφιο β' του άρθρου 12 του ν. 1481/1984 (οι οποίες ρυθμίζουν θέματα τήρησης κοινής ησυχίας, όπως η 3/1995 Αστυνομική Διάταξη που αναφέρεται στην άδεια παράτασης του ωραρίου χρήσης μουσικής) τιμωρούνται με φυλάκιση έως πέντε μηνών ή χρηματική ποινή έως εκατόν πενήντα ημερήσιες μονάδες, δηλαδή ως πλημμελήματα, η ποινική κύρωση [για τη διατάραξη κοινής ησυχίας] αναβαθμίστηκε, προς ωφέλεια του απλού πολίτη. Έτσι, μπορεί πλέον να ακολουθηθεί και η αυτόφωρη διαδικασία, σύμφωνα με το άρθρο 417 του Κώδικα Ποινικής Δικονομίας, με την άμεση παραπομπή του κατηγορουμένου στο ακροατήριο, όπως ισχύει για τον δράστη οποιουδήποτε πλημμελήματος.

Διευκρινιστικά, η ως άνω προβλεπόμενη διοικητική κύρωση για την παράβαση που σχετίζεται με τη γνωστοποίηση αποκρούει την ποινική κύρωση του ά. 5 της 3/1995 Αστυνομικής Διάταξης (άρθρο 34 παρ. 5 του ν. 4442/2016). Αντιθέτως, η ανυπαρξία διοικητικής κύρωσης για την παράβαση που σχετίζεται με την παράταση μουσικής επιτρέπει την ποινική κύρωση (ως συνάγεται εξ αντιδιαστολής από το άρθρο 34 παρ. 5 του ν. 4442/2016 το οποίο αναφέρεται μόνο στην παράβαση τη σχετιζόμενη με τη γνωστοποίηση).

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι πριν τη γνωστοποίηση λειτουργίας καταστήματος υγειονομικού ενδιαφέροντος απαιτείται, αυτονοήτως, η εύρεση από τον ενδιαφερόμενο κατάλληλου χώρου και η διερεύνηση στην Υπηρεσία Δόμησης του Δήμου της δυνατότητας ίδρυσης του συγκεκριμένου καταστήματος σύμφωνα με τις επιτρεπόμενες χρήσεις γης στη συγκεκριμένη περιοχή. Κατόπιν ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει αίτηση στο Δήμο για χορήγηση βεβαίωσης εγκατάστασης του καταστήματος στη συγκεκριμένη τοποθεσία, ο δε Δήμος από την πλευρά του, για να τη χορηγήσει, ελέγχει προηγουμένως τις επιτρεπόμενες χρήσεις γης και άλλους

περιορισμούς που τίθενται στην κείμενη νομοθεσία ή σε κανονιστικές αποφάσεις του Δήμου (άρθρο 28 ν. 4442/2016) [12].

- Άρθρο 30 του ν. 4442/2016 σε συνδυασμό με το από 24.09/20.10.1958 ΒΔ (ΦΕΚ Α' 171/1958). Για χρήση μουσικής και μουσικών οργάνων σε κοινόχρηστο χώρο, απαιτείται άδεια χρήσης κοινόχρηστου χώρου, η οποία καλό είναι να χορηγείται πριν την γνωστοποίηση της χρήσης μουσικής. Αν παρά ταύτα η γνωστοποίηση χρήσης μουσικής γίνει πριν τη λήψη άδειας χρήσης κοινόχρηστου χώρου, το κατάστημα πρέπει να προβεί στη μεταβολή των στοιχείων που έχουν γνωστοποιηθεί [12]. Ωστόσο, για τη χορήγηση της άδειας χρήσης κοινόχρηστου χώρου δεν ελέγχεται προηγουμένως η πιθανότητα της ηχορρύπανσης από την υπερσυγκέντρωση πχ σε πλατείες, πεζοδρόμια κτλ, ενώ ελέγχονται άλλα πράγματα όπως η ασφάλεια των πεζών, η διακοπή ή παρεμπόδιση της κυκλοφορίας, η αισθητική του κοινόχρηστου χώρου.

- Άρθρο 5 παρ. 1 εδ. β' και γ' ΚΥΑ ΔΙΑΔΠ/Φ.Α.2.1/31600/20.11.2013. Για χρήση μουσικής και μουσικών οργάνων σε υπαίθριο χώρο, σύμφωνα με το παλαιότερο καθεστώς της άδειας, για τη χορήγησή της ο ενδιαφερόμενος έπρεπε να υποβάλει τεχνική έκθεση αρμόδιου μηχανικού, συνοδευόμενη από τοπογραφικό διάγραμμα με τη θέση και τη φορά των ηχείων, η οποία θα τεκμηρίωνε ότι η ισχύς των ηχείων, η θέση, η απόσταση από κατοικίες, καθώς και τα τυχόν ληφθέντα μέτρα ηχοπροστασίας, με μέγιστη Α-ηχοστάθμη 80 db, δεν δημιουργούν προβλήματα στα σημεία προστασίας. Σύμφωνα με το νέο καθεστώς της γνωστοποίησης (άρθρο 7 παρ. 2 ΚΥΑ οικ. 16228/17.5.2017, ΦΕΚ Β 1723 2017), ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να διατηρεί εντός του καταστήματος τεχνική έκθεση μηχανικού με ειδικευση σε θέματα ηχομόνωσης και ακουστικής ή άλλου επιστήμονα σχετικής ειδικότητας, συντασσόμενη με βάση τις υγειονομικές διατάξεις, την οποία να έχει στη διάθεση των ελεγκτικών αρχών. Εξ αντιθέτου συνάγεται ότι όταν η χρήση της μουσικής γίνεται σε κλειστό χώρο δεν χρειάζεται τεχνική έκθεση μηχανικού.

#### **4. Νομικές επισημάνσεις υπό το πρίσμα της νομολογίας**

- Δικαίωμα προσωπικότητας: η απόλαυση ενός ήρεμου περιβάλλοντος ελεύθερου από ρύπους είναι και αυτή μία έκφραση του δικαιώματος επί της προσωπικότητας. Προσβολή ως προς αυτή την πλευρά του όλου δικαιώματος μπορεί να προκαλείται και όταν διαταράσσεται η ωφέλεια από την απόλαυση του φυσικού περιβάλλοντος όσον αφορά την ατμόσφαιρα με την εκπομπή ρύπων, όπως θορύβων (ηχορρύπανση). Εάν η εκπομπή είναι τόσο ισχυρή ώστε να απειλεί και την υγεία των κοινωνιών τότε επέρχεται προσβολή και ως προς μία επιπλέον έκφραση του γενικού δικαιώματος της προσωπικότητας, εκείνης που αφορά το ειδικότερο δικαίωμα στην υγεία. [8]

- Οι προσβολές που επέρχονται με εκπομπή θορύβων είναι πάντα παράνομες όχι μόνο ως κοινωνικά απρόσφορες βλαπτικές πράξεις, αλλά και ως αντικείμενες σε ειδικότερες ρητές απαγορευτικές διατάξεις του νόμου και μάλιστα στο άρθρο 417 ΠΚ περί διαταράξεως ησυχίας και στην 3/1995 Αστυνομική Διάταξη (1023/2/37-ια/1996) που ορίζει τα μέτρα για την τήρηση της κοινής ησυχίας και στην Υγειονομική διάταξη Α5/3010/14.8.1985 (Φ.Ε.Κ. Β' 593). [5] [8]

-Από την αυθαίρετη μετατροπή του είδους του καταστήματος, για το οποίο χορηγήθηκε η άδεια, θεμελιούται λόγος ανάκλησης της άδειας αυτής, σύμφωνα με το διοικητικό δίκαιο. Μπορεί, όμως, η εν λόγω συμπεριφορά να συντρέχει μαζί με την πλήρωση των προϋποθέσεων του ά. 2 παρ. 2α π.δ. 180/1979 το οποίο προβλέπει τη διοικητική κύρωση της προσωρινής αφαίρεσης της άδειας και της σφράγισης του καταστήματος. Σε τέτοια περίπτωση, συνήθως εφαρμόζεται η διοικητική κύρωση έναντι της έκδοσης της δυσμενούς διοικητικής πράξης της ανάκλησης της άδειας [2].

-Η ύπαρξη όχλησης (και διατάραξης στη νομή και κατοχή ακινήτων) δεν εξαρτάται από τη λειτουργία καταστήματος χωρίς ή με βάση νόμιμη άδεια, αλλά από το μη επιτρεπτό και ανεκτό από το νόμο (άρθρ. 1003 Α.Κ.) χαρακτήρα της ίδιας της όχλησης. Έτσι, το ιδιωτικό δίκαιο είναι ανεξάρτητο από το δημόσιο-διοικητικό, πράγμα που αναδεικνύει την σχεδόν περίσσεια προστασία του ιδιώτη βλαπτόμενου [2].

-Ακόμα κι αν ζητείται ακύρωση απόφασης με την οποία επιβλήθηκε προσωρινή αφαίρεση άδειας λειτουργίας καταστήματος υγειονομικού ενδιαφέροντος και σφράγισή του, στη βάση της αθώωσης για σχετικές παραβάσεις ή της θέσης στο αρχείο τέτοιων υποθέσεων λόγω παραγραφής, επειδή η διαδικασία διοικητικής βεβαίωσης της εκάστοτε παράβασης είναι αυτοτελής και διακεκριμένη σε σχέση με την αντίστοιχη ποινική διαδικασία, επειδή δηλαδή η διοικητική δικαιοσύνη δεν δεσμεύεται άνευ όρων από τις αποφάσεις της ποινικής δικαιοσύνης, σε σχέση με τη συνδρομή των προϋποθέσεων του άρθρου 2 παρ. 2 του π.δ. 180/1979, εξακολουθούν να προστατεύονται τα βλαπτόμενα εκ της ηχορρύπανσης συμφέροντα. Έτσι, προκύπτει και η συμβολή της διοικητικής δικαιοσύνης, αλλά και, πριν από αυτήν, η συμβολή των δημοσίων οργάνων.

-Από το ά. 232Α ΠΚ θα μπορούσε να συναχθεί «συνεργασία» αστικής και ποινικής δικαιοσύνης, δεδομένου ότι η διάταξη αυτή ποινικοποιεί τη μη συμμόρφωση προς το περιεχόμενο λόγου χάριν προσωρινής διαταγής ή απόφασης ασφαλιστικών μέτρων (αστικές αποφάσεις) που διατάσσουν άρση της ηχορρύπανσης και παράλειψή της στο μέλλον. Τούτο δε, δεν μπορεί παρά να λειτουργεί προς περαιτέρω διασφάλιση του βλαπτόμενου.

-Η προστασία από την ηχορρύπανση ανάγεται με τρόπο ρητό σε σκοπό δημοσίου συμφέροντος [7].

-Ζήτημα επιτρεπτής ή μη λειτουργίας των καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος σε πολυκατοικίες, ανάλογα με τον κανονισμό των πολυκατοικιών. Στον κανονισμό πολυκατοικίας μπορεί νόμιμα να προβλέπεται απαγόρευση λειτουργίας καταστήματος υγειονομικού ενδιαφέροντος. Ελλείψει όμως κανονισμού, μπορεί η πλειοψηφία των ιδιοκτητών των διαμερισμάτων να αρνηθεί τη συναίνεσή της στη λειτουργία καταστήματος υγειονομικού ενδιαφέροντος, η άρνηση όμως αυτή ελέγχεται ως προς τη νομιμότητά της. Δηλαδή ελέγχεται η τήρηση των νόμιμων περιορισμών της κυριότητας των ιδιοκτητών διαμερισμάτων πολυκατοικίας των άρθρων 1003 ΑΚ και 3 του ν. 3741/1929 [3]. Και πάλι δηλαδή ελέγχεται «το υπερβολικό», «το πέραν των ορίων» του θορύβου μέσα από τον έλεγχο της άρνησης συναίνεσης-ανοχής.

## 5. Συμπεράσματα

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι σύσσωμη η νομοθεσία, τόσο η ιδιωτικού δικαίου (αστική), μέσω του δικαιώματος της προσωπικότητας, της αγωγής διατάραξης της νομής και κυριότητας, της αποζημίωσης και ηθικής βλάβης, όσο και η δημοσίου δικαίου (ποινική και διοικητική), μέσω των μέτρων προστασίας της δημόσιας υγείας και των μέτρων τάξης, δομεί ένα γενικά ολοκληρωμένο τείχος προστασίας κατά της ηχορρύπανσης, κι έτσι δεν φαίνεται να υπάρχει ανάγκη επιπλέον νομοθεσίας ή μεταβολής της. Επίσης, μέσα από τη νομολογία προκύπτουν θετικές παραδοχές για τους βλαπτόμενους ιδιώτες οι οποίες συμβάλλουν στη δικαίωσή τους όταν προσφεύγουν στην (αστική) δικαιοσύνη. Τούτο μάλιστα πρέπει να λειτουργήσει ως πρόταση δράσης για αυτούς. Άλλωστε, ακόμα και αν οι διοικητικές αρχές δεν έχουν τον κατάλληλο εξοπλισμό (ηχόμετρα) για να διαπιστώσουν τις παραβάσεις υγειονομικών διατάξεων και διατάξεων κοινής ησυχίας ή απλώς ολιγωρούν [10], κι έτσι δεν κινούνται οι σχετικές διοικητικές και ποινικές διαδικασίες, οι ιδιώτες και πάλι μπορούν να βασιστούν στο αντιστάθμισμα που τους παρέχει το ιδιωτικό δίκαιο και η αστική δικαιοσύνη, που είναι ανεξάρτητα από τους ελέγχους Αστυνομίας ή Υγειονομικής Υπηρεσίας. Σημαντική είναι βέβαια και η ενεργός συμμετοχή των ιδιωτών ως υποκειμένων σχετικών αναφορών και καταγγελιών προς τις ελεγκτικές αρχές, ώστε, μέσα από τις επανειλημμένες οχλήσεις, αυτές να κινητοποιούνται.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Ισοκράτης, Τράπεζα Νομικών Πληροφοριών (ΤΝΠ), Δικηγορικός Σύλλογος Αθηνών (ΔΣΑ) - αναζήτηση νομολογίας - απόφαση 131/2003 Ειρηνοδικείου Ρόδου
- [2] Ισοκράτης, ό.π., - απόφαση 117/1993 Πολυμελούς Πρωτοδικείου Θεσσαλονίκης,
- [3] Ισοκράτης, ό.π., - απόφαση 202/2017 Εφετείου Λάρισας
- [4] Ισοκράτης, ό.π., - απόφαση 29/2007 Πολυμελούς Πρωτοδικείου Αθηνών
- [5] Ισοκράτης, ό.π. - απόφαση 134/2015 Εφετείου Λάρισας
- [6] Ισοκράτης, ό.π. - απόφαση 82/2016 Τριμελούς Εφετείου Πατρών
- [7] Ισοκράτης, ό.π. - απόφαση 664/2017 Τριμελούς Διοικητικού Πρωτοδικείου Λάρισας
- [8] Νομικό περιοδικό «Νομικό Βήμα», απόφαση 718/2001 Αρείου Πάγου, σελ. 1097 (2002)
- [9] Χαλαζωνίτης Π. «Έλεγχος και εφαρμογή των υγειονομικών διατάξεων για την ηχορρύπανση από τα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος», Πρακτικά Ημερίδας: *Οι επιπτώσεις της ηχορρύπανσης στα αστικά κέντρα – Αναγκαία μέτρα και παρεμβάσεις*, ΤΕΕ, Αθήνα (2008)
- [10] Συνήγορος του Πολίτη, Θέμα: λειτουργία καταστημάτων υγειονομικού ενδιαφέροντος προβλήματα ηχορρύπανσης (2016)
- [11] Γεωργιοπούλου Β., «Προστασία από θορύβους μουσικής κέντρων διασκέδασης στην Ελλάδα: Συμβολή στη μελέτη του σχετικού νομοθετικού πλαισίου», διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2014)
- [12] Κουρκουμέλης Δ., *Πρακτικός Οδηγός Αδειοδότησης Επιχειρήσεων (για δικηγόρους, οικονομικούς συμβούλους, μηχανικούς & επιχειρηματίες)*, Νομική Βιβλιοθήκη, Αθήνα, σελ. 79 - 82 (2020)