

8^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2016

Αιγάλεω, Οκτώβριος 3-4, 2016
ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ

ΣΥΝΕΔΡΙΑΚΟ ΚΕΝΤΡΟ
Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ

Χορηγοί Επικοινωνίας



avmentor



Ένωση Ελλήνων Φυσικών

ΤΕΕ

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΟΡΓΑΝΩΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Πρόεδρος: Τάτλας Νικόλαος – Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής
ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ

Μέλη:

Βασιλειάδης Σάββας, Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Κυριάκης-Μπιτζάρος Ευστάθιος, Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Ποτηράκης Στέλιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Ραγκούση Μαρία, Καθηγήτρια ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Τσιτομενάας Στέφανος, Ομότιμος Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Φλώρος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Χαρίτου Χριστίνα, MsC in Internetworked Electronic Systems
(Γραμματεία)

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Πρόεδρος: Στέλιος Ποτηράκης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΑΕΙ
Πειραιά ΤΤ

Μέλη:

Βασιλειάδης Βασίλειος, δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Γιαννακόπουλος Θεόδωρος, «ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”»
Δημούλας Χαράλαμπος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ζαρούχας Θωμάς, ΙΤΥΕ ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ
Καλλίρης Γιώργος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κάντζος Δημήτρης, Επίκουρος Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ
Κεραμίδας Δημήτριος, δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Κοντομίχος Φώτιος, δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & ΤΥ
Κουζούπης Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Μενούνου Πηνελόπη, Επίκουρη Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Πατρών
Μουρτζόπουλος Γιάννης, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών
Μπάμνιος Γεώργιος, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης
Μπάρκας Νίκος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστήμιο Θράκης
Παπαδάκης Παναγιωτής, Διευθυντής Εφαρμογών Ινστιτούτο
Υπολογιστικών Μαθηματικών
Παπαδέλης Γιώργος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παπαδογιάννης Νεκτάριος, Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης
Παπανικολάου Γιώργος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Παστιάδης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Ποταμίτης Ηλίας, Αναπληρωτής Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Ραγκούση Μαρία, Καθηγήτρια ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ

Σεβαστιάδης Χρήστος, δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Σκαρλάτος Δημήτρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστήμιο
Πατρών
Σούμπερτ Γκόλυ, Δρ Ακουστικής, Αθήνα
Σπυρίδης Μπάμπης, Καθηγητής Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο
Αθηνών
Σωτηροπούλου Αλεξάνδρα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Ταρουδάκης Μιχάλης, Καθηγητής Πανεπιστήμιο Κρήτης
Τάτλας Νικόλαος-Αλέξανδρος, Επίκουρος Καθηγητής ΑΕΙ Πειραιά
ΤΤ
Τσινίκας Νίκος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
Φλώρος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Χατζηαντωνίου Παναγιώτης, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & ΤΥ

ΠΡΟΣΚΕΚΛΗΜΕΝΟΣ ΟΜΙΛΗΤΗΣ

Andy Moorhouse, Professor of Engineering and Acoustics and
Vibration, University of Salford

ΧΟΡΗΓΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

ΚΤΙΡΙΟ, ktirio@ktirio.gr
alive, feedback@alive.gr
avmentor, d.stamatakos@avmentor.gr

ΕΚΘΕΤΕΣ

BON STUDIO A.E.B.E, bon@bonstudio.gr
ΕΡΓΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ, info@ergoakoustiki.gr
FIBRAN Δ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ Α.Ε, fibran@fibran.gr
GROUP SCIENCE, info@groupscience.gr
KNAUF ΓΥΨΟΠΟΙΑ ΑΒΕΕ, knauf@knauf.gr
NETSCOPE SOLUTIONS ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ &
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Α.Ε, ykarayotis@netscope.gr

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το 2016, το 8ο κατά σειρά συνέδριο «**ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2016**» διεξήχθη από το [Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα](#), στις **3-4 Οκτωβρίου του 2016**.

Σκοπός του συνεδρίου ήταν η ανάδειξη της εργασίας των σύγχρονων Ελλήνων επιστημόνων στον τομέα της ακουστικής, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρόσφατης έρευνας στο πεδίο αυτό, καθώς και η γνωριμία και προώθηση της συνεργασίας όσων ασχολούνται με την ακουστική και τις εφαρμογές της.

Οι 101 Σύνεδροι που παρακολούθησαν το Συνέδριο είχαν την ευκαιρία να διαπιστώσουν το υψηλό επίπεδο ανάπτυξης της Ακουστικής Επιστήμης και τεχνολογίας στην Ελλάδα. Αξιοσημείωτη ήταν η παρουσία των νέων επιστημόνων τόσο σε επίπεδο παρουσιάσεων όσο και συμμετοχής στο Συνέδριο, γεγονός ιδιαίτερα ελπιδοφόρο μια και καταδεικνύει ότι η ακουστική επιστήμη βρίσκεται σε διαρκή ακαδημαϊκή ανάπτυξη και ο Ελληνικός Εκπαιδευτικός χώρος παράγει νέους με σημαντικές γνώσεις και ιδέες για να στηρίξουντο μέλλον της ακουστικής τεχνολογίας στην Ελλάδα.

Αυτός ο τόμος των Πρακτικών αποτελείται από 68 ανακοινώσεις οι οποίες παρουσιάστηκαν και κάλυψαν όλες τις περιοχές της ακουστικής και οι οποίες ταξινομήθηκαν σε 18 επιμέρους Συνεδρίες:

- Συνεδρία A1: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (I)
- Συνεδρία B1: Ηλεκτροακουστική
- Συνεδρία A2: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (II)
- Συνεδρία B2: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου (I)
- Συνεδρία A3: Ηχοτοπία (I)
- Συνεδρία B3: Ψηφιακή Επεξεργασία Ήχου (II)
- Συνεδρία A4: Ηχοτοπία (II)
- Συνεδρία B4: Γενική, Θεωρητική & Εφαρμοσμένη ακουστική
- Συνεδρία A5: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (I)
- Συνεδρία B5: Μουσική ακουστική
- Συνεδρία A6: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (II)
- Συνεδρία B6: Υποβρύχια ακουστική
- Συνεδρία A7: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (III)

- Συνεδρία Β7: Ψυχοακουστική
- Συνεδρία Α8: Έλεγχος θορύβων & δονήσεων
- Συνεδρία Β8: Υπολογιστική ακουστική
- Συνεδρία Α9: Εκπαίδευση & Ακουστική
- Συνεδρία Β9: Περιβαλλοντική ακουστική - Ηχορύπανση

Φεβρουάριος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Συνεδρία A1: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (I).....	9
Αυτόματη Ακουστικοποίηση Μαθηματικών Εκφράσεων στην Ελληνική Γλώσσα	9
Μετατροπή Μαθηματικών-σε-Ομιλία για παραγωγή Ψηφιακών Ακουστικών Βιβλίων στην Ελληνική Γλώσσα	16
Ακουστική περιγραφή ταινιών και δημοσίων προβολών για άτομα με προβλήματα όρασης	24
Συνεδρία B1: Ηλεκτροακουστική	30
Ακουστική ευθυγράμμιση γραμμικών συστοιχιών με διατάξεις υποχαμηλόσυχνων πηγών σε συστήματα ηχοτροφοδοσίας ανοιχτών χώρων	30
Acoustic Study of the Live Room of Laboratory of Music Acoustics Technology, Department of Music Studies, University of Athens	36
Συστήματα ηλεκτροακουστικής υποβοήθησης στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου· πείραμα υποκειμενικής αξιολόγησης της χρήσης νέων τεχνολογιών στις θεατρικές παραστάσεις	45
Συνεδρία A2: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (II).....	53
Ανάπτυξη και σχεδιασμός εφαρμογής Διαγνωστικού Ακοογράφου για φορητές συσκευές με περιβάλλον iOS	53
Συνεδρία B2: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου (I).....	60
Μελέτη μιγαδικής εξομάλυνσης φάσης για εφαρμογές ψηφιακής διόρθωσης ακουστικών αποκρίσεων	60
Ramon: Αναλύοντας την Ηχητική Επίπτωση	68
Flying insects wingbeat optically recorded waveform characteristics	74
Συνεδρία A3: Ηχοτοπία (I).....	82
Παραγωγή χώρου και ατμόσφαιρας από λογισμικά σύνθεσης ήχου από εικόνα	82
Ο ήχος της πόλης: Η ατμόσφαιρα ενός περιπάτου (city grooves)	88
The Sounds of Silence: Ησυχία και Σιωπή στον κινηματογράφο ως μέσα του ηχητικού σχεδιασμού και της αφήγησης	101
Συνεδρία B3: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου (II).....	109
Έλεγχος αυθεντικότητας ψηφιακού περιεχομένου με βάση τον ήχο	109
ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΧΩΝ ΜΕΣΩ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	119
Novel Binaural and Transaural Rendering within the Browser	127
Συνεδρία A4 : Ηχοτοπία (II)	135

Προς τη δημιουργία μιας εργαλειοθήκης υψηλής / χαμηλής τεχνολογίας για την έρευνα του ήχο-οσμο-τοπίου.....	135
Κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων με χρήση συνελικτικών νευρωνικών δικτύων.....	141
Δημιουργία βάσης δεδομένων ηχητικών καταγραφών και αφηγήσεων πολιτισμικού περιεχομένου στην περιοχή της Θράκης.....	149
Συνεδρία B4: Γενική, Θεωρητική & Εφαρμοσμένη ακουστική	158
Σήμα περίθλασης γύρω από ημι-επίπεδο ή σφήνα.....	158
Οπτικός έλεγχος ναοακουστικών κυμάτων σε ημιαγωγούς από υπερβραχείς παλμούς laser.....	166
Συνεδρία A5: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (I)	174
Η σημασία της διάρθρωσης του χώρου στην εστίαση της αντίληψης σε διαφορετικές πηγές που ακούγονται ταυτόχρονα. Μια παραστατική μέθοδος.....	174
Μελέτη και πρόταση εφαρμογής για την βελτίωση της ακουστικής μεγάλου αμφιθεάτρου πολλαπλής χρήσης	180
Ακουστικός Σχεδιασμός Ανακλαστήρων σε Αίθουσες Ακροατηρίου	189
Ακουστική σημαντικών παραδοσιακών κτισμάτων της Θράκης και δημιουργία βάσης δεδομένων εικονικών ακροάσεων.....	197
Σύγκριση ακουστικών χαρακτηριστικών ορθόδοξων ναών.....	206
Συνεδρία B5: Μουσική ακουστική	215
Μελέτη και Σύγκριση Ηχητικών Αποκρίσεων της Αρχαιοελληνικής Λύρας με την Ενσωμάτωση Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων	215
Συνεδρία A6: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (II).....	221
Ηχομόνωση και Εσωτερική Διαρρύθμιση της Νεοελληνικής Κατοικίας : οι δεκαετίες 50 - 80.....	221
Εκπομπή ενοχλητικών ήχων χαμηλών συχνοτήτων (βοή δαπέδου, drum sound, dröhnender Boden) από πλωτά δάπεδα κατά την διάρκεια ξυπόλητου βαδίσματος.....	229
Rotunda reloaded - Περιγραφή της ακουστικής της Ροτόντας στην Θεσσαλονίκη μετά από την αποπεράτωση των εργασιών ανασύλωσης.....	234
Scenery design through a geometrical model: An application in the theatre of ancient Tyndaris	245
Αρχαία Ελληνικά Θέατρα : προβλήματα επαναλειτουργίας και ηχοπροστασίας	253
Συνεδρία B6: Υποβρύχια ακουστική	261
Αυτόνομο σύστημα υποβρύχιας ακουστικής καταγραφής*	261

Ανάπτυξη μεθόδων αντιστροφής για την ανάκτηση γεωακουστικών χαρακτηριστικών από ηχητικές ανακλάσεις*	269
Πρόβλεψη θορύβου ναυσιπλοΐας στην Ανατολική Μεσόγειο ¹	277
Αντιστροφή των παραμέτρων ενός ακουστικού σήματος με χρήση ενός πιθανοθεωρητικού σχήματος αντιστροφής τριών-βημάτων	283
Συνεδρία A7: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (III)	291
ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΝΕΟΚΛΑΣΙΚΩΝ ΑΙΘΟΥΣΩΝ ΔΙΑΛΕΞΕΩΝ ΜΝΗΜΙΑΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ	291
Ακουστική απόδοση θεάτρων του νεοκλασικισμού και του μεσοπολέμου στην Αθήνα.....	299
ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΥ τ. ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΧΗΜΙΚΩΝ (MAX) ΣΤΟ ΕΜΠ	308
Συνεδρία B7: Ψυχοακουστική	317
Μη-αρμονικότητα και χροιά: Διερεύνηση κατωφλίων αντίληψης αποκλίσεων από την αρμονικότητα σε συνθήκες θορύβου	317
Ψυχοακουστική Αποτίμηση Της Ποντιακής Λύρας	325
Λογάριθμοι και Λογαριθμικός («αρμονικός») Κανών: Πυθαγόρεια επινοήματα	332
Αξιολόγηση κατηγοριοποίησης στερεοφωνικού ειδώλου σε δωμάτια ακρόασης από αμφιωτικές παραμέτρους.	340
Συνεδρία A8: Έλεγχος θορύβων & δονήσεων	350
Προσομοίωση ενεργού ελέγχου χαμηλόσυχνου θορύβου σε μικρούς κλειστούς χώρους με σύνθετες πηγές προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας	350
Ενεργός έλεγχος χαμηλόσυχνου θορύβου σε κλειστούς χώρους και προσομοίωση με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου	357
« Αξιολόγηση - αντιμετώπιση κραδασμών μηχανολογικής εγκατάστασης σε κτίριο γραφείων»	364
Σχεδιασμός και κατασκευή ηχομονωτικού κλωβού βιομηχανικής μηχανής παραγωγής με πολλαπλά υποσυστήματα.....	373
Κτυπογενής θόρυβος στα αυτοκίνητα: Η αναλύση και η μείωση του με νέες τεχνολογίες ενεργού ελέγχου.....	385
Συνεδρία B8: Υπολογιστική ακουστική	393
Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων Μέσου Ωτός: Προσομοίωση αντικατάστασης της οσταριακής αλύσου από τεχνητή πρόθεση	393
Υπολογιστικό μοντέλο διάδοσης ήχου σε μονωμένο σωλήνα και πειραματική επαλήθευση	401

Μοντελοποίηση Ηχητικής Καθοδήγησης Σμήνους Nanobots με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων: Διερεύνηση Αντικειμενικότητας Ηχητικών Σημάτων σε Ωτολογικές Παθολογίες	415
Ακουστική Πίεση στο Εσωτερικό των Ηχείων	422
Simultaneous localisation of sound source and computation of sound speed	429
Συνεδρία Α9: Εκπαίδευση & Ακουστική	436
Διερεύνηση παραμέτρων οπτικής και ακουστικής άνεσης σε κτίρια εκπαίδευσης	436
Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα ένα εκπαιδευτικό διαδραστικό ηχητικό περιβάλλον	444
Εκπαιδευτικές δραστηριότητες ακουστικών μετρήσεων στο σχολικό περιβάλλον	454
Βελτίωση των ηχητικών πολιτιστικών δεσμών μεταξύ διαφορετικών γλωσσικών κοινοτήτων στη Θράκη: Δημιουργία εφαρμογής ιστοτόπου και φορητών συσκευών	462
Συνέδριο Β9: Περιβαλλοντική ακουστική - Ηχορύπανση	472
ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΧΛΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΟΡΥΒΟ	472
Το εργαστήριο των “Ηχοερευνητών” ως εισαγωγή σε βασικές έννοιες της Ακουστικής Οικολογίας	480
ΠΡΟΤΑΣΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΙΔΙΩΤΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΗΧΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	488
Μετρήσεις ηχοστάθμης και ηχοστάθμη κατάταξης	496

Συνεδρία Α1: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (I)

Αυτόματη Ακουστικοποίηση Μαθηματικών Εκφράσεων στην Ελληνική Γλώσσα

Γεώργιος Κουρουπέτρογλου¹, Hernisa Kasorri^{1,2} και Παρασκευή Ρήγα¹
¹Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Εργαστήριο Φωνής και Προσβασιμότητας
koupe@di.uoa.gr

²The Graduate Center, City University of New York, USA

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της σχεδίασης και υλοποίησης του συστήματος GR-MathPlayer για την αυτόματη ακουστικοποίηση Μαθηματικών συμβόλων και εκφράσεων στην Ελληνική γλώσσα. Το GR-MathPlayer αποτελεί ένα σύστημα Μαθηματικών-σε-Ομιλία που μετατρέπει σε Ελληνική συνθετική ομιλία απλές ή σύνθετες Μαθηματικές εκφράσεις μέχρι κ πανεπιστημιακού επιπέδου, καθώς και σύμβολα θετικών επιστημών τα οποία περιλαμβάνονται σε Ελληνικά εκπαιδευτικά βιβλία.

Automatic Acoustic Rendering of Math Expressions in the Greek Language

ABSTRACT

We present the results of the design and implementation of the GR-MathPlayer system for the automatic acoustic rendering of Math symbols and expressions in the Greek language. GR-MathPlayer is a Maths-to-Speech system which converts Greek speech synthesis of simple or complex Mathematical expressions up to university level, as well as symbols of science included in Greek textbooks.

Εισαγωγή

Οι τεχνολογίες ηλεκτρονικής προσβασιμότητας επιτρέπουν σήμερα ένα κείμενο, είτε στη συνήθη μορφή αρχείων (π.χ. .pdf, .doc, .ppt) είτε στη μορφή Διαδικτυακού περιεχομένου (π.χ. .html), να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, αποδοτικά και με ικανοποιητικό τρόπο από περισσότερους ανθρώπους (συμπεριλαμβανομένων και

των Ατόμων με Αναπηρία) σε περισσότερες καταστάσεις ή πλαίσια χρήσης. Η προσβασιμότητα των κειμένων είναι πολύ σημαντική για τους αναγνώστες με εντυποαναπηρία, δηλαδή εκείνους με οπτική ανικανότητα (άτομα με τύφλωση, χαμηλή όραση, δυσχρωματοψία, κλπ), μαθησιακές δυσκολίες (συμπεριλαμβανομένης και της δυσλεξίας) ή κινητική αναπηρία (όπως απώλεια δεξιότητας στα άνω άκρα που δεν επιτρέπει το χειρισμό ενός κειμένου με φυσικό τρόπο).

Ενώ οι Υποστηρικτικές Τεχνολογίες πληροφορικής και η ηλεκτρονική προσβασιμότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμες για τα άτομα με εντυποαναπηρία, και ιδιαίτερα εκείνους με τύφλωση, ώστε να ανταπεξέλθουν σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής, η υποστήριξη των Μαθηματικών συμβόλων και εκφράσεων παραμένει ακόμη αρκετά περιορισμένη. Για παράδειγμα, παρά τη σημαντική πρόοδο στα συστήματα αυτόματης μετατροπής Κειμένου-σε-Ομιλία (ΚσΟ), ακόμα και στην Ελληνική γλώσσα, αυτά δεν υποστηρίζουν την αυτόματη μετατροπή Μαθηματικών-σε-Ομιλία. Αυτό αποτελεί ένα κρίσιμο πρόβλημα, επειδή, από τη μια τα Μαθηματικά είναι σημαντικά σε όλες τις βαθμίδες εκπαίδευσης, και ιδιαίτερα στις θετικές επιστήμες, και από την άλλη τα άτομα με τύφλωση αντιμετωπίζουν πολύ σημαντικά εμπόδια στη μελέτη τους.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να αποδώσει κανείς ακουστικά μια μαθηματική έκφραση, καθώς αυτό που θα εκφωνηθεί και ο τρόπος με τον οποίο θα εκφωνηθεί ποικίλλουν ανάλογα τη γλώσσα, τη θεματική περιοχή στις θετικές επιστήμες και την εξειδίκευση ή εξοικείωση του ακροατή. Η εξοικείωση του χρήστη επηρεάζει το επίπεδο φλυαρίας του συστήματος, και συνεπώς την αμφισημία/μονοσημία, τα οποία θα πρέπει να μπορεί να τα ρυθμίζει ο χρήστης.

Η εργασία αυτή στοχεύει να παρουσιάσει τα αποτελέσματα της σχεδίασης και υλοποίησης ενός συστήματος αυτόματης ακουστικοποίησης Μαθηματικών συμβόλων και εκφράσεων σε Ελληνική συνθετική ομιλία. Στην πραγματικότητα ο στόχος περιλαμβάνει την υποστήριξη της ακουστικοποίησης οποιουδήποτε κειμένου της Ελληνικής το οποίο περιέχει απλά ή σύνθετα Μαθηματικά, καθώς και σύμβολα θετικών επιστημών, μέχρι και πανεπιστημιακού επιπέδου. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας αναπτύχθηκε ένα πρότυπο στυλ ομιλίας των μαθηματικών εκφράσεων στην Ελληνική γλώσσα, το οποίο ενσωματώθηκε στο ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό MathPlayer 3.0.

1. Τεχνολογίες συγγραφής και δημοσίευσης μαθηματικών εγγράφων στο Διαδίκτυο

Η επικοινωνία με τα μαθηματικά στο Διαδίκτυο είναι ένα αρκετά δύσκολο έργο. [1]. Η εμφάνιση του συστήματος TeX [2], που αναπτύχθηκε από τον Donald Knuth, έλυσε την πλειοψηφία των προβλημάτων που αφορούν στα τυπωμένα έγγραφα. Στο Διαδίκτυο όμως, η χρήση της HTML γλώσσας σε συνδυασμό με κάποια σύμβολα Unicode, αν και αποτελεί την απλούστερη μορφή εγγράφων και κάποιοι τη χρησιμοποιούν ακόμη και για τη συγγραφή μαθηματικών, δεν είναι μια προσβάσιμη λύση για τα μαθηματικά. Στην πάροδο των χρόνων αναπτύχθηκαν αρκετές γλώσσες επιστημείωσης που επιτρέπουν την δημοσίευση επιστημονικών εγγράφων στο Διαδίκτυο (MINSE [3], SVG [4], WebTeX, TeX, HyperLaTeX [5] και MathML [6]).

Ξεκινώντας από (La)TeX τα συστήματα LaTeX2HTML [7] και TeX4ht [8] προσπάθησαν να παράγουν αρχικά HTML με ενσωματωμένες εικόνες GIF. Η έλλειψη όμως εναλλακτικού κειμένου, που θα μπορούσε να κάνει τις εικόνες αυτές ακουστικά προσβάσιμες, κάνει την ιστοσελίδα μη προσβάσιμη. Κάποιες άλλες εφαρμογές προσπαθούν να αποδώσουν οπτικά τις Μαθηματικές εκφράσεις μέσω applet (WebEQ [9]) ή plugin (TechExplorer [10] της IBM και ο MathPlayer [11] της Design Science). Στην πρώτη περίπτωση το περιεχόμενο φορτώνεται από έναν εξυπηρετητή και δεν απαιτείται καμία εγκατάσταση, ενώ στη δεύτερη μετατρέπεται απ' ευθείας στο φυλλομετρητή όπου έχει εγκατασταθεί το plugin.

Κάποια ερευνητικά συστήματα για την ακουστική απόδοση μαθηματικού περιεχομένου είναι το ASTeR [12], που παίρνει ως είσοδο TEX, και το MathTalk [13], που παρουσιάζει με απλούστερο τρόπο την πληροφορία. Και τα δύο χρησιμοποιούν βοηθητικούς ήχους πέρα από ομιλία. Αντίθετα, το TechRead [14-15] στηρίζεται μόνο στα προσωπικά γνωρίσματα της συνθετικής ομιλίας, όμοια με το MathPlayer.

2. Γλώσσα επιστημείωσης μαθηματικών MathML

Η MathML, επέκταση της XML, αποτελεί μια προδιαγραφή της Κοινοπραξίας του Παγκόσμιου Ιστού (W3C) για την κωδικοποίηση των Μαθηματικών. Περιλαμβάνει την MathML Αναπαράστασης, για την περιγραφή της διάταξης των μαθηματικών εκφράσεων, και την MathML Περιεχομένου, για την επιστημείωση της σημασίας και της δομής των Μαθηματικών. Η πρώτη αναφέρεται πρωτίστως στην οπτική ενώ η δεύτερη είναι πιο χρήσιμη για την ακουστική απόδοση των εκφράσεων [26]. Όπως είναι αναμενόμενο, οι περισσότερες εφαρμογές συγγραφής και παραγωγής MathML δίνουν στην έξοδό τους MathML Αναπαράστασης, οπότε θα πρέπει ένα σύστημα ακουστικοποίησης μαθηματικών να μπορεί να αποδώσει και τις δύο.

Η MathML προβλέπει:

- Δυναμικό και διαδραστικό περιεχόμενο
- Δημοσίευση τεχνικών πληροφοριών σε ηλεκτρονική μορφή
- Ανταλλαγή μαθηματικών δεδομένων μεταξύ εφαρμογών
- Ερμηνεία των μαθηματικών εκφράσεων σε μη-οπτικά μέσα
- Εργαλεία μετατροπής μεταξύ άλλων κωδικοποιήσεων των μαθηματικών όπως LaTeX/TeX

Το μαθηματικό υλικό που έχει δημιουργηθεί με τη χρήση της MathML μπορεί να αποδοθεί με πολλούς τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε αναγνώστη. Συγκεκριμένα, μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη ενός υπολογιστή, να εκτυπωθεί, να μεγεθυνθεί, να εκφωνηθεί μέσω εφαρμογών που υποστηρίζουν συνθετική ομιλία ή να μετατραπεί σε γραφή braille. Αυτή η πολυτροπικότητα κάνει τη γλώσσα ιδανική επιλογή όταν θέλουμε να ακολουθήσουμε τις Αρχές της Καθολικής Σχεδίασης.

3. Εργαλείο ακουστικοποίησης μαθηματικών MathPlayer

Η εφαρμογή MathPlayer είναι ένα plugin για τον Microsoft Internet Explorer 9, τον Acrobat Reader και τον ghPlayer (DAISY 3 player), που υποστηρίζει τη MathML και την αποδοσή της όχι μόνο με οπτικό αλλά και ακουστικό τρόπο. Τα υποστηρικτικά χαρακτηριστικά της είναι τα εξής οχτώ:

- Ομοιομορφία των μαθηματικών με το υπόλοιπο κείμενο ως προς το μέγεθος γραμματοσειράς, χρώμα και ύψος της γραμμής
- Μεγέθυνση εκφράσεων τη κάθε μια ξεχωριστά
- Ακουστική απόδοση των μαθηματικών εκφράσεων
- Ολοκλήρωση με αναγνώστες οθόνης και άλλες υποστηρικτικές τεχνολογίες
- Συγχρονισμένος τονισμός των εκφράσεων με ομιλία
- Υποστήριξη εκτύπωσης σε braille και DotsPlus braille
- Πλοήγηση μέσα στη μαθηματική έκφραση μέσω πληκτρολογίου
- Υποστήριξη αντιγραφής των αναπαριστώμενων εκφράσεων και εισαγωγή τους σε κειμενογράφους και άλλες μαθηματικές εφαρμογές

3.1 Υποστήριξη της Ελληνικής γλώσσας

Η υποστήριξη των χαρακτηριστικών του MathPlayer στην Ελληνική γλώσσα σημαίνει μόνο τροποποίηση των κανόνων απόδοσης των μαθηματικών εκφράσεων στην Ελληνική, καθώς ο κώδικας Nemeth ήδη υποστηρίζεται από το MathPlayer και τα άλλα χαρακτηριστικά του είναι ανεξάρτητα από τη γλώσσα. Στην επόμενη ενότητα δίνουμε τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υποστήριξη της Ελληνικής γλώσσας, ώστε να είναι διαθέσιμη σήμερα η ακουστική απόδοση MathML στα Ελληνικά.

4. Κανόνες ακουστικής απόδοσης μαθηματικών εκφράσεων στην Ελληνική γλώσσα

4.1 Αρχιτεκτονική ακουστικής απόδοσης του MathPlayer

Η μετατροπή του δέντρου MathML σε κείμενο εμπλουτισμένο με ακουστικά χαρακτηριστικά, προκειμένου να εκφωνηθεί από ένα σύστημα μετατροπής ΚσΟ:

α) κανονικοποίηση, β) παραγωγή κειμένου προς εκφώνηση και γ) προσαρμογή στα συστήματα μετατροπής ΚσΟ.

Ως παράδειγμα για την επίδειξη της λειτουργίας των βημάτων αυτών επιλέγεται η Μαθηματική έκφραση 4.1 σε MathML που δίνεται στον Πίνακα 4.1.

$$x^{n+1} \quad (4.1)$$

Στόχος της κανονικοποίησης είναι η αντιστοίχιση πολλαπλών ισοδύναμων τρόπων κωδικοποίησης της έκφρασης MathML σε ένα μοναδικό δέντρο. Η κανονικοποίηση υλοποιήθηκε με ένα σύνολο κανόνων που δημιουργούν μια αναπτυσσόμενη κωδικοποίηση MathML, η οποία είναι ισοδύναμη με το αρχικό δέντρο, αλλά μπορεί να έχει διαφορετική δομή.

Οι κανόνες ομιλίας μετατρέπουν το κανονικοποιημένο MathML δέντρο σε μια άλλη μορφή που αναπαριστά την συμβολοσειρά προς εκφώνηση. Η μορφή αυτή από δω και στο εξής θα αναφέρεται ως δέντρο ομιλίας. Οι κόμβοι στο δέντρο ομιλίας είναι κυρίως κόμβοι συμβολοσειρών και κόμβοι που απαρτίζουν τις εντολές ΚσΟ.

Πίνακας 4.1 MathML έκφρασης 4.1 και έξοδος MathPlayer

MathML Αναπαράστασης	Έξοδος MathPlayer
<pre> <math> <mrow> <msup> <mi>x</mi> <mrow> <mi>n</mi> <mo>+</mo> <mn>1</mn> </mrow> </msup> </mrow> </math> </pre>	<pre> <bookmark mark='4104'/> <bookmark mark='8195'/> <bookmark mark='12291'/> x εκθέτης <silence msec='80'/> <pitch middle='8'> <bookmark mark='20483'/> n <silence msec='60'/> <bookmark mark='24579'/> και <silence msec='60'/> <bookmark mark='28675'/> 1 </pitch> <silence msec='100'/> τέλος εκθέτη </pre>

Στο στάδιο προσαρμογής, με βάση τις ρυθμίσεις του συστήματος μετατροπής ΚΣΟ, το δέντρο ομιλίας περνάει μέσα από ένα σύνολο κανόνων και οι προηγούμενοι κόμβοι ομιλίας μετατρέπονται σε εξαρτώμενες συμβολοσειρές για το συγκεκριμένο σύστημα ΚΣΟ.

4.2 Παραγωγή ομιλίας στην Ελληνική γλώσσα

Για την υποστήριξη της Ελληνικής γλώσσας από το MathPlayer στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν:

- i) μετάφραση των Unicode χαρακτήρων που συναντώνται στη MathML,
- ii) μετάφραση των μονάδων μέτρησης και
- iii) προσαρμογή των κανόνων απόδοσης των μαθηματικών δομών.

Οι κανόνες παραγωγής ομιλίας, ουσιαστικά, προσπαθούν να ταιριάξουν σε κάθε ετικέτα MathML το παραγόμενο κείμενο προς εκφώνηση προσδιορίζοντας και άλλα ακουστικά χαρακτηριστικά. Κάθε κανόνας αποτελείται από το αριστερό του μέρος, που είναι το πρότυπο προς ταίριασμα, και το δεξί μέρος που ελέγχει την παραγόμενη ομιλία.

Από τα 2.800 σύμβολα Unicode στα οποία έχει αντιστοιχίσει λεκτική περιγραφή το MathPlayer, τα 200 περίπου αρκούν για την πλειοψηφία των χρηστών. Ένας κανόνας απόδοσης ονομασίας σε σύμβολο Unicode έχει π.χ. τη μορφή:

```
char ? (unicode == 0x2264) => string {text="μικρότερο από ή ίσον με";};
```

Στην Ελληνική έχουν μεταφραστεί σε αυτή στην έκδοση 3 του MathPlayer οι οχτώ ομάδες που ακολουθούν:

- U+0021 – U+03F6: Μπλοκ συνήθη χρησιμοποιημένων χαρακτήρων (π.χ. τα Λατινικά γράμματα, τα Ελληνικά γράμματα και οι αριθμοί).
- U+2200 – U+228B: Μπλοκ διαφόρων μαθηματικών τελεστών (π.χ. διαφορικό, άθροισμα, μείον, ανήκει στο, ανάδελτα).
- U+22A2 – U+22A9: Μπλοκ λογικών σχέσεων (π.χ. κάθετο, αληθές).

- U+22C0 – U+22C3: Μπλοκ η-αδικών τελεστών (π.χ. τομή, ένωση).
- U+22E0 – U+22F1: Μπλοκ αποσιωπητικών και άλλων χαρακτήρων (π.χ. αποσιωπητικά κατά τον μαθηματικό άξονα, μεγαλύτερο από αλλά όχι ισοδύναμο με).
- U+2100 – U+2149: Μπλοκ δίγραμμων χαρακτήρων, καλλιγραφικών γραμμάτων και των γραμμάτων των οποίων δίνεται ο σκελετός του σχήματός τους με έντονη γραφή γραμμάτων Fraktur.
- U+F000 – U+F251: Μπλοκ παραλλαγών κάποιων Λατινικών χαρακτήρων.
- U+2190 – U+2199 and U+21D0 – U+21D5: Μπλοκ διάφορων τύπων βέλων (π.χ. βέλος προς τα αριστερά, διπλό βέλος προς τα πάνω).

Ως προς τις μονάδες μέτρησης μεταφράζονται αυτές για τις οποίες υπάρχει αντίστοιχη ονομασία στα Ελληνικά π.χ. ft (“πόδι”).

Η ακουστική απόδοση των Μαθηματικών εκφράσεων θα πρέπει να περιλαμβάνει επαρκή πληροφορία για την δομή της έκφρασης προκειμένου να αποφευχθεί η σύγχυση στον ακροατή. Για το λόγο αυτό η κανονικοποιημένη MathML περιλαμβάνει 27 ετικέτες που αποδίδουν σημασιολογία. Αυτές ομαδοποιούνται σε κάποιους κανόνες οι οποίοι επίσης μεταφράστηκαν και διαμορφώθηκαν κατάλληλα ώστε να υποστηρίζουν την Ελληνική. Για παράδειγμα για το ημίτονο ο κανόνας έγινε:

```
// sin -> ημίτονο
mi?(count(this)==3&&$0.unicode=='s'&&$1.unicode=='i'&&$2.unicode=='n' )
=> structure(
  bookmark{ data=compute_bookmark(match.dfs, "Word", 0); },
  string{ text="ημίτονο"; }
);
```

5. Υλοποίηση και έλεγχος

Η υλοποίηση για τα Ελληνικά έγινε στην πραγματικότητα και για τα τρία βήματα της αρχιτεκτονικής που περιγράφεται στην Ενότητα 4.1, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα κανόνων της Design Science που ονομάζεται Sevilla. Η εν λόγω γλώσσα επιτρέπει το ταίριασμα μετά από έλεγχο συγκεκριμένης συνθήκης. Πέρα από τις συμβολοσειρές που θα εκφωνηθούν από το σύστημα ΚσΟ και τις παύσεις που εισάγονται, επιτρέπει την αλλαγή στην τόνο, στην ταχύτητα, στην ένταση και στη φωνή της παραγόμενης ομιλίας.

Οι τιμές των προσωδιακών χαρακτηριστικών έχουν ρυθμιστεί στα Ελληνικά, ύστερα από έλεγχο που έγινε σε ενδεικτικά παραδείγματα για κάθε κανόνα με τη βοήθεια χρηστών με απώλεια όρασης. Οι εκφράσεις-παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήσαν τα προγενέστερα συστήματα [12-15].

Οι κανόνες είναι υλοποιημένοι σε τρία αρχεία UTF-8 (unicode.tdl, units.tdl και simple-speech.tdl) κάτω από τον φάκελο «el».

Οι θεματικές περιοχές που καλύπτει η παρούσα εργασία περιλαμβάνουν: 1) αριθμητική, άλγεβρα, λογική και σχέσεις, 2) μαθηματικό λογισμό και διανυσματικό λογισμό, 3) θεωρία συνόλων, 4) ακολουθίες και σειρές, 5) στοιχειώδεις κλασσικές συναρτήσεις, 6) στατιστική και 7) γραμμική άλγεβρα.

6. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα της σχεδίασης και υλοποίησης του συστήματος GR-MathPlayer. Συγκεκριμένα εξηγήσαμε πώς αναπτύχθηκαν και εξετάστηκαν οι Ελληνικοί κανόνες για την ακουστικοποίηση μαθηματικών εκφράσεων που έχουν κωδικοποιηθεί σε MathML μέσα από το λογισμικό MathPlayer. Χρησιμοποιώντας την MathML ως γλώσσα αναπαράστασης των μαθηματικών εκφράσεων και τον MathPlayer μαζί με τις ήδη ανεπτυγμένες τεχνολογίες ανάγνωσης οθόνης, μετατροπής ΚσΟ, προσβάσιμης αναπαράστασης πινάκων, εικόνων και σχημάτων και αναγνώρισης κειμένου και μαθηματικών, είναι πλέον δυνατή η μετατροπή οποιουδήποτε βιβλίου και άλλου εγγράφου σε προσβάσιμη μορφή για τα άτομα με απώλεια όρασης.

Στα άμεσα μελλοντικά μας σχέδια περιλαμβάνεται η μετάφραση όλων των συμβόλων Unicode στα οποία έχει αντιστοιχίσει λεκτική περιγραφή το MathPlayer ή έστω η απλή μεταγραφή τους στα Ελληνικά (π.χ. Hertz -> Χερτζ) για αυτά τα οποία δεν υπάρχει Ελληνική λέξη, ώστε να διαβάζονται σωστά από συνθέτες ομιλίας που πιθανώς δεν υποστηρίζουν ταυτόχρονα δύο γλώσσες.

7. Αναφορές

- [1] Math Typesetting for the Internet. The Math Forum - <http://mathforum.org/typesetting>
- [2] TeX Users Group (TUG) Homepage - <http://www.tug.org>
- [3] MathML – Mathematical Markup Language - <http://www.w3.org/Math>
- [4] The MINSE Project - <http://lfw.org/math/top.html>
- [5] SVG - Scalar Vector Graphics - <http://www.w3c.org/Graphics/SVG/>
- [6] The HyperLatex Package - <http://www.cs.uu.nl/~otfried/Hyperlatex>
- [7] Latex2HTML Homepage - <http://saftsack.fs.uni-bayreuth.de/~latex2ht/>
- [8] TeX4ht Homepage - <http://www.cis.ohio-state.edu/~gurari/TeX4ht/mn.html>
- [9] WebEQ Homepage - <http://www.dessi.com/en/products/webeq/default.html>
- [10] TechExplorer - <http://www-3.ibm.com/software/network/techexplorer>
- [11] MathPlayer Homepage - <http://www.dessi.com/en/products/mathplayer/>
- [12] T.V. Raman *Audio Systems for Technical Reading. PhD thesis, Department of Computer Science Cornell University, NY, USA (1994)*
- [13] R.D. Stevens *Principles for the Design of Auditory Interfaces to Present Complex Information to Blind People, PhD thesis Department of Computer Science, The University of York, Heslington, York, UK (1996)*
- [14] D. Fitzpatrick «Mathematics: How and What to Speak» in *Proc. ICCHP 2006 (10th. International Conference on Computers Helping People with Special Needs), LNCS 4061* edited by K Miesenberger et al, Linz, Austria. Springer, pp 1199-1206 (2006)
- [15] D. Fitzpatrick, A. Karshmer «Multi-modal mathematics: Conveying math using synthetic speech and speech recognition» in *Proc. ICCHP 2004 (9th. International Conference on Computers Helping People with Special Needs), LNCS 3118* edited by K Miesenberger et al. Berlin. Springer, pp 644-647 (2004)
- [16] P. Sandhu *The MathML Handbook* Charles River Media, Inc. (2002)

Μετατροπή Μαθηματικών-σε-Ομιλία για παραγωγή Ψηφιακών Ακουστικών Βιβλίων στην Ελληνική Γλώσσα

Γεώργιος Κουρουπέτρογλου και Παρασκευή Ρήγα
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Εργαστήριο Φωνής και Προσβασιμότητας
koupe@di.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία προτείνουμε μια μεθοδολογία βασισμένη στο πρότυπο DAISY-3 για την παραγωγή και την ακουστική απόδοση Ψηφιακών Ακουστικών Βιβλίων (ΨΑΒ) τα οποία περιέχουν μαθηματικές εκφράσεις στην Ελληνική γλώσσα. Παρουσιάζουμε τη απαιτούμενη ροή διαδικασιών και εργασιών καθώς και όλα τα απαραίτητα εργαλεία λογισμικού. Ακολουθώντας αυτή τη ροή μπορεί κάποιος να παράγει με επιτυχία ΨΑΒ με μαθηματικά στην Ελληνική, δίνοντας στους μαθητές με εντυποαναπηρία ακουστική πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο για όλο το φάσμα των βιβλίων τους. Προτείνουμε επίσης μια μεθοδολογία αξιολόγησης της ακουστικής απόδοσης ΨΑΒ με μαθηματικά και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματά της αφού εισάγουμε την ελληνική συλλογή μαθηματικών εκφράσεων UoAMathCorpus.

Math-to-Text conversion for the production of Greek Digital Talking Books

ABSTRACT

In this work we propose a methodology for the production and rendering of Digital Talking Books (DTB), based on the DAISY-3 standard, that supports Mathematical content for the Greek language. We present the necessary workflow along with all the related software tools. By following this workflow one can successfully produce Greek DTB with mathematics and thus can provide to the print disabled real-time access to the whole spectrum of their STEM books. We also recommend a suitable evaluation methodology of the acoustic rendering for DTB with mathematics with the relative results after introducing the mathematical corpus UoAMathCorpus.

Εισαγωγή

Τα ακουστικά ή ομιλούντα βιβλία αποτελούν ηχογραφήσεις κειμένου και έκαναν την εμφάνισή τους περί το 1930 με κύριο αποδέκτη τα άτομα με εντυποαναπηρία. Στην εντυποαναπηρία περιλαμβάνονται οι αναπηρίες όρασης, η κινητική αναπηρία στα άνω άκρα και κάποιες μαθησιακές δυσκολίες όπως η δυσλεξία. Στην παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής αυτών των βιβλίων γίνεται ηχογράφηση του ομιλητή καθώς αναγιγνώσκει το έντυπο βιβλίο. Σήμερα το πρότυπο που ακολουθείται παγκοσμίως για την παραγωγή Ψηφιακών Ακουστικών Βιβλίων (ΨΑΒ) είναι το DAISY [1]. Το MathML Modular Extension [2] περιλαμβάνεται στην έκδοση 3 του εν λόγω προτύπου [3] και επιτρέπει το συνδυασμό κειμένου με μαθηματικά χάρη σε έναν νέο μηχανισμό που παρέχει πλήρη υποστήριξη για MathML. Τα ΨΑΒ τύπου DAISY που υποστηρίζουν πλήρως τα μαθηματικά αναφέρονται και ως πλήρως DAISY ΨΑΒ.

Στην πλειοψηφία τους τα υπάρχοντα ακουστικά βιβλία είναι λογοτεχνικά, ενώ τα σχολικά βιβλία και πανεπιστημιακά συγγράμματα των θετικών επιστημών που περιέχουν μαθηματικές σχέσεις μετατρέπονται στην Ελλάδα μόνο με ηχογράφηση από φυσικό ομιλητή. Τα συστήματα αυτόματης μετατροπής Κειμένου-σε-Ομιλία (ΚσΟ) έχουν βελτιωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να παράγουν ΨΑΒ με σχεδόν φυσική φωνή χωρίς τη μεσολάβηση ηχογράφησης από ομιλητή, όμως δεν είναι σε θέση σήμερα να κάνουν αυτόματα τη μετατροπή Μαθηματικών-σε-Ομιλία. Το Εργαστήριο Φωνής & Προσβασιμότητας του Πανεπιστημίου Αθηνών σχεδίασε και υλοποίησε ένα σύστημα αυτόματης ακουστικοποίησης Μαθηματικών συμβόλων και εκφράσεων σε Ελληνική συνθετική ομιλία, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κατά την παραγωγή ΨΑΒ. Ως προς την αναπαραγωγή των ΨΑΒ σε μορφή DAISY απαιτείται ειδικό λογισμικό το οποίο μπορεί να αποκωδικοποιεί τις δομές και τη σημασιολογία της MathML ώστε να δώσει στο μαθητή τη δυνατότητα να πλοηγείται μέσα στο μαθηματικό περιεχόμενο. Το λογισμικό αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως Advanced MathML player [4].

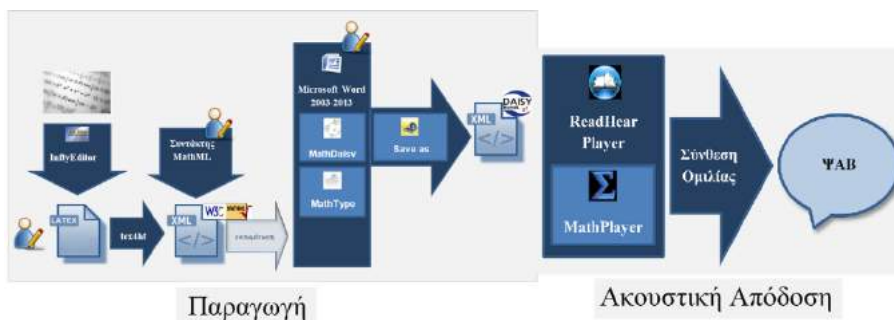
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση μιας μεθοδολογίας για την παραγωγή και απόδοση ΨΑΒ με Μαθηματικά στην Ελληνική γλώσσα καθώς και μια διαδικασία για την αξιολόγησή τους. Παρουσιάζουμε την απαιτούμενη ροή διαδικασιών και εργασιών, καθώς και το σύνολο των απαραίτητων εργαλείων λογισμικού για την παραγωγή και απόδοση των ΨΑΒ. Ακολουθώντας αυτή τη ροή μπορεί κάποιος να παράγει με επιτυχία ακουστικά βιβλία με μαθηματικά στην Ελληνική γλώσσα, δίνοντας στους μαθητές με εντυποαναπηρία ακουστική πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο για όλο το φάσμα των βιβλίων τους.

1. Προτεινόμενη μεθοδολογία

Η ηχητική απόδοση των μαθηματικών εκφράσεων ενός εγγράφου δεν είναι τόσο απλή όσο η απόδοση απλού κειμένου. Απαιτεί τη συνεργασία διάφορων εφαρμογών λογισμικού. Την τελευταία δεκαετία αναπτύχθηκαν πολλές εφαρμογές με στόχο τη μετατροπή Μαθηματικών-σε-Ομιλία. Το AudioMath [5] χρησιμοποιεί MathML για να εκφέρει ακουστικά τα μαθηματικά, το MathTalk [6] είναι ένα σύστημα ομιλίας μαθηματικών εκφράσεων που χρησιμοποιεί αναγνώρισης ομιλίας, το MathSpeak, μια εφεύρεση του Δρ Nemeth, ενσωματώνει ένα σύνολο κανόνων για την ομιλία μαθηματικών εκφράσεων μη διφορούμενα, το οποίο αργότερα βελτιώθηκε [7, 8], και έγινε μέρος του προγράμματος MathPlayer [9].

Τα βήματα που απαιτούνται για να λάβουμε ένα σωστό ΨΑΒ DAISY με μαθηματικά βρίσκονται εφαρμόζοντας αντίστροφη μηχανική (reverse engineering). Ο μόνος προηγμένος MathML DAISY player που είναι διαθέσιμος σήμερα για την απόδοση μαθηματικών είναι ο ReadHear (πρώην gh Player) [10]. Ο ReadHear συνεργάζεται με το MathPlayer για να εμφανίσει και να αποδώσει ακουστικά το μέρος του αρχείου DAISY που είναι γραμμένο σε MathML. Στην πλευρά του ανοικτού κώδικα, δεν βρίσκουμε ακόμα κάποιον editor για να παράγει πλήρη DAISY ΨΑΒ. Το DAISY Pipeline odt2braille είναι μια επέκταση ανοικτού κώδικα για το OpenOffice.org Writer το οποίο μπορεί να μετατρέψει τα αρχεία ODT σε DAISY-3 βιβλία, όμως, δεν μπορεί να παράγει DAISY με υποστήριξη για μαθηματικά [11]. Στην εμπορική πλευρά απ' την άλλη, υπάρχουν δύο λύσεις διαθέσιμες για να δημιουργήσουμε DTB με μαθηματικό περιεχόμενο. Η εφαρμογή MS-Word έχει τη δυνατότητα να παράγει DAISY χρησιμοποιώντας το δωρεάν πρόσθετο Save-As-DAISY [12]. Πέρα από αυτό, για να γίνει και η απαιτούμενη μετατροπή των μαθηματικών εκφράσεων σε MathML, απαιτείται η χρήση του MathDaisy [13]. Το ChattyInfty 3 [14] παράγει DAISY-2 βιβλία που υποστηρίζουν τα μαθηματικά. Στην περίπτωση του όμως όλες οι μαθηματικές εκφράσεις αντιμετωπίζονται ως εικόνες που συνοδεύονται από αρχεία ήχου. Προς το παρόν, το πρόγραμμα αυτό υποστηρίζει μόνο Ιαπωνικά και Αγγλικά. Η υποστήριξη της μητρικής γλώσσας του χρήστη σε ένα ομιλούν βιβλίο είναι δεδομένη αναγκαιότητα [4, 15, 16]. Το έργο AcceSciTech [17] σχεδιάζει να δημιουργήσει το πλαίσιο ZedAI, που θα παράγει τελικά EPUB 3, το οποίο καλύπτει το πλήρες DAISY.

Με βάση τα παραπάνω, η μεθοδολογία που προτείνουμε για την παραγωγή ΨΑΒ DAISY με υποστήριξη για τα μαθηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, από όπου προκύπτει ότι η ακουστική απόδοση των Μαθηματικών στα βιβλία DAISY είναι το αποτέλεσμα της διαδοχικής χρήσης ενός συνόλου εφαρμογών λογισμικού. Ξεκινώντας με ένα τυπωμένο βιβλίο Μαθηματικών, θα πρέπει αυτό να μεταγραφεί σε εμπλουτισμένο αρχείο εγγράφου (.docx) με MathML. Στη συνέχεια, θα μετατραπεί σε Πλήρες DAISY χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο που υποστηρίζει μαθηματικά. Στο τέλος, το βιβλίο Μαθηματικών DAISY θα αποδοθεί ακουστικά από ένα συμβατό DAISY Reader, ο οποίος με τη σειρά του θα κάνει χρήση ενός Συνθέτη Ομιλίας. Δεδομένου ότι η MathML δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μετατροπής από αρχείο εγγράφου σε αρχείο DAISY, τα εργαλεία που μπορούν να επιβάλουν λάθη στην τελική ακουστική απόδοση είναι το εργαλείο συγγραφής MathML και το εργαλείο ακουστικής απόδοσης MathML.



Σχήμα 1 Προτεινόμενη μεθοδολογία για παραγωγή και ακουστική απόδοση ΨΑΒ τύπου DAISY με πλήρη υποστήριξη μαθηματικών στην Ελληνική γλώσσα

1.1 Ανάπτυξη corpus

Μαθηματικές εκφράσεις. Σε μια πιλοτική μας μελέτη [18] χρησιμοποιήθηκαν οι μαθηματικές εκφράσεις που είχαν προταθεί στο σύστημα επεξεργασίας ήχου AsTeR [19]. Αποδείχθηκε πως το MathPlayer v.2 μπορεί να τις αποδώσει σωστά στην ελληνική γλώσσα. Για να ελέγξουμε περαιτέρω το MathPlayer, ή οποιοδήποτε σχετικό σύστημα, χρειαζόμαστε ένα ευρύτερο σύνολο των εκφράσεων (corpus). Αυτό το corpus πρέπει να φέρει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Να περιλαμβάνει όλα τα σύμβολα και τους τύπους που βρίσκονται στην ύλη του εθνικού προγράμματος σπουδών, μέχρι και τη β' βήθμια εκπαίδευση,
- Να έχει ένα κατάλληλο μέγεθος ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης,
- Να είναι κατηγοριοποιημένο βάσει του μαθηματικού περιεχομένου,
- Να έχει διαβαθμίσεις στο επίπεδο πολυπλοκότητας.

Για να δημιουργηθεί αυτό το corpus για τα ελληνικά εξετάστηκαν όλα τα σχολικά βιβλία μαθηματικών από το δημοτικό σχολείο ως το λύκειο για μαθηματικά σύμβολα και εκφράσεις. Οι εκφράσεις που βρέθηκαν κατατάσσονται στις ακόλουθες οκτώ κατηγορίες: (α) παράγωγοι, (β) κλάσματα, (γ) ολοκληρώματα, (δ) τα όρια, (ε) εκθέτες-δείκτες, (στ) σύνολα, (ζ) πίνακες, και (η) τριγωνομετρία. Παρόμοιες ταξινομήσεις μπορούν να βρεθούν και στην αξιολόγηση άλλων συστημάτων μετατροπής μαθηματικών σε ομιλία [5, 20]. Μετά από έλεγχο που έγινε, αποδεικνύεται πως το MathPlayer υποστηρίζει όλες τις κατηγορίες μαθηματικών που βρίσκονται στα ελληνικά σχολικά εγχειρίδια.

Στη συνέχεια, πρέπει να κρατήσουμε ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο από κάθε κατηγορία, γι' αυτό αφαιρούνται οι περιπτώσεις εκφράσεις όταν έχουν παρόμοια δομή και διαφέρουν μόνο στις αριθμητικές τιμές ή στους τελεστές. Σε μια προσπάθεια να αυξηθεί η δομική πολυπλοκότητα των εκφράσεων, έγινε επιλογή κάποιων εκφράσεων οι οποίες χρησιμοποιούνται στο βιβλίο μαθηματικών όρων του Spiegel [21], σε κάποιες μαθηματικές δημοσιεύσεις και σε διαδικτυακό υλικό μαθηματικών.

Επιλέχθηκαν συνολικά 130 εκφράσεις, οι οποίες ομαδοποιούνται σε δύο κύριες κατηγορίες ως προς την πολυπλοκότητα τους:

- Απλές εκφράσεις, που βρέθηκαν σε βιβλία,
- Πολύπλοκες εκφράσεις, που βρέθηκαν κυρίως σε επιστημονικές εργασίες.

Επιπλέον, ένα υποσύνολο των εκφράσεων ξαναγράφηκε χρησιμοποιώντας ένα μείγμα ελληνικών και αγγλικών στην ίδια έκφραση για να ελεγχτεί η ακουστική τους απόδοση. Εάν ο σύνθετης ομιλίας που χρησιμοποιείται υποστηρίζει και τις δύο γλώσσες, τότε θα πρέπει να αποδοθούν χωρίς προβλήματα. Το τελικό corpus που αναπτύχθηκε ονομάζεται UoAMathCorpus και είναι ελεύθερα διαθέσιμο [27].

Κείμενο με μαθηματικές εκφράσεις. Εκτός από τα παραπάνω σετ μαθηματικών εκφράσεων, συγκεντρώθηκε ένα ακόμη σύνολο με θεωρήματα έκτασης 8 σελίδων, με σκοπό να ελεγχτεί η απόδοση όταν περιπλέκονται κείμενο και μαθηματικά.

Σε αυτές τις σελίδες μπορεί κανείς να βρει:

- Μόνο Ελληνικά στις μαθηματικές εκφράσεις και το κείμενο,
- Μίξη Ελληνικών και Αγγλικών στις μαθηματικές εκφράσεις και μόνο ελληνικά στο κείμενο.

Οι μαθηματικές εκφράσεις και το κείμενο πρέπει να αποδοθούν όπως εμφανίζονται στο κείμενο του βιβλίου, αναφορικά με τη σειρά και το περιεχόμενο. Πολλές φορές όταν γράφουμε μαθηματικά στα ελληνικά, χρησιμοποιούμε αγγλικά σύμβολα στη θέση των Ελληνικών, όπως «x» αντί του «χ» (chi) και «y» αντί του «ψ» (psi). Εφόσον το σύστημα μετατροπής Κειμένου-σε-Ομιλία που χρησιμοποιείται υποστηρίζει και τις δύο γλώσσες, τότε το πρόγραμμα ακουστικής απόδοσης των μαθηματικών θα πρέπει επίσης να μην έχει πρόβλημα.

1.2 Επεξεργασία περιεχομένου

Χρησιμοποιώντας το MathDaisy για να παράγουμε ΨAB DAISY που υποστηρίζουν μαθηματικά, θα πρέπει το αρχικό αρχείο με τη MathML να είναι αρχείο εγγράφου (.docx). Ένα δημοφιλές πρόγραμμα επεξεργασίας WYSIWYG μαθηματικών που προτείνεται από το MathPlayer είναι το MathType [22]. Θα μπορούσαμε ακόμη να χρησιμοποιήσουμε κάποιο ανεξάρτητο εργαλείο συγγραφής MathML ή να παράξουμε τον κώδικα κάνοντας μετατροπή από LaTeX, χρησιμοποιώντας είτε ένα δωρεάν εργαλείο (π.χ. TeX4ht [23] για να παράγουμε XHTML + MathML) ή κάποιο εμπορικό εργαλείο (π.χ. GrindEQ [24]). Το μόνο διαθέσιμο εργαλείο που αναγνωρίζει μαθηματικά σε έντυπη μορφή ή PDF είναι το εμπορικό σύστημα ChattyInfty [14]. Μετά τη διόρθωση των λαθών του OCR χρησιμοποιώντας τον InftyEditor [15] και κώδικα LaTeX, μπορούμε να εξάγουμε το έγγραφο σε XHTML + MathML.

Οι μαθηματικές εκφράσεις του corpus γράφτηκαν με το MathType 6.9. Η χρήση των εναλλακτικών εργαλείων λογισμικού που μόλις αναφέρθηκαν θα παρήγαγε μη ταυτόσημες γραμμές MathML κώδικα και συνεπώς διαφορετική ακουστική απόδοση κατά την αναπαραγωγή. Η μέθοδος αξιολόγησης που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει την ακουστική ορθότητα και αποτελεσματικότητα όταν χρησιμοποιούνται εναλλακτικοί τρόποι συγγραφής MathML.

1.3 Αξιολόγηση της ακουστικής απόδοσης

Με το UoAMathCorpus [27] ο ερευνητής είναι σε θέση να ελέγξει μία-μία την ορθότητα της παραγόμενης MathML για τις εκφράσεις και τα θεωρήματα. Αφού βεβαιωθεί πως η MathML είναι σωστή, μπορεί να προχωρήσει στην αξιολόγηση του εργαλείου απόδοσης της MathML (που στην περίπτωσή μας είναι το MathPlayer). Οι λεξιλογικοί κανόνες, που δείχνουν τις δομικές πληροφορίες της κάθε πιθανής έκφρασης, πρέπει να προσαρμοστούν ορθά στην ελληνική γλώσσα, όπως και τα μαθηματικά σύμβολα. Το UoAMathCorpus μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για να ελεγχθούν μελλοντικές εκδόσεις του DAISY player και του MathPlayer ή ακόμη και νέα εργαλεία ακουστικής απόδοσης.

Το UoAMathCorpus χρησιμοποιείται σε δύο γύρους των δοκιμών [26]:

- Στον πρώτο γύρο, ένας βλέποντας ερευνητής, χωρίς καμία απώλεια ακοής και με άριστη γνώση των μαθηματικών όρων και συμβόλων που περιλαμβάνονται, πρέπει να ακούσει κάθε έκφραση, ενώ διαβάζει τη δυσδιάστατη απεικόνισή της. Κατά τη διάρκεια αυτού του γύρου σημειώνει πάνω στη δυσδιάστατη απεικόνιση όλους τους τύπους των μαθηματικών σφαλμάτων που έχουμε ορίσει: Διαγραφές (Δ), Εισαγωγές (Ε) και Αντικαταστάσεις (Α). Υπάρχει επίσης ένα νέο

είδος λαθών που ονομάζουμε Μεταφράσεις (M), όπου ένα μέρος της έκφρασης δεν μεταφράστηκε στην ελληνική γλώσσα.

- Στο δεύτερο γύρο, ο ίδιος ερευνητής πρέπει να ακούσει την κάθε έκφραση, χρησιμοποιώντας ένα χαμηλότερο ρυθμό ομιλίας, χωρίς όμως να βλέπει τη δυσδιάστατη απεικόνισή. Σε αυτή την περίπτωση θα σημειώνει παράλληλα ο ίδιος την οπτική απεικόνιση. Στη συνέχεια, θα συγκρίνει την οπτική αναπαράσταση της αρχικής έκφρασης με αυτή που ο ίδιος αντιλήφθηκε και θα σημειώνει τα σφάλματα (Δ, Ε, Α, Μ) στην αρχική έκφραση.

Ο ερευνητής θα κρατά σημειώσεις ταυτόχρονα με την ακουστική απόδοση των εκφράσεων και στους δύο γύρους, έτσι ώστε η ακουστική μνήμη του να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα. Στον πρώτο γύρο σημειώνει τα σφάλματα πάνω στις εκφράσεις, ενώ στο δεύτερο αρχικά σημειώνει τις αντιληπτές εκφράσεις και στη συνέχεια εντοπίζει τα σφάλματα. Στην περίπτωση που ο ερευνητής είναι άτομο με χαμηλή όραση ή τύφλωση θα κρατά σημειώσεις σε έναν υπολογιστή ή σε μια μηχανή braille γραμμένες σε κάποιο μαθηματικό κώδικα, όπως ο Nemeth ή ο Marburg. Στη συνέχεια, θα τις ξαναγράψει σε MathML και θα κάνει τις μετρήσεις των σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφεται στο [25]. Αφού ο ερευνητής θα έχει επιβεβαιώσει την ορθότητα της ακουστικής απόδοσης της κάθε έκφρασης, και ως εκ τούτου των συστημάτων συγγραφής και ακουστικής απόδοσης MathML, μπορεί να γίνει μια πλήρης μελέτη αποτελεσματικότητας του συστήματος, με τη συμμετοχή των διαφόρων ομάδων χρηστών, όπως τα άτομα με χαμηλή όραση ή τα άτομα με δυσλεξία, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφεται στο [18].

2. Αποτελέσματα

Ελέγχοντας την ακουστική απόδοση των μαθηματικών εκφράσεων του UoAMathCorpus, τα λάθη διπλασιάζονται όταν μεταβαίνουμε από την αρχική μεταφρασμένη έκδοση 2.1 του MathPlayer (που χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στον Internet Explorer) στη μη ελεγμένη μεταφρασμένη έκδοση 3.0 του MathPlayer (που χρησιμοποιείται στο ReadHear) (Πίνακας 1). Ο αριθμός των σφαλμάτων δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των υπο-εκφράσεων σε μια μαθηματική έκφραση. Επιπλέον, τα σφάλματα σε κάθε κατηγορία είναι επαναλαμβανόμενα και φθάνουν στο μέγιστο των 6 μοναδικών λαθών ανά κατηγορία. Στο δεύτερο γύρο ο ερευνητής εντόπισε ακόμη λιγότερα αφού ο ίδιος διόρθωσε υποσυνείδητα τα σφάλματα Μ.

Πίνακας 2.1 Σφάλματα Διαγραφής (Δ), Εισαγωγής (Ε), Αντικατάστασης (Α) και Μετάφρασης (Μ)

Κατηγορία	Λάθη του MathPlayer 2.1	Λάθη του MathPlayer 3.0
Παράγωγοι	6M, 1A	10M, 3A, 1Δ
Κλάσματα	0	3Δ
Ολοκληρώματα	8M	10M, 12A, 4Δ
Όρια	1M, 1Δ	2M, 12A, 1Δ
Εκθέτες-Δείκτες	7M, 1A	8M, 4A, 1Δ
Σύνολα	3M, 7A	9M, 3E, 1A, 5Δ
Πίνακες	11M	18M, 4Δ
Τριγωνομετρία	0	2Δ

Τα σφάλματα Δ και Μ παράγονται πιθανότατα κατά την απόδοση της εφαρμογής ακουστικής μετατροπής στα ελληνικά, ενώ τα σφάλματα Ε και Α παράγονται από την ίδια την εφαρμογή. Άρα, για να λάβουμε μια ορθή ακουστική απόδοση σε ένα βιβλίο DAISY-3 με πλήρη υποστήριξη μαθηματικών στα ελληνικά, θα πρέπει πρώτα να διορθωθούν τα αντίστοιχα μέρη της εφαρμογής ακουστικής απόδοσης.

3. Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε μια ροή εργασιών για την παραγωγή Ψηφιακών Ομιλούντων Μαθηματικών Βιβλίων σε μορφή DAISY η οποία αποδεδειγμένα δίνει σωστά αποτελέσματα στα ελληνικά. Επίσης προτείναμε μια μεθοδολογία, σε συνδυασμό με το UoAMathCorpus [27], για την εξέταση της ορθότητας της απόδοσης Μαθηματικών-σε-Ομιλία ώστε να μπορούμε να αναθεωρήσουμε όλα τα εργαλεία λογισμικού που εμπλέκονται στη ροή εργασιών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη στη δοκιμή διαφορετικών επεξεργαστών MathML, προκειμένου να αυξηθεί το πλήθος των εναλλακτικών εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη φάση παραγωγής των ΨΑΒ τύπου DAISY με Μαθηματικά.

4. Αναφορές

- [1] DAISY Consortium. www.daisy.org
- [2] D. Leas, E. Persoon, N. Soiffer, M. Zacherle «Daisy 3: a standard for accessible multimedia books» *IEEE Multimedia*, **4**, pp 28–37 (2008)
- [3] R. Ausbrooks, S. Buswell, D. Carlisle, S. Dalmás, S. Devitt, A. Diaz, R. Miner «Mathematical Markup Language (MathML) version 2.0» W3C Recommendation. World Wide Web Consortium (2003)
- [4] K. Yamaguchi, M. Suzuki «On necessity of a new method to read out math contents properly in DAISY» *Lecture Notes in Computer Science*, **6180**, pp 415-422 (2010)
- [5] H. Ferreira, D. Freitas «Enhancing the accessibility of mathematics for blind people: the AudioMath project» *Lecture Notes in Computer Science*, **3118**, pp 678-685 (2004)
- [6] R. Stevens, A. Edwards, P. Harling «Access to mathematics for visually disabled students through multimodal interaction» *Hum.-Comput. Interact.* **12**, pp 47–92 (1997)
- [7] M.D. Isaacson, S. Srinivasan, L. Lloyd «Development of an algorithm for improving quality and information processing capacity of MathSpeak synthetic speech renderings» *J. Disabil. Rehabil. Assistive Technol.* **5**, pp 83–93 (2010)
- [8] M.D. Isaacson, L. Lloyd, D. Schleppenbach «Reducing multiple interpretations of mathematical expressions with MathSpeak» In: *1st International Conference on TechnologyBased Learning with Disability*, Wright State University, Dayton, Ohio, pp 1-10 (2007)

- [9] N. Soiffer «MathPlayer v2. 1: web-based math accessibility» In: *Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. ACM Press, New York, pp 257-258 (2007)
- [10] ReadHear Player. <https://www.gh-accessibility.com/>
- [11] C. Strobbe, J. Engelen, V. Spiewak «Generating DAISY books from OpenOffice.org» *Lecture Notes in Computer Science*, **6179**, pp 5-11 (2010)
- [12] D. Archambault, V. Spiewak «OpenOffice.org save-as-daisy extension» In: *AAATE 2009*. edited by P.L Emiliani et al. IOS Press, pp 212-216 (2009)
- [13] Design Science. <http://www.dessci.com/en/products/mathdaisy/>
- [14] InftyProject. <http://www.inftyproject.org/en/index.html>
- [15] K. Yamaguchi, M. Suzuki «Accessible authoring tool for DAISY ranging from mathematics to others» *Lecture Notes in Computer Science* **7382**, pp 130-137 (2012)
- [16] M.V. Davydov, O. Lozytskyy, Y. Nikolskyy «Method of Automatic Formulas Reading in Ukrainian» Lviv Polytechnic National University MES of Ukraine, Ukraine (2013)
- [17] A. Bernier, D. Burger «AcceSciTech: a global approach to make scientific and technical literature accessible» *Lecture Notes in Computer Science*, **8011**, pp 283-290 (2013)
- [18] H. Kacorri, P. Riga, G. Kouroupetroglou «EAR-math: evaluation of audio rendered mathematics» *Lecture Notes in Computer Science* **8514**, pp 111-120 (2014)
- [19] T.V. Raman «ASTER-towards modality-independent electronic documents» *Multimedia Tools Appl.* **6**, pp 141–151 (1998)
- [20] D. Fitzpatrick «Towards Accessible Technical Documents: Production of Speech and Braille Output from Formatted Documents» Doctoral dissertation, Dublin City University (1999)
- [21] M. Spiegel, S. Lipschutz, J. Liu *Mathematical Handbook of Formulas and Tables, 3rd edn* McGraw-Hill, New York (1968)
- [22] Design Science. <http://www.dessci.com/en/products/mathtype/>
- [23] J. Polewczac «LaTeX, MathML, and TEX4HT: Tools for creating accessible documents» *Mathematics*, CSUN, Northridge (2005)
- [24] GrindEq. <http://www.grindeq.com/>
- [25] H. Kacorri, P. Riga, G. Kouroupetroglou «Performance metrics and their extraction methods for audio rendered mathematics» *Lecture Notes in Computer Science* **8547**, pp 614-621 (2014)
- [26] P. Riga, G. Kouroupetroglou, P.-P. Ioannidou «An Evaluation Methodology of Math-to-Speech in Non-English DAISY Digital Talking Books», *Lecture Notes in Computer Science* **9758**, pp 27-34 (2016).
- [27] UoAMathCorpus <http://speech.di.uoa.gr/math/uoa-corpus.xht>

Ακουστική περιγραφή ταινιών και δημοσίων προβολών για άτομα με προβλήματα όρασης

Τίνα Αγγέλου
Συγγραφέας
προσβάσιμου
περιεχομένου και
παραγωγός
προσβάσιμου
οπτικοακουστικού
υλικού

tina.aggelou@gmail.com

Θανάσης Παπαντωνόπουλος
Πιστοποιημένος ακουστικός
περιγραφέας και παραγωγός
προσβάσιμου
οτικοακουστικού υλικού

athanasios.palos@gmail.com

Χριστίνα Αλμπάνη
Σύμβουλος
Επαγγελματικού
Προσανατολισμού
Τυφλών / Κέντρο
Διαφοροδιάγνωσης
Διάγνωσης και
Υποστήριξης (ΚΕΔΔΥ)
Α' Αθήνας

christina.albani@yahoo.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια (από το 1981 και μετά) η διεθνής βιβλιογραφία έχει επισημάνει την αναγκαιότητα ακουστικής περιγραφής για την κατανόηση και πλήρη παρακολούθηση ταινιών, εκπαιδευτικών προγραμμάτων, εκθέσεων σε μουσεία, συνεδρίων, διαλέξεων κ.ά. Η ακουστική περιγραφή είναι η περιγραφή της εικόνας ή καλύτερα η αφηγηματική περιγραφή ώστε να είναι προσβάσιμη οποιαδήποτε οπτική πληροφορία σε άτομα με προβλήματα όρασης. Είναι ένα επιπρόσθετο κανάλι ήχου το οποίο αφηγείται μεταξύ διαλόγων το τι συμβαίνει στην οθόνη λαμβάνοντας υπόψιν την αφηγηματική ροή του σκηνοθέτη/τριας. Η παρουσία ακουστικής περιγραφής σε οποιαδήποτε πλευρά της καθημερινότητας των ατόμων με προβλήματα όρασης (εκπαίδευση, αθλητισμός, πολιτισμός κ.ά.) ενισχύει την αποτελεσματική και ουσιαστική συμμετοχή τους σε αυτήν.

Audio description of films and public views for the visually impaired

ABSTRACT

In recent years (1981 onwards), the need for audio description for understanding and full watching movies, educational programs, exhibitions in museums, conferences, lectures, etc. has been pointed out by international literature. Audio description is the description of an image or, in more appropriate terms, the visual description so that any visual information is accessible to the visually impaired. It is an additional audio channel that narrates, between the dialogues, what happens on the screen, taking into account the director's narrative flow. The presence of audio description in any aspect of everyday life of the people

with vision problems (education, sport, culture etc.) increases their effective and meaningful participation in it.

1. Η αναγκαιότητα της ακουστικής περιγραφής

Τα τελευταία χρόνια, η ακουστική περιγραφή έχει παρουσιαστεί ως μια αναγκαιότητα όχι μόνο για άτομα με μειωμένη όραση αλλά και για άτομα μεγάλης ηλικίας που έχουν προβλήματα όρασης ή ακόμη και για άτομα που ενδιαφέρονται να κάνουν κάποιες δραστηριότητες ακούγοντας τηλεόραση ή κάποια ταινία. Ακόμα και για δυσλεκτικά παιδιά ή παιδιά με μαθησιακές δυσκολίες. Στην χώρα μας, η ακουστική περιγραφή είναι μια καινούργια υπηρεσία που προσφέρεται μόνο τα τελευταία χρόνια σε αντίθεση με την Αμερική ή άλλες ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, η Ισπανία κ.ά. όπου εφαρμόζεται για πάνω από 15 χρόνια. Προσφέρεται κυρίως σε θεατρικές παραστάσεις, κινηματογραφικές ταινίες καθώς και σε ξεναγήσεις σε μουσεία. Σε διάφορες χώρες οι φορείς αναπήρων κάνουν προσπάθειες να αλλάξει η νομοθεσία που αφορά την προσβασιμότητα άτομων με προβλήματα όρασης σε οπτικό υλικό. Σε αυτό έχει βοηθήσει αρκετά και η χρήση ψηφιακής πλατφόρμας στην τηλεόραση. Μέσα από αυτή την εισήγηση θα προσπαθήσουμε να αναδείξουμε την σημασία της ακουστικής περιγραφής για την ψυχοσυναισθηματική αλλά και κοινωνική ανάπτυξη και ένταξη ατόμων με προβλήματα όρασης. Η ακουστική περιγραφή μπορεί να συμβάλει στον εμπλουτισμό των ερεθισμάτων και στην διαμόρφωση πολυποίκλων εμπειρών για άτομα με προβλήματα όρασης ανεξαρτήτου ηλικίας. Για παράδειγμα πόσο πιο ζωντανό, κατανοητό και σχεδόν άμεσα καταληπτό είναι ένα κεφάλαιο ιστορίας για μάθητές δημοτικού αν συνδυάζονταν η μελέτη ιστορικών στοιχείων με την ακουστική περιγραφή μιας μάχης; Η δυσλειτουργία του οπτικού καναλιού πρόσληψης ερεθισμάτων δημιουργεί και ανάλογη δυσκολία στην δημιουργία εικόνων και νοητικών χαρτών για τα άτομα με προβλήματα όρασης, κάτι που μπορεί σταδιακά να αμβλυνθεί μέσω της τεχνικής της ακουστικής περιγραφής. Είναι σημαντικό για μια σύγχρονη κοινωνία να παρέχει με οποιονδήποτε τρόπο στα μέλη της ίσες ευκαιρίες για εμπειρίες, ψυχοσυναισθηματική και κοινωνική ανάπτυξη. Κάτι τέτοιο δημιουργεί κοινωνία χωρίς διακρίσεις και αποκλεισμούς. (inclusive society)

2. Η διαδικασία της αντίληψης

Κάθε τι γύρω μας (αντικείμενα, γεγονότα, πρόσωπα, χώροι, σχέσεις) αποτελεί ερέθισμα για τις αισθήσεις μας. Το ερέθισμα αυτό εισέρχεται στα αισθητήρια όργανα της αφής, όσφρησης, γεύσης, κιναισθησης, ακοής, όρασης και αφήνει ένα αποτύπωμα στον εγκέφαλο, ένα είδος “εσωτερικής εικόνας”. Στη συνέχεια, αυτό το αποτύπωμα, αυτή η εικόνα αναλύεται, οργανώνεται, συνδυάζεται με άλλα αντικείμενα, γεγονότα, μνήμες κι ερμηνεύεται. Δημιουργείται έτσι μία αντίληψη, μια εμπειρία γι’ αυτό το αντικείμενο, γεγονός, πρόσωπο. Ο τρόπος που γίνεται αυτή η ερμηνεία καθώς και η κωδικοποίηση της αντίληψης είναι ένα από τα άλυτα θέματα της ψυχολογίας, γνωστό ως “πρόβλημα πνεύματος-σώματος” (Mind-Body Problem). Ίσως το μόνο που είναι σίγουρο, είναι ότι το αποτύπωμα παραμένει

αμετάβλητο, παρ' όλο που το αντικείμενο μπορεί ν' αλλάζει, ανάλογα με το φως ή το περιβάλλον (αλλαγή θέσης, κάλυψη από άλλα αντικείμενα κ.λ.π.). Το ενδιαφέρον είναι ότι πηγή του αντιληπτικού μας συστήματος είναι κυρίως η αισθητήρια αποτύπωση στον εγκέφαλο κι όχι το ίδιο το εξωτερικό ερέθισμα. Όταν υπάρχει απώλεια ή ποσοστιαία βλάβη σε κάποιο αισθητηριακό κανάλι ή όργανο τότε η καταγραφή-αποτύπωση των εξωτερικών ερεθισμάτων είναι ελλιπής ή απουσιάζει παντελώς. Τότε και η επεξεργασία της πληροφορίας είναι ελλιπής. Αντίστοιχα φυσικά και η αντίληψη και η εμπειρία. Για παράδειγμα, βαρήκοοι και κωφοί σε όλο το κόσμο επικοινωνούν με τη νοηματική γλώσσα. Η νοηματική είναι μια γλώσσα που προσλαμβάνεται οπτικά, δηλαδή με τα μάτια και εκφέρεται κινητικά με τα χέρια, τις εκφράσεις του προσώπου, τις στάσεις και κινήσεις κεφαλιού και σώματος. Εδώ τα οπτικά και κιναισθητικά ερεθίσματα αντικαθιστούν τις ηχητικές πληροφορίες. Καταφέρνουν να δημιουργήσουν μέσα από ένα άλλο κανάλι, αυτό που όλοι, ακούντες και μη θα δημιουργούσαν: τις «εσωτερικές εικόνες των πληροφοριών». Σε αυτά τα αρχεία των πληροφοριών βασίζεται ο εγκέφαλος για να κάνει τις γνωστικές διεργασίες του, δηλαδή τις συσχετίσεις και τις ερμηνείες, που θα χτίσουν την εμπειρία, θα δημιουργήσουν την αντίληψη και την συνείδηση. Τυφλοί ή άνθρωποι με μειωμένη όραση μπορούν να δημιουργήσουν εσωτερικές εικόνες αν τους δοθούν κατάλληλες πληροφορίες μέσω των άλλων αισθήσεων. Για παράδειγμα, αν -αντί να δουν την εικόνα - ακούσουν την περιγραφή της εικόνας με λέξεις, τότε θα μπορέσουν να δημιουργήσουν στο νου τους το δικό τους αποτύπωμα της πληροφορίας που αυτή η εικόνα περιέχει. Αυτή είναι η διαδικασία της ακουστικής περιγραφής.

3. Ακουστική Περιγραφή

“... όταν βλέπουμε με τ' αυτιά μας...”

Είναι μια υπηρεσία που προσφέρει τη δυνατότητα σε άτομα με προβλήματα όρασης να έχουν πρόσβαση στην πληροφορία που προσφέρει η εικόνα είτε πρόκειται για τηλεοπτικά προγράμματα, κινηματογραφικές ταινίες, θεατρικές παραστάσεις κι άλλες μορφές οπτικής τέχνης (γλυπτική, ζωγραφική, αρχιτεκτονική) ή ακόμα και κοινωνικές εκδηλώσεις. Σκοπός της ακουστικής περιγραφής είναι η αντικειμενική αφηγηματική περιγραφή της εικόνας, είτε πρόκειται για εκδήλωση (θέατρο, μουσείο, παρέλαση) είτε πρόκειται για καταγεγραμμένη εικόνα (έντυπη όπως ένα βιβλίο, περιοδικό, εφημερίδα ή τηλεόραση, κινηματογράφος, διαδίκτυο). Χρειάζεται ο ακουστικός περιγραφέας, ο οποίος πρέπει να είναι εξειδικευμένος, να ξέρει τι να περιγράψει, με ποιά σειρά, πότε και με ποιον τρόπο. Χρειάζεται να αναδείξει τα κρυφά ή φανερά σημαντικά από σημειολογική άποψη στοιχεία της εικόνας. Ακόμα, να το κάνει αυτό με συντομία ώστε να μη χάσει το έργο το δραματουργικό ρυθμό του (ειδικά αν είναι ταινία ή τηλεοπτικό πρόγραμμα). Σημαντικό επίσης είναι να μην περιλαμβάνει στην περιγραφή του πληροφορίες που δίνονται ή υπονοούνται από το ηχητικό κανάλι (για παράδειγμα ,στοιχεία που αναφέρονται στο διαλόγο).

4. Παραδείγματα:

4.1.Εικονογραφημένο Ψηφιακό Βιβλίο

με θέμα το ιδρυτικό μύθο των Ολυμπιακών Αγώνων .

4.2. *Κόμικ με τίτλο: Οι Περιπέτειες στο Γαλαζία μας .*

4.3. *Κινηματογράφος*

Η μικρά Αγγλία

Κάλπικη Λίρα

Αισθηματίες (Τριανταφυλλίδης)

4.4. *Ντοκουμαντέρ*

Ο Αγώνας των Τυφλών

4.5. *Παιδική ταινία*

Ο δρόμος προς την Ευτυχία

4.6. *Θέατρο*

Ομάδα ΘΕ.Α.ΜΑ: Πέρσες

4.7. *Τηλεοπτικό πρόγραμμα*

Κουκλομελάδες

Σε ορισμένα είδη, όπως για παράδειγμα σε ένα παραμύθι όπως είδαμε η ακουστική περιγραφή μπορεί να συμπληρωθεί και με ηχοτοπία ή με μουσική που θα προμηθεύσουν περισσότερες πληροφορίες για την ατμόσφαιρα της εικόνας. Ο λόγος στην ακουστική περιγραφή είναι σύντομος και συγκεκριμένος. Ο λόγος πρέπει να είναι πληροφοριακός χωρίς ερμηνευτικά στοιχεία.

5. Ιστορία της Ακουστικής Περιγραφής

Ουσιαστικά ακουστική περιγραφή υπάρχει κάθε φορά που κάποιος σκύβει να ψιθυρίσει στο αυτί του διπλανού του για να του επισημάνει κάτι. Το 1964 ο Chet Avery, τυφλός υπάλληλος στο Τομέα εκπαίδευσης στις Ηνωμένες Πολιτείες πληροφορήθηκε για ένα ειδικό πρόγραμμα νοηματικής διερμηνείας ταινιών για κωφούς και σκέφτηκε να δημιουργήσει κάτι ανάλογο και για τυφλούς. Ζήτησε χρηματοδότηση από σχετικούς οργανισμούς για ακουστική περιγραφή ταινιών αλλά χωρίς καμία ανταπόκριση. Το 1980 ο διευθυντής του θεάτρου Arena Stage οργάνωσε μία ομάδα με στόχο την προσβασιμότητα των παραστάσεων του. Αναμεσα τους ήταν ο Avery και η Margaret Pfanstiehl, τυφλή ακτιβίστρια, η οποία είχε ήδη ιδρύσει το Metropolitan Washington Ear, μια ραδιοφωνική υπηρεσία όπου διαβάζονταν εφημερίδες, περιοδικά και λογοτεχνικά έργα για τυφλούς ή άλλους ανθρώπους που δεν είχαν πρόσβαση σε έντυπα. Έτσι, πολύ σύντομα δημιουργήθηκε η πρώτη ακουστική περιγραφή για τα θεατρικά έργα στο Arena Stage. Ήδη πια στις Ηνωμένες Πολιτείες από το 1990 η ακουστική περιγραφή υπήρχε σε ταινίες και τηλεοπτικά προγράμματα. Στην Ελλάδα η ακουστική περιγραφή ξεκίνησε το 1990 με συνοδούς σε θεατρικές παραστάσεις, επισκέψεις σε μουσεία κλπ. Στον οπτικοακουστικό χώρο τα interactive dvd ήταν τα πρώτα που διέθεταν την επιλογή για ακουστική περιγραφή. Σε τηλεοπτικά προγράμματα η ακουστική περιγραφή έκανε την εμφάνισή της το 2005 ενώ στον κινηματογράφο μόλις το 2015. Στο

θέατρο η ακουστική περιγραφή μπορεί να είναι είτε ζωντανή είτε ηχογραφημένη. Οι δε ενδιαφερόμενοι θεατές την ακούν από ακουστικά. Το ίδιο ισχύει και για τον κινηματογράφο, όπου είναι συνήθως ηχογραφημένη. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει και σχετική εφαρμογή στα κινητά.

6. Σημειολογία της εικόνας και ακουστική περιγραφή

Κάθε εικόνα είναι ένα φάσμα πληροφοριών. Στο πρώτο επίπεδο είναι η αναπαράσταση αντικειμένων, χώρων, ανθρώπων. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, οι κρυφές ή φανερές σχέσεις τους, σ' ένα τρίτο τα σύμβολα που περιέχονται. Σε ένα τέταρτο, οι σχέσεις με άλλα αντικείμενα στην ίδια εικόνα ή με άλλες σχετιζόμενες εικόνες. Τέλος σε ένα πέμπτο επίπεδο, οι σχέσεις τους με το κόσμο των ιδεών, τη φιλοσοφία, την ιστορία, το συλλογικό ασυνείδητο. Οι άνθρωποι με προβλήματα όρασης εμποδίζονται να αντιληφθούν μόνο το πρώτο επίπεδο ανάγνωσης των εικόνων, δηλαδή την αναπαράσταση. Μπορούν όμως να συσχετίσουν, να ερμηνεύσουν, να παράγουν σκέψη και συνείδηση, όπως όλοι οι άλλοι. Η ακουστική περιγραφή βοηθά στη παροχή πληροφοριών σε αυτό το πρώτο επίπεδο, ώστε ανεμπόδιστα να προχωρήσουν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας των πληροφοριών.

7. Η ακουστική περιγραφή μας αφορά όλους.

Η πλήρης κατανόηση, μάλλον η αποκρυπτογράφηση μιας εικόνας, που ο δημιουργός της συνειδητά ή ασυνείδητα έχει τοποθετήσει απαιτεί εκπαίδευση, τόσο στους βλέποντες όσο και σε μη βλέποντες. (τυφλούς ή ανθρώπους με μειωμένη όραση). Στη σύγχρονη εποχή, της γρήγορης εναλλαγής εικόνων, συνηθίσαμε να κοιτάμε αλλά να μην βλέπουμε, κι ακόμη λιγότερο να παρατηρούμε.

Η ακουστική περιγραφή μπορεί να βοηθήσει όλους μας ανεξαιρέτως να κατανοούμε καλύτερα και βαθύτερα μια εικόνα, κι επομένως και τον κόσμο γύρω μας. Στον εκπαιδευτικό χώρο, η ακουστική περιγραφή μπορεί να γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο, ώστε τα παιδιά ν' αναπτύξουν την φαντασία τους, να οξύνουν την παρατηρητικότητα τους, να μάθουν να εκφράζονται με λέξεις και εικόνες, να συσχετίζουν τη λέξη με την εικόνα, να μάθουν πώς κάθε τι, ακόμα και το πιο μικρό πράγμα έχει σημασία.

8. Επίλογος

Έτσι κάτι που ξεκίνησε αρχικά για λόγους προσβασιμότητας για τυφλούς και ανθρώπους με μειωμένη όραση, μπορεί να γίνει ένα χρήσιμο εργαλείο στην εκπαίδευση, να βοηθήσει παιδιά με μαθησιακές δυσκολίες, να διευρύνει την αντίληψη και τα εκφραστικά μας μέσα και τελικά να διαφοροποιήσει και να εξελίξει όλη τη κοινωνία.

9. Βιβλιογραφία

1. Gibson, J. (1966) *The Senses Considered as Perceptual Systems*. Cornell University, New York.
2. Koffka, K (1936) *Principles of Gestalt Psychology*. Routledge, Oxon.

3. Neisser, U. (1976) Cognition and Reality. Freeman & Co Ltd, New York.
4. Αρχαίοι Έλληνες Κλασσικοί (2006) Αριστοτέλης: Περί αισθήσεων και αισθητών. Περί ζώων πορείας. Περί ζώων κινήσεως. Εκδόσεις DeAgostini Hellas, Αθήνα.

Συνεδρια Β1: Ηλεκτροακουστική

Ακουστική ευθυγράμμιση γραμμικών συστοιχιών με διατάξεις υπο-χαμηλόσυχνων πηγών σε συστήματα ηχοτροφοδοσίας ανοιχτών χώρων

Λιούτας Γεώργιος^{1a} & Χρήστος Σεβαστιάδης^{1b} & Γεώργιος Παπανικολάου^{1c}

¹Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

^aglioutas@auth.gr, ^bcsevast@auth.gr, ^cpap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι γραμμικές συστοιχίες επικρατούν στα σύγχρονα συστήματα ηχοτροφοδοσίας όπου το εύρος αναπαραγωγής μοιράζεται σε επιμέρους ζώνες συχνότητας. Διατάξεις από υπό-χαμηλόσυχνες πηγές, ως επί το πλείστο στοιβάζονται στο έδαφος, λόγω της ενίσχυσης της ακουστικής τους ισχύος και προορίζονται για την αναπαραγωγή των πρώτων τριών οκτάβων, ενώ αναρτημένες γραμμικές ηχητικές συστοιχίες πλήρους εύρους καλύπτουν μεγάλα ακροατήρια. Η εργασία έχει ως αντικείμενο την ακουστική προσαρμογή - συντονισμό του ηχητικού συστήματος ούτως ώστε να μην εμφανίζονται σημεία στην περιοχή ακρόασης με μη συνεκτικό ήχο και να εξαιρεθούν περιοχές ακρόασης με μεγάλη σχετική διακύμανση της στάθμης SPL.

Alignment of line arrays & subwoofer arrays in open air sound reinforcement systems

ABSTRACT

Line arrays prevail at the modern sound reinforcement systems, where the frequency range, being reproduced, is divided into individual bands. Subwoofers, being responsible for the first 3 octaves are placed on the ground at most cases, to take advantage of the power enhancement while full range are preferred to be flown to cover large distance audiences. The sound system tuning is of great importance and the subject of this paper since regions in the audience area that are

characterized by non-coherent sound and big relevant variance of sound pressure level should be eliminated.

Εισαγωγή

Η ακουστική προσαρμογή του συστήματος κρίνεται ως απαραίτητη διαδικασία ενός υψηλού επιπέδου σαφήνειας και ποιότητας του ήχου. Οι διαφορετικοί χρόνοι άφιξης των ηχητικών κυμάτων, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, έχουν ως επακόλουθο την εμφάνιση κτενωτού φιλτραρίσματος και ανεπιθύμητων πλευρικών λοβών. Η ρύθμιση της σωστής χρονοκαθυστέρησης τόσο μεταξύ των subwoofers όσο ανάμεσα στα επιμέρους υποσυστήματα απαιτείται ώστε να επιτευχθεί η ταυτόχρονη άφιξη των ακουστικών κυμάτων, στην περιοχή του ακροατηρίου, ώστε να παρατηρείται ωφέλιμη συμβολή. Η ευθυγράμμιση του συνολικού συστήματος συνιστά την διαδικασία για την επίτευξη χωρικό-συχνοτικής ομοιομορφίας ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα καταστρεπτικής συμβολής, τα οποία γίνονται ιδιαίτερα αντιληπτά στην περιοχή του συχνοτικού διαχωρισμού. Όσον αφορά την διάδοση του ήχου σε εξωτερικό χώρο, η απορρόφηση λόγω αέρα είναι χαμηλή για τις χαμηλές συχνότητες.

Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος, τις τελευταίες δεκαετίες έχει συνεισφέρει αισθητά στον έλεγχο της απόκρισης και της κατευθυντικότητας των line arrays αλλά ο συντονισμός ολόκληρου του συστήματος συνεχίζει να προσελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών [4]. Συστήματα μέτρησης εκμεταλλεύονται για να ελεγχθεί τόσο η κρουστική όσο η συχνοτική απόκριση του εκάστοτε συστήματος. Ένα ιδανικό σύστημα παρουσιάζει επίπεδη συχνοτική απόκριση και γραμμική φασική απόκριση στην ζώνη ενδιαφέροντος ενώ η κρουστική απόκριση ενός συστήματος τέτοιου είδους είναι μία καλώς ορισμένη συνάρτηση sinc, ολισθημένη στον χρόνο από την καθυστέρηση του συστήματος και δεν παρουσιάζει γραμμική παραμόρφωση πλάτους.

1. Γραμμικές συστοιχίες

Οι γραμμικές ηχητικές συστοιχίες ενδείκνυνται για δρώμενα που το ακροατήριο καλύπτει μεγάλες αποστάσεις. Στο κοντινό πεδίο εκπομπής [1], λόγω του ‘κυλινδρικού’ μετώπου κύματος δεν ισχύει ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου και έχουμε πτώση στάθμης, Sound Pressure Level (SPL) 3 dB, ενώ στο μακρινό πεδίο έχουμε πτώση της στάθμης κατά 6 dB, για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η ευρεία κάλυψη στο οριζόντιο επίπεδο και ιδιαίτερα κατευθυντική κάθετη κάλυψη, επιτυγχάνοντας μεγάλο κέρδος. Η στάθμη πίεσης ενός σήματος σε dB SPL δίνεται από τον τύπο:

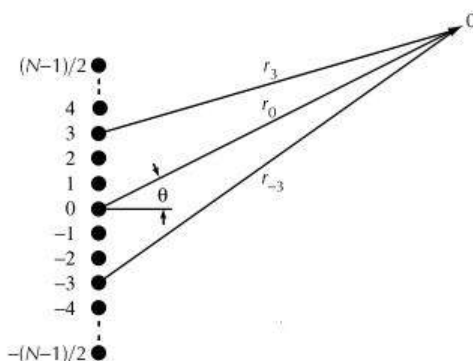
$$SPL = 20 * \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad (1.1)$$

Όπου $P_{ref}=20$ μPa

Η ακουστική πίεση που παράγεται σε ένα σημείο παρατήρησης απόστασης r_n , στο μακρινό πεδίο, εξαιτίας μία μονοπολικής πηγής είναι :

$$p_n = \frac{A}{r_n} D(\theta, \varphi) e^{j(\omega t - kr_n)} \quad (1.2)$$

Όπου $D(\theta, \varphi)$ η συνάρτηση κατευθυντικότητας του κάθε ηχείου



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση συστοιχίας N διακριτών πηγών

2. Μέθοδοι ευθυγράμμισης & Προσομοιώσεις

Ο έλεγχος των διαφορών στους χρόνους άφιξης των επιμέρους υποσυστημάτων που οφείλεται στις διαφορετικές τοποθεσίες των επιμέρους ηχητικών πηγών αποτελεί μία τεχνική. Η καθυστέρηση του μετώπου κύματος που προηγείται είτε από το διάγραμμα της κρουστικής απόκρισης (IR) ή της καμπύλης ενεργειακής περιβάλλουσας (ETC) συνιστά μία διαδεδομένη τεχνική. Η καθυστέρηση ομάδας (group delay) που υποδηλώνει τον ρυθμό μεταβολής της φάσης ανά συχνότητα μπορεί να μας δώσει μία ακριβή τιμή χρονοκαθυστέρησης, εφόσον έχει υπολογιστεί ορθά η φασική απόκριση του συστήματος. Για να ληφθεί ένα έγκυρο ίχνος φάσης, γίνεται αντιστάθμιση ως προς την απόσταση της κοντινότερης πηγής από το σημείο ελέγχου. Το σύστημα που φθάνει νωρίτερα είναι αυτό με τις λιγότερες εναλλαγές φάσης, από την στιγμή που μία πιο απότομη καμπύλη φάσης υποδηλώνει μεγαλύτερη καθυστέρηση.

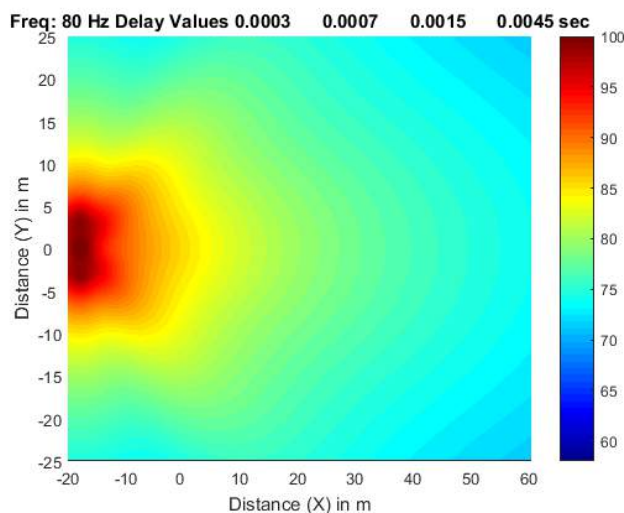
Οι αποκρίσεις των διατάξεων στα σημεία ελέγχου υπολογίζονται με χρήση μιγαδικού αθροίσματος (complex sum) όλων των πηγών ώστε να ληφθεί υπόψη η κυματική συμβολή (wave interference). Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι αναλυτικές και στηρίζονται στην κυματική εξίσωση σημειακής πηγής ενώ τα φαινόμενα περίθλασης των γειτονικών ηχείων αγνοούνται. Το ύψος ακροατή λαμβάνει μία τυπική τιμή 1.7 m, το εύρος χρονικών τιμών που ελέγχθηκε είναι [0-10] ms ενώ το βήμα διακριτοποίησης του συναυλιακού χώρου είναι 0.1m για μεγαλύτερη ακρίβεια.

3.1 Διεύρυνση του κύριου λοβού της διάταξης subwoofers

Σε εξωτερικούς χώρους αποτελεί συχνή τακτική η χρήση μίας κεντρικής οριζόντιας διάταξης από subwoofers. Δύο πηγές που απέχουν κατά μία απόσταση περιττού πολλαπλάσιου μισού μήκους κύματος (της αντίστοιχης συχνότητας αναπαραγωγής) οδηγούν σε ακύρωση. Συνεπώς για να υπάρξει πλήρης έλεγχος του προτύπου ακτινοβολίας για την συμπεριφορά της συστοιχίας εντός ολόκληρου του εύρους λειτουργίας των Subwoofers, η απόσταση πρέπει να είναι αρκετά μικρή. Όταν χρησιμοποιούνται καρδιοειδή subwoofers, υπάρχει ήδη μία αξιολογημένη απόσβεση προς τις άκρες, έτσι ώστε οι ανεπιθύμητοι λοβοί να καταστέλλονται ως έναν βαθμό. Στην περίπτωση μας θεωρήθηκε μία οριζόντια διάταξη από 8 subwoofers, όπου οι πανκατευθυντικές πηγές απέχουν μεταξύ τους 1.4 m.

Πίνακας 3.1 Τυπική απόκλιση για τις κεντρικές συχνότητες τριτοκτάβων

Τυπική απόκλιση (σε dB)	63 Hz	80 Hz	100 Hz	120 Hz
Χωρίς καθυστέρηση	5.0935	6.7840	7.6409	8.1097
Με 4 ζεύγη καθυστέρησης	4.8389	4.8311	4.9796	4.9861



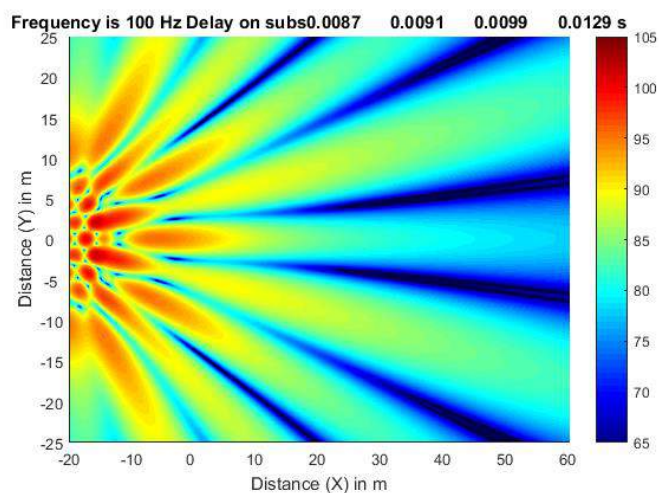
Σχήμα 3.1 Απεικόνιση της στάθμης SPL για την συχνότητα 80 Hz μετά την εφαρμογή 4 ζευγών χρονοκαθυστέρησης στα subwoofers

3.2 Ευθυγράμμιση πλήρους συστήματος

Η οριζόντια σειρά από subwoofers, μετά την βελτιστοποίηση του προτύπου της συνδυάζεται με 2 γραμμικές συστοιχίες, απεικονίζοντας ένα τυπικό σενάριο συστήματος ηχοτροφοδοσίας. Για τα συστήματα με crossover, η περιοχή του συχνοτικού διαχωρισμού είναι ευαίσθητη ως προς την ευθυγράμμιση, επειδή τα δύο συστήματα συμβάλλουν με παρόμοιο πλάτος. Υπάρχει μία συχνότητα crossover μεταξύ των 2 συστημάτων για την οποία η φάση είναι η ίδια ώστε να συμβάλουν ωφέλιμα τα ηχητικά κύματα. Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί σαν συχνότητα crossover τα 100 Hz. Οι 2 γραμμικές συστοιχίες είναι αναρτημένες σε ύψος 8 μέτρα από το έδαφος, στα άκρα μίας σκηνής μήκους 18 m ενώ βρίσκονται 4m πίσω από την οριζόντια γραμμική συστοιχία των subwoofers. Για την περιοχή αναφοράς στον χώρο (FOH – Front of House) υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) της στάθμης SPL και η μέση τιμή SPL. Σαν σήμα εισόδου θεωρήθηκε σήμα ροζ θορύβου (1/f θόρυβος) και η καμπύλη ενεργειακής περιβάλλουσας του line array συστήματος αποκτά την μέγιστη τιμή με χρονική καθυστέρηση 8.4 ms.

Πίνακας 3.2 Επίδραση της ευθυγράμμισης για τις 2 ακόλουθες μετρικές

	Τυπική απόκλιση (σε dB)	Μέση τιμή (σε dB)
Πριν την ευθυγράμμιση	5.9708	83.5596
Μετά την ευθυγράμμιση	4.1161	84.8184



Εικόνα 3.2 Απεικόνιση της στάθμης SPL του συνολικού συστήματος μετά την ευθυγράμμιση

4. Συμπεράσματα

Προσδίδοντας κατευθυντικότητα στις διατάξεις υπο-χαμηλόσυχνων πηγών η ενέργεια μπορεί να εστιάσει στο ακροατήριο, ώστε να εκμεταλλευθεί πλήρως. Οι διαφορές στους χρόνους άφιξης της αρχικής ενέργειας μεταξύ του κύριου συστήματος και του συστήματος των subwoofers είναι ένα πρώτο βήμα ώστε να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση στο πεδίο του χρόνου αλλά είναι αναπόφευκτό ότι θα υπάρξει μία περιοχή στον χώρο όπου τα επιμέρους υποσυστήματα θα είναι σε σχεδόν τέλεια ευθυγράμμιση. Η στατιστική μετρική της τυπικής απόκλισης επαληθεύει την αναγκαιότητα της χρονικής ευθυγράμμισης.

5. Αναφορές

[1] Γ. Παπανικολάου *Ηλεκτρακουστική* University Studio Press (2005)

[2] Charlie Hughes « *Subwoofer Alignment with a Full-Range System*» 127th AES – New York (2009)

[3] Stefan Feistel *Modeling the Radiation of Modern Sound Reinforcement Systems in High Resolution* Logos Verlag Berlin GmbH (2014)

[4] Fernando Vidal Wagner and Vesa Välimäki «*Automatic calibration and equalization of a line array system*» 18th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15) (2015)

***Acoustic Study of the Live Room of Laboratory of Music
Acoustics Technology, Department of Music Studies,
University of Athens***

Eleni Tavelidou
Master's Student /
Southampton Solent
University, UK
3TAVEE12@solent.ac.uk

Aglaia Foteinou
Lecturer /
University of Wolverhampton,
Walsall, UK
A.Foteinou@wlv.ac.uk

Charalampos Spyridis
Professor /
University of Athens,
Athens, GR
hspyridis@music.uoa.gr

ABSTRACT

This paper examines the acoustic characteristics of the Sound Studio Laboratory of Music Acoustic Technology (LabMAT) at the Department of Music, University of Athens. Following the up-to-date recommendations of ISO3382-1 standards (2009), the recent acoustic measurements provide more accurate and detailed information about the acoustic characteristics of the space. Eight acoustic parameters (T30, EDT, C50, C80, D60, Ts, IACC, LF) have been calculated across six frequency bands, which are obtained from impulse responses taken from eight listening positions and the variation of three acoustic configurations of the existing panels on the walls. The outcomes of this paper can be used as guidance for the users of the space at its current stage, offering choices of acoustic configurations of the panels for individual recordings.

Ακουστική Μελέτη της Αίθουσα Ηχογραφήσεων στο Εργαστήριο Ακουστικής του Τμήματος Μουσικών Σπουδών, του Πανεπιστημίου Αθηνών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ακουστική του Studio Ήχου του Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής Τεχνολογίας στο Τμήμα Μουσικών σπουδών, του Πανεπιστημίου Αθηνών εξετάζεται στην παρούσα έρευνα. Ακολουθώντας τα ISO3382-1 standards (2009), αναλυτικότερες και πιο ακριβείς ακουστικές μετρήσεις μπορούν να επιτευχθούν για τη μελέτη του ηχητικού πεδίου στο χώρο. Κρουστικές αποκρίσεις λήφθηκαν σε οκτώ θέσεις στο χώρο και διαφοροποιώντας τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου με τρεις συνδυασμούς των ακουστικών διατάξεων στους τοίχους του χώρου. Τα αποτελέσματα οκτώ ακουστικών παραμέτρων (T30, EDT, C50, C80, D60, Ts, IACC, LF) υπολογίστηκαν σε έξι ζώνες συχνότητας, και παρουσιάζονται εδώ ως

κατευθυντήριες οδηγίες για τους χρήστες του χώρου ανάλογα με τις ακουστικές ανάγκες των ηχογραφήσεων.

Introduction

A recording space should not only be characterised as “good” based solely on the fitted equipment, but also on the acoustics of its live room. The acoustic signature of live rooms is often immediately recognisable by the listener and, due to its appealing, it has been used to create the characteristic musical sound of commercial recordings [1]. In addition, in multiple-purpose recording spaces, acoustic variability is desirable in order to cover the acoustic needs for different sound sources. However, no protocol is available to the acousticians for designing the acoustics of the space.

The Sound Studio of the Laboratory of Music Acoustics Technology (LabMAT) at the Department of Music Studies of the University of Athens is located on the 3rd floor at the School of Philosophy. It consists of three main spaces being the Mixing Suite, the Control Room and the Live Room. It is equipped with the state-of-the-art technology for recordings and sound production, and it is used for teaching, professional recordings and research activities. Its capacity is suitable to host teaching sessions, big musical ensembles or even a symphonic orchestra, while the soundproof booth, which is included in this space, provides a controlled acoustic environment for accurate recordings.

1. Acoustic Description of the Space

The acoustic design of the space was carried out by ETA Acoustics Ltd in 2001. The company installed rotating-wall acoustic panels, as well as a set of sliding acoustic panels mounted on a rail system approximately in the middle area. The sliding panels can be used to divide the space into two rooms and modify the acoustics of the space according to the user’s needs. Furthermore, there are three rows of skyline diffusers along the ceiling to prevent colorations and create a diffuse field within the space.

*Table 1 Estimation of the reverberation time provided by ETA Acoustics for the largest section of the divided space for two scenarios (all panels are absorptive and all reflective panels in use, *except for one of absorptive walls by default)*

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
All Absorptive						
RT60 (by Sabine)	0.52	0.54	0.61	0.63	0.63	0.6
RT60 (by Eyring)	0.42	0.44	0.51	0.53	0.52	0.47
Reflective Panels*						
RT60 (by Sabine)	0.54	0.66	0.9	0.97	0.98	0.89
RT60 (by Eyring)	0.44	0.56	0.8	0.85	0.85	0.72

Considering the permanent fixtures and the multi-purpose use of the space, this paper focuses on the acoustic behaviour of the largest section of the divided space of the live room for three different configurations of the acoustic panels. ETA Acoustics Ltd provided the estimated reverberation time for this particular part of the live room, by using Eyring and Sabine equations (table 1.1).

The present study aims to provide a more detailed acoustic analysis of the space, based on the state-of-the-art measurement techniques.

2. Acoustic Measurement Technique

The Exponential Sine-Sweep (ESS) method was used for capturing the impulse responses. This method offers significant advantages compared with previous techniques used for acoustic measurements [2]. Furthermore, ESS is the method recommended by the latest ISO3382 standards [3].

As sound source, an OmniPower Omnidirectional Sound Source Type 4292-L (dodecahedral) Brüel & Kjær speaker was used, while three microphones were used as the receivers. In detail, a Behringer ECM-8000 omnidirectional microphone (for the study of the monoaural parameters), a Neumann KU-100 dummy head for binaural measurements (for the study of IACC) and an Audio Technica AT4050 with a figure-of-eight polar pattern (for the study of LF in combination with the ECM-8000), all complying with the ISO3382-1 standards (2009). All measurements were performed with a sample rate of 96kHz and 24-bit bit depth.

The logarithmic sine-sweep excitation signal was generated from Aurora Plug-in in Audacity, with frequency range of 22Hz to 22kHz, and duration of 15 seconds. Logic Pro X was used for the recordings on a Mac Book Pro (2.3 GHz Intel Core i7) and an MBox2 USB was used as the audio interface. Aurora Plug-in was the post-processing tool for obtaining the acoustic parameters as it provides sufficient accuracy [4] for the purpose of this study.

3. Three acoustic configurations

An overview of the acoustic behaviour of the space and its potential variations with the use of the rotating panels was studied by carrying out measurements for three different acoustic configurations at the front part of the divided space. Due to the existing equipment and instruments, only the left side acoustic panels and the set of panels on the sliding rail could be altered, while the panels on the right are mainly reflective and the panels on the control room (window) side are absorptive by default.

For Configuration A, the acoustic panels of the three out of four boundaries were set to be absorptive. For Configuration B, the acoustic panels were set at their reflective side (three out of four boundaries) and for Configuration C, there was an alternation of reflective and absorptive panels following in succession on both boundaries (50% reflection-50% absorption).

As the space is not symmetric, a square grid of measurement positions was considered necessary. The speaker was placed in the middle of the square, while the microphones were placed at eight positions on a virtual square around the speaker, at a distance of 2 meters from each other (as shown in figure 2). The height of both microphones and speaker was 1.5m.

As reverberation time does not offer sufficient information about the “density” of the reflections across time, the present study aims to provide more detailed information about the acoustic behaviour of the space by calculating eight acoustic parameters, which can be used to guide the users of this space. The acoustic parameters were observed across the frequency bands of 125Hz-4000Hz (as presented in figure 3).



Figure 2 a) Floor plan of the live room. The receivers and source positions for this study are marked at the front (largest) part of the divided space by the sliding rail, b) The dummy head and the omnidirectional source during the measurements at position R6.

Reverberation time (T_{30}) is related to the subjective impression of *Liveness* [5], while *Early Decay Time (EDT)* is the parameter, which is correlated more strongly with the perception of the reverberation in a space [3, 6]. From the results of these two parameters, it was shown that the space is very “dry”, as expected for a recording studio. The slope of T_{30} and EDT for Configuration A drops gradually from low to high frequencies. This gives a unique acoustic character to this live room and offers a distinctive *timbre* to the acoustic result of the performances. According to Beranek [5], this negative slope of RT between low and middle frequencies is directly related to the perception of *warmth*. On the other hand, Configuration B and Configuration C offer a more *neutral* space, with EDT values not differentiating significantly across the frequency bands. Configuration B, however, is the most *reverberant* and *brighter* space as shown from the T_{30} values. Significant are the differences between the values of T_{30} observed by the ESS measurement technique and the estimated values by Sabine and Eyring equations. Comparing the reverberation time at the most reflective configuration (Configuration B) at 1kHz (table 2) as an example, the importance of carrying out measurements at the actual space after being constructed and by using well-established methods should be highlighted.

Table 2 Comparing the reverberation time values at 1kHz observed by the estimations from the Sabine and Eyring Equations, and by calculating the parameters from the impulse responses measured from the actual space.

Sabine	Eyring	Measurements
0.97s	0.85s	0.54s

Center Time (T_s) corresponds to the centre of the gravity of the squared impulse response. The small values of T_s observed from these measurements mean that there is more concentrated energy in the early part of the impulse response. The low values of T_s are directly correlated with the high values observed for Clarity and Definition parameters. *Clarity* ($C50$ or $C80$) and *Definition* ($D50$) are parameters that also give information about the ratio of the initial energy to the rest of the impulse response ($C50$ and $C80$); and the ratio of the initial energy to the total energy of the impulse response ($D50$). Both parameters help to describe the perceived intelligibility of words, music, and speech. Due to lack of information about the perception differentiations and JND values for these energy parameters for cases with reverberation time below 0.6s, it is not possible to compare clarity perceptual effects between the three configurations. However, the high values of clarity and definition in the diagrams (figure 3) indicate a space with very good clarity and intelligibility for all three configurations, suitable in general for speech, and operas [7, 8]. Intelligibility and clarity are also an ideal condition for a space being used for professional recordings. It is worth mentioning that Configuration B (the most reflective case) shows a considerably flat curve for clarity and definition values across the frequency bands. This could be a significant factor when a musical ensemble with a wide frequency range performs in the space.

The subjective listener aspect of Listener envelopment (LEV) and Apparent source width (ASW), and their combination, known as *Spatial Impression* [9], can be observed from the study of *Inter-Aural Cross Correlation* (IACC) and *Early Lateral Energy Fraction* (LF). These parameters describe the energy perceived by the two ears and the energy from lateral directions, respectively (ISO 3382 2009). For the calculations of IACC, the early sound has been used (0-80ms). The values for both IACC_(E) and LF are quite low (which is unusual with high values of clarity). This ensures a good spatial impression and it is also a good indicator of musical acoustic quality [5, 8, 10]. Interestingly, the same “quality” is observed for all three configurations (however, it should be noted that the average values present wide standard deviation at low frequencies for IACC and high frequencies for LF, see figure 3).

An average value across the frequency bands is not recommended because acoustic parameters are frequency dependent. Similarly, average values across measurement positions do not offer a detailed representation of the acoustic behaviour of the space. Except for reverberation time, which is a global parameter, the rest of the acoustic parameters are position dependent. This can be observed from the charts in figure 3. For the purpose of this study, and with the aim of providing a general overview of the acoustics of the space at the various configurations, an average value across the positions was presented. However, the standard deviations of these results highlight the range of these variations across positions. It was also observed that only $T30$ and T_s values follow similar trend across frequencies for all the measured positions, while the curves of EDT and energy parameters vary across frequency bands. As example of these variations, figure 4 presents the results for $C80$ and $T30$ at Configuration A across the eight measured positions.

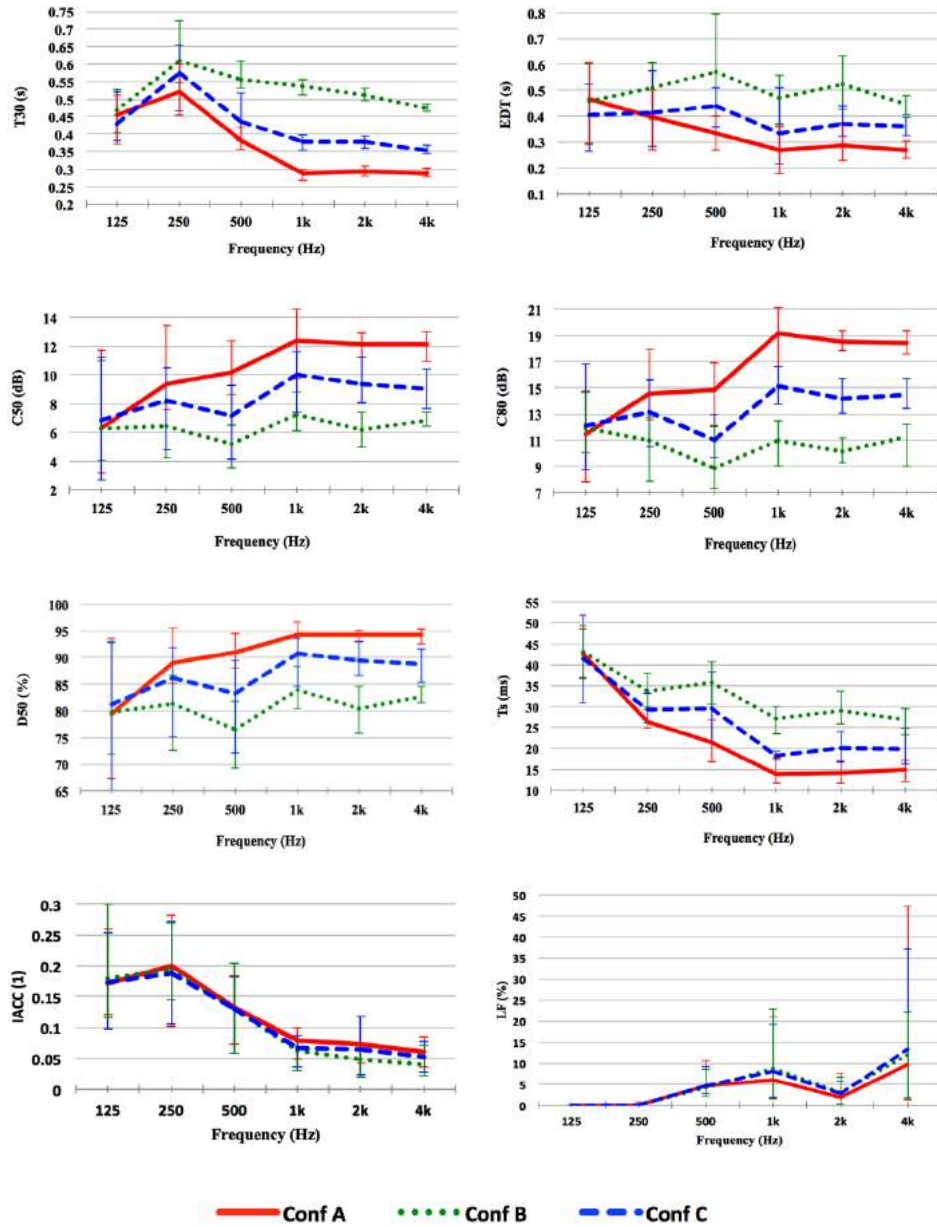


Figure 3 Mean values and standard deviation of T30, EDT, C50, C80, D50, Ts, IACC and LF observed across the six frequency bands and across the eight measured positions for Configurations A, B and C.

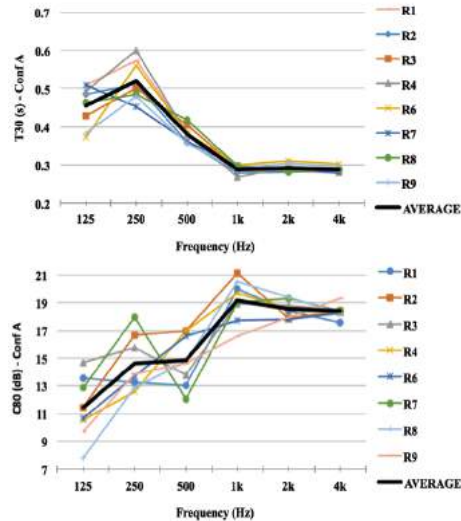


Figure 4 The results of the acoustic parameters $T30$, EDT , $C50$, $C80$, $D50$, Ts , $IACC$ and LF are presented across the frequency bands for Configuration A.

4. Conclusions

The acoustic behaviour of the largest section of the divided spaces of the live room of the Sound Studio of the Department of Music Studies at the University of Athens was studied in this paper. Three acoustic configurations were examined by varying the acoustic panels of two of the boundaries. The acoustic parameters were obtained from the impulse responses captured in the space by using the Exponential Sine-Sweep method and the results have been analysed in order to provide guidance to the users on how to use the acoustic configurations at the current state of the Sound Studio. The overview of this analysis is presented in table 3.

Table 3 Guidance notes for the use of the acoustical panels based on the acoustic qualities offered by the three studied configurations.

	Panels	Subjective Effect
Conf A	Three walls absorptive and one wall reflective (right wall)	<ul style="list-style-type: none"> • The least <i>reverberant</i> space • “<i>Warmth</i>” and a characteristic “<i>timbre</i>” due to the uneven reverberation time across frequencies • High degree of clarity and intelligibility
Conf B	Three walls reflective and one wall absorptive (control room wall)	<ul style="list-style-type: none"> • The most reverberant space from all three configurations • The most “<i>neutral</i>” space as reverberation and clarity have flat response across frequency bands • Ideal for musical ensembles with a wide overall frequency range and for research activities

		requiring flat frequency response
Conf C	50% of the panels reflective and 50% absorptive	<ul style="list-style-type: none"> • A medium reverberant space • Clarity and intelligibility are even across frequency bands, but it is offering a characteristic “<i>timbre</i>” as well due to the slope of the reverberation time from low to high frequencies.

The impulse responses captured during the measurements and described above have been made available online on the Open Acoustic Impulse Response Library [11]. By accessing this library, the Sound Studio users can listen to the auralization results of the various positions and configurations, and choose the optimum combination for their recordings.

5. Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to ETA Acoustics for the data provided, based on which the studio was designed. Furthermore, they acknowledge the support of the LabMAT staff, especially the help by I. Peikidis and A. Nikolopoulos during the measurements in the studios.

6. References

- [1] P. Newell *Recording Studio Design* Focal Press, Oxford, pp.151-191 (2003)
- [2] A. Farina, “Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine technique” in *Proc. of the 108th AES Convention* (2000)
- [3] ISO3382, I.S.-. *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters, Part 1: Performance spaces*, ed. B. Standards (2009)
- [4] S. Campanini, A. Farina, “A new Audacity feature: room objective acoustical parameters calculation module” in *Proc. of Linux Audio Conference (LAC#7)* (2009)
- [5] L. Beranek, “Acoustics and musical qualities”, *J. Acoust. Soc. Am.* **99** (5), pp 2647-2652 (1996)
- [6] V.L. Jordan, “A group of objective acoustical criteria for concert halls”, *Applied Acoustics*, **14** pp 253-266 (1981)
- [7] A. Capra, M. Binelli, D. Marmiroli, P. Martignon, A. Farina, “Correlation between subjective descriptors and objective parameters of the theatres and auditoria acoustics simulated with binaural sound systems”, in *Proc. of the Thirteen International Congress on Sound and Vibration (ICSV13)* (2006)
- [8] L. Tronchin, A. Farina, “Acoustics of the Former Teatro “La Fenice” in Venice”, *Journal of Audio Engineering Society* **42**(12) pp 1051-1062 (1997)
- [9] M. Queiroz, F. Iazzetta, F. Kon, M.H.A. Gomes, F.L. Figueiredo, B. Masiero, L.K. Ueda, L. Dias, M.H.C. Torres, L.F. Thomaz, “AcMus: an Open, Integrated Platform for Room Acoustics Research”, *Journal of the Brazilian Computer Society* **14**(3) p. 87-103 (2008)
- [10] L. Tronchin, A. Farina, T. Hotehama, R. Shimokura, V. Tarabusi, “The calculation of Binaural Parameters by means of HRTFs and Ando’s method”, in *Proc. of ICA2004*, Acoustical Society of Japan pp 2369-2372 (2004)

[11] The Open AIR Library [Online] Available at:
<http://www.openairlib.net/auralizationdb/content/live-room-sound-studio-laboratory-university-athens>

**Συστήματα ηλεκτροακουστικής υποβοήθησης στο αρχαίο
θέατρο της Επιδαύρου· πείραμα υποκειμενικής
αξιολόγησης της χρήσης νέων τεχνολογιών στις
θεατρικές παραστάσεις**

Γιασεμί Κηληδόνη, Ηθοποιός
email: kiljasmine@hotmail.com

Ιωάννης Καραγιάννης, Υ/Δ ΕΜΠ
email: mediumswing@hotmail.com

Δημήτρης Χριστοφορίδης, Ηλ/γος Μηχ/κός, ΑΠΘ
email: d.christoforidis@yahoo.com

Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου, αν. καθ. ΕΜΠ
email: alexia@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου θεωρείται το τελειότερο αρχαίο ελληνικό θέατρο από άποψη ακουστικής και αρχιτεκτονικής σχεδίασης και αποτελεί διεθνώς το διασημότερο μνημείο του είδους. Από το 1954 χρησιμοποιείται στις ετήσιες εκδηλώσεις των “Επιδαυρίων”, που περιλαμβάνουν κυρίως παραστάσεις αρχαίου δράματος και αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα καλλιτεχνικά γεγονότα στον κόσμο με χιλιάδες επισκέπτες κάθε χρόνο που απολαμβάνουν την άρτια ακουστική του θεάτρου. Την τελευταία δεκαετία είναι πια συνήθης και οδεύει προς καθιέρωση η χρήση μικροφώνων και συστημάτων ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης και αναπαραγωγής κατά τη διάρκεια των παραστάσεων που λαμβάνουν χώρα στο αρχαίο θέατρο. Πρόκειται για καινοτομία αμφιλεγόμενη, τόσο από την πλευρά της αισθητικής όσο και από εκείνη της ακουστικής, αφού παρεμβαίνει στον τρόπο διάδοσης του ήχου σε έναν χώρο, του οποίου η φυσική ακουστική είναι αδιαμφισβήτητη. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να ανιχνευθούν οι ανάγκες που οδήγησαν στην χρήση του συστήματος ενίσχυσης και να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβάνονται αυτή τη νέα κατάσταση τόσο οι ηθοποιοί όσο και οι θεατές του αρχαίου δράματος. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα πειράματος αντίληψης της ακουστικής, στο οποίο συμμετείχαν θεατές, ηθοποιοί και τεχνικοί θεάτρου. Στόχος της εργασίας είναι να απαντήσει στο αν η σύγχρονη τεχνολογία μπορεί να εναρμονισθεί με την φυσική ακουστική του αρχαίου θεάτρου ή κινδυνεύει να υποβαθμίσει τη συνολική ακουστική εμπειρία.

Electroacoustic systems in the ancient theater of Epidaurus; subjective evaluations of the use of new technologies in drama performances.

ABSTRACT

The ancient theater of Epidaurus is regarded as the finest ancient greek theater in terms of acoustics and architectural design, being the most critically-acclaimed monument of its kind. Since 1954, the ancient theater has been hosting the annual "Epidauria" festival, one of the most important theater events in the world that include performances of ancient drama, attracting thousands of visitors and theater aficionados, who wish to enjoy the outstanding acoustics of the theater. Over the last decade, the use of microphones and electroacoustic amplification and reproduction systems has been established for the drama performances at the ancient theater. This is a rather controversial innovation, both in terms of aesthetics and acoustics, since the acclaimed physical sound propagation is questioned. In this paper the need for amplification will be discussed, as well as the ways the integration of modern systems have been affecting the perception of acoustics, both of actors and spectators of drama performances. In that respect, experimental data regarding the subjective evaluation of spectators, actors and other professionals of performing arts are presented and further discussed. The aim of this paper is to answer whether the physical acoustical properties of the ancient theater can be enhanced by modern technology or, on the contrary, the latter will result in the degradation of the overall acoustical experience.

Εισαγωγή-Ανασκόπηση

Η ακουστική και αρχιτεκτονική αρτιότητα του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου έχει πυροδοτήσει μια σειρά μελετών που επιχειρούν να αποτιμήσουν την ακουστική ποιότητα του χώρου και να αποκαλύψουν αρχές σχεδιασμού, μέσω φυσικών μετρήσεων, προσομοιώσεων, ή συνδυασμού αυτών. [1], [2]

Εν γένει, η γεωμετρική χάραξη και η μεγάλη χωρητικότητα της περιοχής του ακροατηρίου, η ύπαρξη ηχοανακλαστικών επιφανειών πλησίον των ηθοποιών ή, αντίστοιχα, η απουσία τέτοιων επιφανειών πίσω από τους θεατές στα άνω διαζώματα, καθώς και η απουσία οχλήσεων από τον περιβάλλοντα χώρο, έχει επισημανθεί ότι συμβάλλουν στην υψηλή ακουστική ποιότητα των αρχαίων θεάτρων. [3]

Θα ήταν λάθος, παρόλα αυτά, να ισχυριστεί κανείς ότι στις θεατρικές παραστάσεις κατά την αρχαιότητα δεν επιδιωκόταν η ενίσχυση της φωνής των ηθοποιών με φυσικά μέσα. Καταρχήν, γινόταν χρήση ειδικών μασκών που αύξαναν την κατευθυντικότητα της ανθρώπινης φωνής [4]. Επίσης, το θεατρικό δρώμενο λάμβανε χώρα πίσω από την ορχήστρα, εν αντιθέσει με τις σύγχρονες σκηνοθετικές επιλογές αξιοποίησης του χώρου της ορχήστρας από τους ηθοποιούς. Αυτό επέτρεπε την ύπαρξη ευεργετικών, για την ενίσχυση της φωνής, πρώτων ανακλάσεων επί του εδάφους της ορχήστρας με πολύ μικρή μάλιστα χρονική καθυστέρηση από το απευθείας ηχητικό σήμα [5]. Επίσης, η διαμόρφωση –αρχικά

ξύλινων στη συνέχεια πιο μόνιμων– σκηνικών πλαισίων εξασφάλιζε την ενίσχυση της φωνής του ηθοποιού προς τις ψηλότερες βαθμίδες, όπου οι ανακλάσεις από την περιοχή της ορχήστρας ούτως ή άλλως έφταναν εξασθενησμένες [5]. Στην ενίσχυση της φωνής, τέλος, πιθανότατα συνέβαλλε και αυτή καθεαυτή η μακρόσυρτη εκφορά του λόγου (βλ. μακρά φωνήεντα), που αύξανε την ηχητική ενέργεια στο χρόνο.

Η επαναλειτουργία των αρχαίων θεάτρων για τη διεξαγωγή σύγχρονων παραστάσεων αρχαίου δράματος επανέφερε στο προσκήνιο την παραπάνω προβληματική, καθώς οι σύγχρονες σκηνοθετικές, σκηνογραφικές, ερμηνευτικές ή άλλες τάσεις, έπρεπε να συμβαδίσουν με τις δεδομένες δυνατότητες του θεατρικού χώρου. Ενδεικτικά αναφέρουμε την καθιέρωση συγκεκριμένων τρόπων εκφοράς του λόγου και κλίσης του σώματος των ερμηνευτών, ώστε η φωνή τους να ακούγεται πιο δυνατά και καθαρά στο ακροατήριο. Η, αρχικά δειλή, χρήση σύγχρονων τεχνολογικών μέσων ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης του ήχου εν μέρει συνέβαλλε στην διευκόλυνση των ηθοποιών, ενώ παράλληλα βοήθησε στην διεύρυνση και εμπλουτισμό του καλλιτεχνικού λεξιλογίου, επιτρέποντας μεγαλύτερη γκάμα ερμηνειών και σκηνοθετικών επιλογών. Από την άλλη, η χρήση συστημάτων ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης του ήχου, η οποία πλέον τείνει να καθιερωθεί, εν μέρει ανατροφοδοτεί τα προβλήματα που υποτίθεται ότι επιλύει –εάν δεν δημιουργεί νέα.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει, έστω και ακροθιγώς, το κατά πόσο η ηλεκτροακουστική ενίσχυση του ήχου αναδεικνύει εν τέλει την ακουστική ποιότητα του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου ή εάν τελικά επηρεάζει αρνητικά τους θεατές και τους ερμηνευτές, παρότι συμβάλει στην αύξηση της έντασης του ήχου.

1. Μεθοδολογία, ανάλυση και αποτελέσματα

Το πείραμα έγινε με ερωτηματολόγια που διανεμήθηκαν μέσω διαδικτύου σε θεατές του αρχαίου δράματος, ηθοποιούς, σκηνοθέτες και γενικά σε ανθρώπους που έχουν εμπειρία σχετικά με το αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου. Περιείχαν ερωτήσεις διερεύνησης της αντίληψης της ακουστικής και χωρίζονταν σε δύο κατηγορίες, η πρώτη εκ των οποίων απευθυνόταν σε όλους τους ερωτηθέντες και η δεύτερη σε ηθοποιούς που έχουν ερμηνεύσει στην Επίδαυρο. Από τους θεατές ζητήθηκε να αξιολογήσουν την ποιότητα της ακουστικής του θεάτρου με και χωρίς χρήση μικροφώνων, ενώ από τους ηθοποιούς ζητήθηκε να βαθμολογήσουν μια σειρά από υποκειμενικά κριτήρια σχετικά με την ερμηνεία τους. Τα κριτήρια αυτά ήταν το πώς ακούν τον εαυτό τους, πώς ακούν τους άλλους ηθοποιούς, πώς λαμβάνουν τις αντιδράσεις του ακροατηρίου, πότε αισθάνονται ότι η φωνή τους "φθάνει" καλύτερα στο ακροατήριο και τέλος εάν επηρεάζεται η ερμηνεία τους από τη χρήση ή μη μικροφώνων.

Πιν.2.1 Δείγμα θεατών που συμμετείχαν στο πείραμα

Θεατές	236	
Φύλο	Ανδρες	46%
	Γυναίκες	54%
Ηλικία	κάτω των 25	6%
	25-50	30%

	άνω των 50	64%
Παραστάσεις που έχουν παρακολουθήσει στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου	1-3	21%
	4-9	15%
	10+	64%

Πιν.2.2 Δείγμα ηθοποιών που συμμετείχαν στο πείραμα

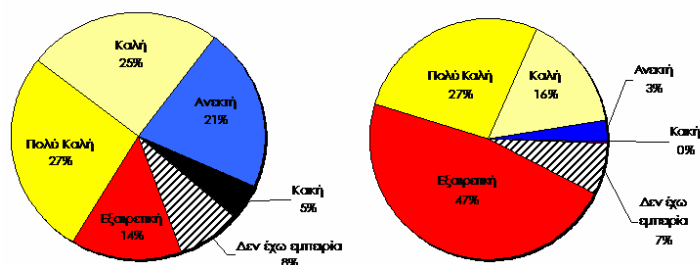
Ηθοποιοί	48	
Φύλο	Ανδρες	47%
	Γυναίκες	53%
Ηλικία	κάτω των 25	0%
	25-50	71%
	άνω των 50	29%
Παραστάσεις που έχουν ερμηνεύσει στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου	1-3	19%
	4-9	58%
	10+	23%
Εμπειρία	μόνο με χρήση μικροφώνων	23%
	μόνο χωρίς χρήση μικροφώνων	52%
	και με τα δύο	25%

Και στις δύο κατηγορίες, θεατές και ηθοποιούς, ζητήθηκε να υποδείξουν τα σημαντικότερα προβλήματα σχετικά με την ακουστική ποιότητα κατά τη διάρκεια των θεατρικών παραστάσεων, αλλά και να προβούν σε συμπληρωματικές παρατηρήσεις και σχόλια εάν το επιθυμούσαν. Συνολικά συμπληρώθηκαν 236 ερωτηματολόγια, τα 48 από τα οποία απαντήθηκαν από ηθοποιούς που έχουν ερμηνεύσει στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου. Ειδικότερα στοιχεία του δείγματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2.

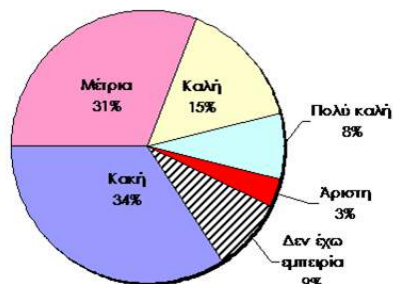
2. Ανάλυση και αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου παρουσιάζονται αναλυτικά στα σχήματα 1-12.

Όπως φαίνεται στα σχετικά σχήματα, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης του ήχου γίνεται διάκριση μεταξύ άνω και κάτω διαζώματος.

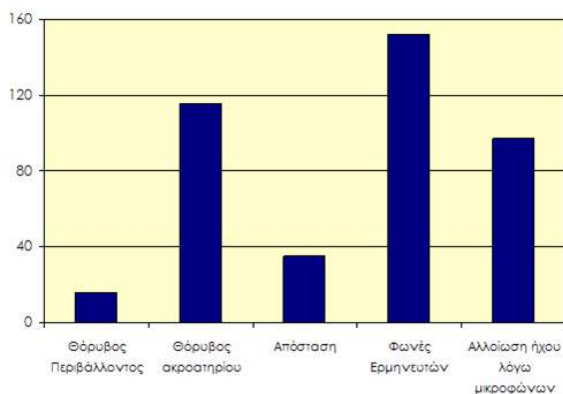


Σχήμα 2.1 Κατανομή απαντήσεων στο ερώτημα «Πώς αξιολογείτε την ακουστική του θεάτρου σε παραστάσεις κατά τις οποίες δεν γίνεται χρήση μικροφώνων;» Άνω διάζωμα (αριστερά), κάτω διάζωμα (δεξιά)

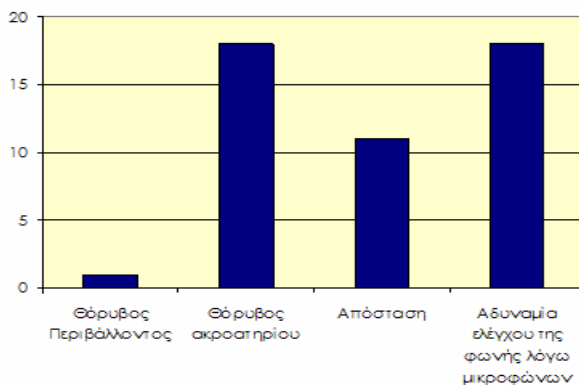


Σχήμα 2.2 Κατανομή απαντήσεων στο ερώτημα «Πώς αξιολογείτε την ακουστική του θεάτρου σε παραστάσεις κατά τις οποίες γίνεται χρήση μικροφώνων;»

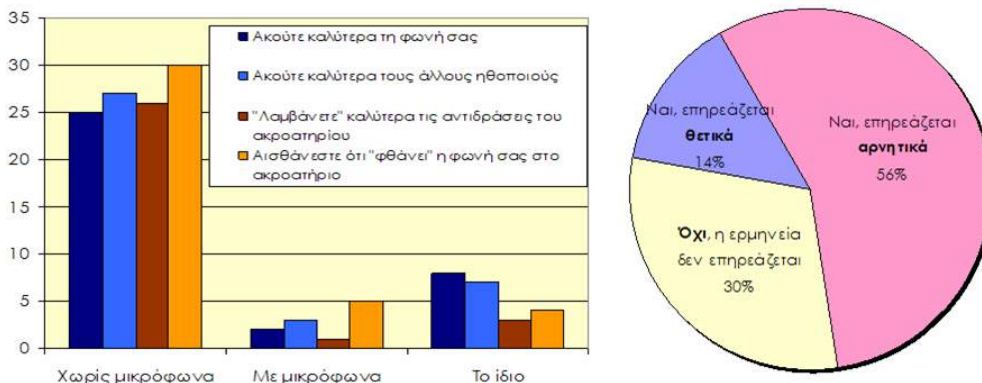
Παρ' ότι, όπως φαίνεται από τον πίνακα 1.2 πολλοί από τους ηθοποιούς είχαν ερμηνεύσει μόνο μικροφώνων και άλλοι μόνο χωρίς αυτά, κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων συμπεριλάβαμε όλες τις απαντήσεις. Για τους μεν πρώτους θεωρήσαμε ότι κατά τη διάρκεια των προβών που γίνονται χωρίς μικρόφωνα έχουν αναπτύξει κάποια εμπειρία της φυσικής ακουστικής της σκηνής. Για τους δε δεύτερους, που κατά κανόνα είναι και γηραιότεροι, ότι έχουν ικανοποιητική εμπειρία της επίδρασης της ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης από ερμηνείες σε άλλα ανοικτά θέατρα.



Σχήμα 2.3 Τα σημαντικότερα προβλήματα σχετικά με την ακουστική στο χώρο του ακροατηρίου στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου, όπως υποδείχθηκαν από τους θεατές



Σχήμα 2.4 Τα σημαντικότερα προβλήματα σχετικά με την ακουστική στο χώρο της σκηνής του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου, όπως υποδείχθηκαν από τους ερμηνευτές



Σχήμα 2.5 Υποκειμενικά κριτήρια σχετικά με την ερμηνεία των ηθοποιών σε σχέση με τη χρήση ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης

3. Συζήτηση

Από την αποτελέσματα του ερωτηματολογίου αλλά και από τα σχόλια όσων συμμετείχαν στο πείραμα καθίσταται σαφές ότι τόσο οι ηθοποιοί όσο και οι ερμηνευτές στην πλειοψηφία τους προτιμούν τις παραστάσεις στις οποίες δεν γίνεται χρήση ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης. Αυτή η αξιολόγηση, βέβαια, ενδέχεται να επηρεάζεται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό από την ιδεολογική φόρτιση, η οποία συνδέεται με το αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου και την ακουστική του.

Τη λίστα των κύριων προβλημάτων που αναδύονται κατά τη διάρκεια μιας παράστασης μονοπωλούν ο θόρυβος του ακροατηρίου και οι αδύναμες φωνές των ερμηνευτών, ενώ υπογραμμίζονται τα χαμηλά επίπεδα θορύβου βάθους, επιβεβαιώνοντας πρόσφατες φυσικές μετρήσεις [6],[7],[8]. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί, επομένως, ότι η χρήση μικροφώνων στο αρχαίο θέατρο, σε ένα βαθμό τουλάχιστον, προκρίνεται προκειμένου οι συχνά αδύναμες φωνές των ηθοποιών να υπερνικήσουν την υψηλή στάθμη θορύβου του ακροατηρίου. Αυτό όμως ενδέχεται

να επιφέρει τα αντίθετα από τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, καθώς με τον τρόπο αυτόν καλλιεργείται αφενός μία γενιά ηθοποιών που δεν εκμεταλλεύεται τους φυσικούς τρόπους ενίσχυσης της φωνής και αφετέρου ένα πιο «χαλαρό» ακροατήριο που δεν διστάζει να θορυβεί κατά τη διάρκεια της παράστασης, ακριβώς επειδή οι στάθμες των φωνών των ηθοποιών δείχνουν με ευκολία να είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Μέρος της σπουδαίας ακουστικής του θεάτρου της Επιδαύρου είναι η πολύ χαμηλή στάθμη θορύβου βάθους. Η χρήση ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης και, συνακόλουθα, η καλλιέργεια ενός «θορυβώδους» ακροατηρίου εγκυμονεί τον κίνδυνο απαξίωσης της χαμηλής στάθμης θορύβου, ως απαραίτητης προϋπόθεσης για τη διεξαγωγή μιας θεατρικής παράστασης. Ήδη, κοντά σε πολλά άλλα αρχαία θέατρα έχουν γίνει μια σειρά κατασκευαστικών έργων (πχ. διανοίξεις οδικών συνδέσεων κλπ.) αγνοώντας την επίδραση που αυτά έχουν στο φυσικό περιβάλλον κι έμμεσα στην ακουστική των θεάτρων.

Μετά από πολλά χρόνια παραστάσεων χωρίς μικρόφωνα στο αρχαίο θέατρο η ανάγκη του να φθάσει φυσικά η φωνή του ηθοποιού μέχρι τον πιο απομακρυσμένο θεατή έχει δημιουργήσει μία ολόκληρη σχολή ερμηνείας. Οι θέσεις των ηθοποιών στο χώρο, η στάση του σώματος, η αργή και μακρόσυρτη εκφορά του λόγου, η τοποθέτηση της φωνής και η εκμετάλλευση όλων των φυσικών τρόπων ενίσχυσης συνιστούν ένα ξεχωριστό είδος ερμηνείας που είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την σύγχρονη αντίληψη περί του αρχαίου δράματος και συνάδει με τα όρια της ανθρώπινης φωνητικής και ακουστικής κλίμακας. Από την άλλη, όμως, η χρήση ηλεκτροακουστικής ενίσχυσης επιτρέπει τον εμπλουτισμό του ερμηνευτικού ρεπερτορίου των ηθοποιών, αναδεικνύει την εσωτερικότητα και διευρύνει τις θέσεις ερμηνείας και τη διάταξη των ηθοποιών στο χώρο, αποτελώντας έτσι ένα σπουδαίο καλλιτεχνικό εργαλείο στη διάθεση των σκηνοθετών.

Εν κατακλείδι, και λαμβάνοντας υπόψιν και τα σχόλια των ερωτηθέντων, μπορούμε να πούμε ότι η ηλεκτροακουστική ενίσχυση στις παραστάσεις του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου, ως τεχνολογική εξέλιξη, δεν είναι εκ προοιμίου κατακριτέα. Όπως κάθε εργαλείο όμως, απαιτεί μεγάλη προσοχή στη χρήση της αφού το ενδεχόμενο καθιέρωσής της εγκυμονεί κινδύνους μη αναστρέψιμων μεταβολών.

4. Βιβλιογραφία

[1] Α. Σωτηροπούλου, Γ. Καμπουράκης, Α. Καφάση «Η Ακουστική των Αρχαίων Θεάτρων· ανασκόπηση επιστημονικών εξελίξεων» in *ΕΛΙΝΑ - Ακουστική 2012*, Σελίδες 59-67 (2012)

[2] Κ. Αγγελάκης, Ν. Μπάρκας «Σύγχρονες μέθοδοι ακουστικής μελέτης των αρχαίων ελληνικών και ρωμαϊκών θεάτρων» in *ΕΛΙΝΑ - Ακουστική 2012*, Σελίδες 37-41 (2012)

[3] Ν. Μπάρκας «Η Ακουστική ως Παράμετρος Σχεδιασμού στο Αρχαίο Ελληνικό Θέατρο», Μνημείο και Περιβάλλον **2**, Σελίδες 39-56 (1994)

[4] Β. Παπαθανασόπουλος, *Επί Της Ενισχύσεως Του Ήχου Εις Το Ελληνικόν Θέατρον*, Αθήνα 1947

[5] Μ. Α. Ζάννη, Σ. Μαυρογονάτου, Ν. Μπάρκας «Η Ακουστική Λειτουργία της Σκηνογραφίας σε Σύγχρονες Παραστάσεις Αρχαίου Δράματος» in *ΕΛΙΝΑ - Ακουστική 2010* (2010)

[6] Σ. Ψαρράς, Μ. Κουντουράς «Μετρήσεις ακουστικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων στο αρχαίο Θέατρο Επιδαύρου» in *ΕΛΙΝΑ - Ακουστική 2012*, Σελίδες 68-79 (2012)

[7] N. Barkas «Contemporary Sound Environment around Ancient Greek Theaters: Current operation problems», in *Echopolis* (2013)

[8] N. Hoekstra, B. Nicolai, B. Peeters, C. Hak and R. Wenmaekers, «Project Ancient Acoustics Part 2/4: Largescale acoustical measurements in the Odeon of Herodes Atticus and the theatres of Epidaurus and Argos» in *the 23rd International Congress on Sound and Vibration* (2016)

Συνεδρία A2: Εφαρμογές ήχου για άτομα με αισθητηριακές αναπηρίες (II)

Ανάπτυξη και σχεδιασμός εφαρμογής Διαγνωστικού Ακοογράφου για φορητές συσκευές με περιβάλλον iOS

Θωίδης Ιορδάνης
Πρ. Φοιτ. Μηχ., ΑΠΘ
ithoidis@auth.gr

Βρύσης Λάζαρος
Διπ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ
lvrysis@auth.gr

Σεβαστιάδης Χρήστος
Δρ. Μηχ., ΕΔΙΠ ΑΠΘ
csevast@auth.gr

Παπανικολάου Γεώργιος
Δρ. Μηχ., Καθηγητής ΑΠΘ
pap@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια ο ακοομετρικός εξοπλισμός παραμένει ιδιαίτερα δαπανηρός και ανεπηρέαστος από την εξέλιξη της τεχνολογίας. Η παρούσα εργασία περιγράφει το σχεδιασμό μιας εφαρμογής για περιβάλλον iOS που μπορεί να παρέχει ακοομετρικές εξετάσεις αντίστοιχα με έναν διαγνωστικό ακοογράφο, χωρίς την χρήση εξωτερικού υλικού, σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κόστος της εξέτασης να εκσυγχρονιστεί ο εξοπλισμός. Πρόκειται για μια πρόταση τονικής ακοομετρίας εντός ακοομετρικού θαλάμου από τους ειδικούς, για χρήση με εγκεκριμένα και βαθμονομημένα ακουστικά. Ειδικότερα, παρέχεται η δυνατότητα χειροκίνητης και αυτόματης μέτρησης, τόσο διά της αέρινης όσο και δια της οστέινης οδού.

Design and Development of a Diagnostic Audiometer application for iOS-Based devices

ABSTRACT

In recent years, audiometric equipment remains expensive and unaffected by technological progress. This paper presents the design and development of an iOS-based application, which can be used to conduct audiometric tests comparable to a

diagnostic audiometer, without additional external equipment, ergo updating the procedure and reducing the cost of audiometric examinations. The application involves pure-tone hearing testing, proposed to be operated by experts inside a sound booth using certified and calibrated headphones. Particularly, it provides manual and automated measurement, including air as well as bone conduction.

1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, τα προβλήματα ακοής αποτελούν την πιο συχνή αισθητηριακή βλάβη, καθώς 360 εκατομμύρια άνθρωποι (328 εκ. ενήλικοι and 32 εκ. παιδιά) ζουν με κάποια μορφή απώλειας ακοής [1]. Η απώλεια ακοής είναι ένα πρόβλημα που αφορά άτομα όλων των ηλικιών, καθώς ασκεί σημαντική επίδραση στην εκπαιδευτική και κοινωνική ανάπτυξη των παιδιών, και την ψυχολογική κατάσταση των ενηλίκων [2]. Αξίζει να τονιστεί ότι το 50% αυτών των περιπτώσεων βλάβης θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί μέσω της πρωτογενούς πρόληψης και με την συμβολή της δημόσιας υγείας [1]. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι δημοσιονομικοί πόροι κρίνονται ανεπαρκείς και οι ακουστικές βλάβες δεν αποτελούν απειλή για την ζωή των ανθρώπων, υποβιβάζει την απαραίτητη διάγνωση, θεραπεία και πρόληψη, ειδικότερα στις αναπτυσσόμενες κοινωνίες όπου τα προβλήματα ακοής δεσπόζουν [3]. Επιπρόσθετα, πληθυσμιακές μελέτες για ακουστικές βλάβες γίνονται σπάνια [3].

Για την αποκατάσταση της ακοής είναι απαραίτητη η σωστή διάγνωση και η αξιολόγηση των διαταραχών του ακουστικού συστήματος [4]. Η διάγνωση γίνεται τυπικά από ακοολόγο ή ειδικό ωτορινολαρυγγολόγο με τη χρήση εγκεκριμένου και βαθμονομημένου ακοομετρικού εξοπλισμού. Η διαδικασία μέτρησης είναι αυστηρώς τυποποιημένη από τους οργανισμούς American National Standards Institute (ANSI) και International Organization for Standardization (ISO). Τα πρότυπα απαιτούν οι μετρήσεις να γίνονται σε ένα εξαιρετικά ήσυχο περιβάλλον (ANSI/ASA S3.1-1999), με γνωστή τεχνική μέτρησης ώστε να αποδοθούν ακριβείς ουδοί ακουστότητας (ANSI/ASA S3.21-2004), καθώς και να λαμβάνονται με εξοπλισμό που πληροί τις καθορισμένες τιμές βαθμονόμησης (ANSI/ASA S3.6-2010).

Η πιο διαδεδομένη εξέταση για την αξιολόγηση της ακουστικής λειτουργίας είναι η τονική ακοομετρία. Για πάνω από έξι δεκαετίες η μέτρηση της ακουστικής ευαισθησίας χρησιμοποιεί ημιτονικά ερεθίσματα (διαπασών) στις οκταβικές συχνότητες από 125 Hz έως 8.000 Hz (Békésy, 1947), συνήθως σε συνδυασμό με δύο ενδοοκταβικές συχνότητες (3.000 και 6.000 Hz). Οι εκτιμήσεις που παρέχονται με τα διαπασών, έχουν περισσότερο ποιοτικό χαρακτήρα καθώς επιτρέπουν τον προσδιορισμό του βαθμού, του είδους και της διαμόρφωσης της βαρηκοΐας [5]. Τα αποτελέσματα της εξέτασης περιγράφονται γραφικά σε ένα ακούγραμμα. Για να συμπληρωθεί το τονικό ακούγραμμα ενός ασθενούς γίνεται εκτίμηση των ουδών ακουστότητας τόσο διά της αέρινης όσο και δια της οστέινης οδού κάθε αυτιού χωριστά, για τις συχνότητές καθαρών τόνων.

Ειδικότερα, η αέρινη ακοομετρία καθαρών τόνων όπως επίσης και η δοκιμασία διαλογής (Screening Test) πραγματοποιούνται ακολουθώντας μια σειρά από βήματα, οι κανόνες για τα οποία έχουν καθιερωθεί (αν και δεν εφαρμόζονται πάντα), και δύναται να διεξαχθούν αυτοματοποιημένα από έναν υπολογιστή. Η ακρίβεια των αυτοματοποιημένων μετρήσεων αυξάνεται με παρούσες μελέτες [6],

ωστόσο η οστέινη μέτρηση και η χρήση masking, όταν απαιτείται, καθιστά πολύπλοκο να προβλεφθούν οι ουδοί ακουστότητας με πιστότητα, αυτοματοποιημένα από μια συσκευή. Κρίνεται λοιπόν θεμελιώδους σημασίας η παρουσία ιατρού κατά τη χειροκίνητη μέτρηση και επίβλεψη της αυτόματης ακοομετρίας, τόσο για την συμφωνία με τα πρότυπα μέτρησης όσο και για την διασφάλιση της ακριβούς διάγνωσης και της σύστασης κατάλληλης θεραπείας.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη διάγνωση της απώλειας ακοής είναι ο ακοογράφος. Επί του παρόντος, η τυπική κλινική ακοομετρία διεξάγεται είτε με τη χρήση ιδιαίτερα δαπανηρών μη-φορητών ακοογράφων, είτε με μια φορητή εξειδικευμένη συσκευή σε συνδυασμό με λογισμικό υπολογιστή για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη αποκλειστικότητα εξαρτημένων από το υλικό συστημάτων και τη διατήρηση του υψηλού κόστους του εξοπλισμού. Ακόμη, το κόστος της ακοομετρικής εξέτασης παραμένει υψηλό, πράγμα που αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα τόσο για τους ασθενείς όσο και για τους ειδικούς.

Συγχρόνως, οι ιατρικές εφαρμογές στις φορητές συσκευές αποτελούν μια αναδυόμενη τάση. Η εξέλιξη του υλικού και η ευρεία δημοτικότητα των κινητών συσκευών αφής, έχουν καταστήσει εφικτό τον σχεδιασμό εφαρμογών για υπηρεσίες υγείας (mHealth apps) και την ενσωμάτωσή τους στην κλινική εφαρμογή. Όσον αφορά την ακοομετρία, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εφαρμογές οι οποίες διατίθενται στα αντίστοιχα ηλεκτρονικά καταστήματα για τα λειτουργικά συστήματα iOS της Apple και Android της Google, που επιτρέπουν στους ασθενείς, ως χρήστες, να μετρήσουν αυτόματα την απώλεια ακοής.

Ωστόσο, οι εφαρμογές αυτές δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις της κλινικής ακοομετρίας, καθώς διεξάγουν δοκιμασίες διαλογής μόνο μέσω της αέρινης οδού, χωρίς την παρουσία ειδικού και την χρήση εγκεκριμένου και βαθμονομημένου ακοομετρικού εξοπλισμού. Ακόμη, πρόσφατες δημοσιεύσεις ακοολογικών εφαρμογών για tablet υπολογιστές προσεγγίζουν έναν διαγνωστικό ακοογράφο [7] [8] σε ανταγωνιστικές προσπάθειες σχεδιασμού και ανάπτυξης, παρόλα αυτά ο τομέας της ακοολογίας παραμένει ακόμη συντηρητικός τεχνολογικά, προσφέροντας προοπτικές για εκτενέστερες εργασίες και περαιτέρω ανάπτυξη.

2. Η Εφαρμογή «Butterfly Hearing»

Με γνώμονα τα παραπάνω, σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε μια εφαρμογή στο λειτουργικό σύστημα iOS® (Apple® Inc., Cupertino, CA) η οποία προσφέρει τις απαραίτητες μεθόδους ακοομετρίας, ενώ παράλληλα πληροί τις προδιαγραφές ενός Διαγνωστικού Ακοογράφου σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI/ASA S3.6-2010 Type 2 (IEC 60645-1) για χρήση με εξειδικευμένα ακοομετρικά ακουστικά από τους επαγγελματίες σε θέματα υγείας.

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το τυπικό πακέτο ανάπτυξης λογισμικού (SDK) του λειτουργικού iOS, Xcode (Apple Inc, Cupertino, CA) με κύρια γλώσσα προγραμματισμού την Swift 2.0. Κατά την ανάπτυξη χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά εγγενείς βιβλιοθήκες και πλαίσια (frameworks) του πακέτου ανάπτυξης λογισμικού. Τα σήματα για την παραγωγή των ήχων δημιουργούνται σε πραγματικό χρόνο από την εφαρμογή με αποκλειστική χρήση του υποσυστήματος ήχου της συσκευής, με σκοπό τη βέλτιστη πιστότητα και απόδοση.

Για την κάλυψη των λειτουργιών ενός Διαγνωστικού Ακοογράφου, προσφέρεται η δυνατότητα χειρισμού δύο ανεξάρτητων καναλιών. Χρησιμοποιούνται συνεχείς, παλμικοί και warble τόνοι, καθώς και οι απαραίτητοι θόρυβοι (λευκός, στενής ζώνης) για διαδικασίες masking. Οι τόνοι αναπαράγονται σε 8 βασικές συχνότητες, σε διαστήματα μιας οκτάβας από 125 έως 8000 Hz, με διαθέσιμες στάθμες έντασης από -10 έως 90 dB HL. Ο λευκός και οι στενής-ζώνης θόρυβοι αναπαράγονται στο ετερόπλευρο αυτί σε στάθμες από 0 έως 80 dB HL. Οι μετρήσεις γίνονται τόσο διά της αέρινης όσο και δια της οστέινης οδού κάθε αυτιού χωριστά, με την χρήση των υποστηριζόμενων ακουστικών και οστεοφώνων.

Ο εξοπλισμός αποτελείται από έναν υπολογιστή tablet (iPad; Apple, Inc) με εγκατεστημένη την εφαρμογή «Butterfly Hearing». Ο υπολογιστής βρίσκεται υπό το χειρισμό του ιατρού εκτός ακοομετρικού θαλάμου. Τυπικά ακοολογικά ακουστικά (υποστηρίζονται τα Sennheiser HDA 280, Telephonics TDH-39P) συνδέονται στην έξοδο των ακουστικών της συσκευής χρησιμοποιώντας δύο μετατροπείς 2x¼-mono-to-1/8-stereo. Για την οστέινη μέτρηση συνδέεται στην συσκευή το τυπικό ακοολογικό οστεοφώνο (RadioEar B81) με μετατροπέα ¼-1/8-mono. Εντός ακοομετρικού θαλάμου τοποθετούνται τα ακουστικά στην κεφαλή του εξεταζόμενου. Η σωστή εφαρμογή των ακουστικών είναι μείζονος σημασίας για την αξιοπιστία του τεστ.

Για την απόκριση του χρήστη χρησιμοποιείται ένα ασύρματο τηλεχειριστήριο, το οποίο συνδέεται με τη συσκευή μέσω Bluetooth 4.0. Το λογισμικό διαχειρίζεται εγγενώς το πάτημα του κουμπιού του τηλεχειριστήριου σε μετρήσιμο χρόνο και καταγράφει την ενέργεια, εμφανίζοντας ανάλογη ένδειξη στην οθόνη της εφαρμογής. Υποστηρίζονται όλα τα συμβατά με το iOS, εμπορικά προϊόντα συνδεσιμότητας Bluetooth, που λειτουργούν ως διακόπτες φωτογραφικού κλείστρου.

Η εφαρμογή οργανώνεται σε δύο διακριτές λειτουργίες: Χειροκίνητη ακοομετρία, και αυτόματη μέτρηση με χρήση της μεθόδου Άνω-των-5dB-Κάτω-των-10dB.

2.1 Χειροκίνητη Ακοομετρία

Η χειροκίνητη ακοομετρία αποτελεί την βασική λειτουργία της εφαρμογής καθώς ο εξειδικευμένος ιατρός μπορεί να διεξάγει την εξέταση με βάση την κρίση, την παρατήρηση, την επαγγελματική του εμπειρία, και να διασφαλίσει την ορθότητα της εξέτασης. Η οθόνη της εφαρμογής παρουσιάζει ένα απλό και γνώριμο περιβάλλον προς τον ακοολόγο για την διεξαγωγή τονικής ακοομετρίας, καθώς στόχος ήταν να μην παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από τον παραδοσιακό διαγνωστικό ακοογράφο.

Δεξιά και αριστερά στην οθόνη παρουσιάζονται τα ακοογράμματα (ANSI, 1996) για την καταχώρηση των επιπέδων ουδών ακουστότητας του αριστερού και του δεξιού αυτιού αντίστοιχα. Στο κέντρο της οθόνης, παρουσιάζονται οι επιλογές για την μεταβολή της συχνότητας (Hz) και της έντασης του σήματος (dB HL). Τα κουμπιά «Play» αριστερά και δεξιά αναπαράγουν τους επιλεγμένους ηχητικούς τόνους στην πλευρά που παρουσιάζονται. Η απόκριση του εξεταζόμενου με το πάτημα του κουμπιού οδηγεί στην εμφάνιση της ένδειξης «HEARD» στην οθόνη. Οι ουδοί ακουστότητας καταχωρούνται με το κουμπί «Threshold» στην στάθμη και στη συχνότητα που είναι επιλεγμένες. Κατά την καταχώρηση των ουδών

ακουστότητας εμφανίζεται στο ακοόγραμμα το κατάλληλο σύμβολο (ANSI S3.21-2004, R-2009) σύμφωνα με την διέγερση που παράχθηκε. Ακόμη, οι επιλογές του θορύβου masking εμφανίζονται με την ενεργοποίηση του αντίστοιχου διακόπτη.



Σχήμα 2.1 Το περιβάλλον της εφαρμογής «Butterfly Hearing» κατά την διεξαγωγή τονικής ακοομετρίας

2.2 Αυτόματη ακοομετρία. Μέθοδος Άνω-των-5dB-Κάτω-των-10dB

Ενεργοποιείται το κουμπί «Automate» στην αέρινη αγωγή και κατά την αρχή της μέτρησης. Εκτελείται αυτόματη ακοομετρία κατά την παραμετροποιημένη μέθοδο Hughson-Westlake (άνω των 5 dB κάτω των 10 dB), όπως προτείνεται από την Βρετανική Εταιρία Ακοολογίας [9]. Τα ακουστικά ερεθίσματα αποτελούνται από παλμικούς τόνους διάρκειας από 1 έως 3 δευτερόλεπτα. Επίσης, το διάστημα μεταξύ των τόνων μεταβάλλεται τυχαία μεταξύ 1 και 3 δευτερολέπτων.

Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο ANSI S3.21-1978 (R-1992). Αρχικά, το σήμα αναπαράγεται σε μια ένταση που ο ασθενής μπορεί να ακούσει καθαρά. Έπειτα, μειώνεται κάθε φορά κατά 10 dB, έως ότου ο ασθενής δεν ανταποκριθεί. Η ένταση τότε αυξάνεται κατά 5 dB μέχρι ο ασθενής να ανταποκριθεί ξανά. Από εκείνο το σημείο και μετά η ένταση αυξάνεται κάθε φορά που δεν υπάρχει ανταπόκριση και μειώνεται όταν υπάρχει. Η, κατά την αύξηση, ένταση του σήματος (dB HL) στην οποία ο ασθενής ανταποκρίνεται 2 στις 3 φορές καταγράφεται ως ουδός ακουστότητας στη συγκεκριμένη συχνότητα.

Εξάγονται τα όρια ακοής για τις 8 συχνότητες, με τη σειρά 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 500, 250, 125 Hz. Η διαδικασία εκκινεί από το καλύτερο ακουστικά αυτί αν υπάρχει ασύμμετρη απώλεια ακοής. Οι αποκρίσεις του ασθενή γίνονται με το πάτημα του απομακρυσμένου κουμπιού, που επιτρέπει την καταγραφή των χρόνων αντίδρασης για 1.5 δευτερόλεπτα από λήξη του ακουστικού ερεθίσματος.

2.3 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του συστήματος, της συσκευής iPad® με τα υποστηριζόμενα ακοομετρικά ακουστικά, έγινε με χρήση του 4128C Head and Torso Simulator (HATS) της εταιρίας Brüel & Kjær. Η βαθμονόμηση για το υποστηριζόμενο οστεόφωνο έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Η στάθμη εξόδου, σε dB SPL, μετρήθηκε για διαστήματα μισής και μιας οκτάβας μεταξύ των συχνοτήτων 125 και 8000 Hz για το αριστερό και για το δεξί ακουστικό. Εφαρμόστηκε σύγκριση με τις απαιτήσεις της ANSI (ANSI S3.7-1995, R2007). Η ακρίβεια συχνότητας προσδιορίστηκε αξιολογώντας την απόκλιση από την επιθυμητή συχνότητα σε Hz και την παραμονή του τόνου σε συγκεκριμένο εύρος με την πάροδο του χρόνου. Έπειτα, η γραμμικότητα εξετάστηκε αναπαράγοντας αρχικά έναν τόνο 1000 Hz στην μέγιστη ένταση, και μειώνοντας κατά 5 dB έως ότου φτάσει τα 0 dB HL. Απόλυτη ακρίβεια επιτυγχάνεται εάν κάθε μείωση των 5 dB συνεπάγεται ισόποση μείωση της έντασης, με τυπική απόκλιση μικρότερη του 1 dB. Η διαφωνία (crosstalk) μετρήθηκε για την συχνότητα των 1000 Hz σε κάθε πλευρά στη μέγιστη ένταση, με το ετερόπλευρο ακουστικό τοποθετημένο πάνω στην κεφαλή.

3. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις

Η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός της προτεινόμενης εφαρμογής αποτελεί μια απόπειρα αντικατάστασης των συμβατικών συσκευών ακοομετρίας, σε μια ανταγωνιστική προσπάθεια να μειωθεί το κόστος και να εκσυγχρονιστεί ο ακοομετρικός εξοπλισμός. Η λειτουργικότητα της εφαρμογής «Butterfly Hearing» καλύπτει τις απαιτήσεις ενός διαγνωστικού ακοογράφου (Type 2) και η πλήρης αξιολόγηση της έχει σκοπό να παρουσιάσει την αξιοπιστία του προτεινόμενου συστήματος μέτρησης. Τονίζεται ότι σε μια πρόσφατη μελέτη [10], αξιολογήθηκε μια πρωτότυπη εφαρμογή ακοομετρίας και τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν υψηλή ακρίβεια της συσκευής σε σύγκριση με τον παραδοσιακό ακοογράφο.

Η παρούσα εφαρμογή βρίσκεται υπό το στάδιο δοκιμών στο Εργαστήριο Ηλεκτροακουστικής του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ, και τα αποτελέσματα αναμένεται να επιφέρουν κρίσιμα ποσοτικά δεδομένα, με σύγκριση των σημάτων εξόδου με έναν παραδοσιακό κλινικό ακοογράφο και παράλληλα τη διεξαγωγή της μέτρησης σε μικρή ομάδα ασθενών ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης εφαρμογής.

4. Αναφορές

- [1] «Deafness and Hearing Loss» *World Health Organization*. N.p., n.d. Web. 14 Apr. 2016.
- [2] Schirmer, Barbara R., «*Psychological, Social, and Educational Dimensions of Deafness*. Boston, MA: Allyn and Bacon, 2001. N. pag. Print.
- [3] Stevens, G., S. Flaxman, E. Brunskill, M. Mascarenhas, C. D. Mathers, and M. Finucane. "Global and Regional Hearing Impairment Prevalence: An Analysis of 42 Studies in 29 Countries." *The European Journal of Public Health* 23.1 (2011): 146-52.
- [4] Stach, Brad A. *Clinical Audiology: An Introduction*. San Diego, CA: Singular Publ., 1998. Print.
- [5] Moore, Brian C. J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. London: Academic, 1982. Print.
- [6] Mahomed, Faheema, De Wet Swanepoel, Robert H. Eikelboom, and Maggi Soer. "Validity of Automated Threshold Audiometry." *Ear and Hearing* 34.6 (2013): 745-52.

[7] Clearwater Clinical Limited. "SHOEBOX Audiometry Pro on the App Store." *App Store*. 15 Aug. 2016. Web.

[8] Med Service Providing SRL. "IAudiometry on the App Store." *App Store*. MED SERVICE PROVIDING SRL, 20 Nov. 2015. Web.

[9] "Recommended Procedure, Pure-tone Air-conduction and Bone-Conduction Threshold Audiometry with and without Masking." *British Journal of Audiology* 33.3 (1999): 179-85. Web.

[10] Yeung J, Javidia H, Heley S, et al. The new age of play audiometry: prospective validation testing of an iPad-based play audiometer. *J Otolaryngol Head Neck Surg*. 2013;42:21-28.

Συνεδρία B2: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου (I)**Μελέτη μιγαδικής εξομάλυνσης φάσης για εφαρμογές ψηφιακής διόρθωσης ακουστικών αποκρίσεων**

Μεμελετζόγλου Ναυσικά¹
Φοιτήτρια
nausika_memeletzoglou@upnet.gr

Πάσχου Ευφροσύνη¹
Φοιτήτρια
eufrosyni_pasxou@upnet.gr

Χατζηαντωνίου Παναγιώτης¹
Διδάκτορ
phagianto@wcl.ee.upatras.gr

Κοντομίχος
Φώτιος¹
Διδάκτορ
fotkon@upatras.gr

Μουρτζόπουλος Ιωάννης¹
Καθηγητής
mourjop@upatras.gr

¹Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, 26504

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία εξετάζει τεχνικές εξάλειψης των ηχητικών παραμορφώσεων που εισάγονται κατά την αναπαραγωγή ηχητικού σήματος σε κάποιο χώρο. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται βασίζονται στην μιγαδική εξομάλυνση της φάσης της απόκρισης. Ως προς την εξομάλυνση, εξετάζονται αφενός η τάξη κλασματικής οκτάβας και αφετέρου η ύπαρξη κάποιας συχνότητας που λειτουργεί ως κατώφλι για τη βέλτιστη εφαρμογή της εξομάλυνσης στη φάση. Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσονται τεχνικές ισοστάθμισης της απόκρισης του συστήματος με τα κατάλληλα φίλτρα αντιστροφής. Τα φίλτρα αντιστροφής, υπολογίζονται με δύο μεθόδους: (α) με βάση την εξομαλυμένη κρουστική απόκριση, (β) με κατάλληλους συνδυασμούς στο μέτρο και τη φάση τους (π.χ. μοντέλο πόλων στο μέτρο και κατάλληλη εξομάλυνση στη φάση). Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την υποκειμενική αξιολόγηση των μεθόδων αυτών.

ABSTRACT

The paper examines methods for reducing distortions introduced by audio signal reproduction inside rooms. The methods rely on complex smoothing of the measured room response. For phase smoothing, the effect of fractional octave order and the frequency threshold was examined. In the second part of the work, room equalization is applied employing inverse filters: (a) based on complex smoothed response, (b) combining suitably processed magnitude and phase (e.g. via pole model and phase smoothing). The results include a perceptual listening test to evaluate these methods.

1. Θεωρία

1.1 Προεπεξεργασία αποκρίσεων

1.1.1 Μιγαδική εξομάλυνση

Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να προσεγγιστεί η ιδανική φάση, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η γραμμική μεταβολή της στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$, που αντιστοιχεί σε απουσία ανακλάσεων και άλλων παραμορφώσεων του σήματος για οποιαδήποτε συχνότητα. Η μέθοδος της μιγαδικής εξομάλυνσης κλασματικής οκτάβας [1], όταν εφαρμοστεί αποκλειστικά στη φάση του σήματος, καταλήγει σε αποτέλεσμα που προσεγγίζει τη γραμμική συμπεριφορά. Με δεδομένο ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη εξομάλυνσης, τόσο θα βελτιώνεται και η προσέγγιση της ιδανικής φάσης, στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων μέσω εναλλακτικών προσεγγίσεων. Επιλέχθηκαν δύο τάξεις κλασματικής οκτάβας για εξομάλυνση της φάσης του συστήματος: 1/3 και 1/10 της οκτάβας. Στο στάδιο αυτό δε θα γίνει διόρθωση και στο μέτρο του σήματος, αντ' αυτού θα θεωρηθεί πως το μέτρο εμφανίζει ιδανική απόκριση (επίπεδη μορφή).

1.1.2 Εξομάλυνση φάσης σε περιορισμένη συχνοτική περιοχή

Για την ανακατασκευή της φάσης αναπτύχθηκε αλγόριθμος (θα αναφέρεται ως *LL-Linear Low frequencies*), με τον οποίο δημιουργούνται δύο περιοχές στη φάση: η γραμμική περιοχή φάσης για συχνότητες $f < f_{th}$ και η μη γραμμική περιοχή που διατηρεί αναλλοίωτη τη φάση της κρουστικής απόκρισης, η οποία εκτείνεται στο εύρος συχνοτήτων $[f_{th}, \frac{f_s}{2}]$, Εξ. (1.1). Ερευνήθηκαν αρκετές συχνότητες-όρια f_{th} στο διάστημα 80-200Hz, και τελικά επιλέχθηκε ως κατώφλι η συχνότητα των 180Hz. Ο αλγόριθμος *LL* αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογίζεται η καθυστέρηση τ που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από την αρχή της κρουστικής απόκρισης $h(t)$ μέχρι να φτάσει η κύρια ενέργεια του σήματος και για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Hilbert. Με γνωστό το τ ορίζεται η γραμμική φάση ως εξής:

$$\varphi_{lin}(f) = -2\pi \frac{f}{f_s} \tau, \quad f < f_{th} \quad (1.1)$$

2. Για την γραμμικοποίηση της φάσης χρησιμοποιείται η γραμμική συνιστώσα φ_{lin} (1^ο βήμα). Αποτέλεσμα είναι ένα νέο διάνυσμα φάσης αποτελούμενο από ένα γραμμικό κομμάτι φ_{lin} για συχνότητες $f \in [0, f_{th}]$ και από τη φάση της κρουστικής χωρίς κάποια επεξεργασία για τις συχνότητες $f \in [f_{th}, \frac{f_s}{2}]$. Συνεπώς το σήμα της απόκρισης, με τη νέα φάση, εκφράζεται ως:

$$H'(f) = |H(f)| * e^{j(\varphi_{lin}(f) + \varphi(f))} \quad (1.2)$$

3. Για να αφαιρεθεί η καθυστέρηση τ , πολλαπλασιάζεται η φάση με έναν όρο φ'_{lin} αντίθετο από τη γραμμική φάση φ_{lin} , δηλαδή:

$$\varphi'_{lin}(f) = 2\pi \frac{f}{f_s} \tau \quad (1.3)$$

4. Το νέο σήμα φάσης $\varphi'(f)$ (3ο βήμα) και ανέπαφο το μέτρο της απόκρισης συνθέτουν το νέο σήμα :

$$H'(f) = |H(f)| * e^{j\varphi'(f)} \quad (1.4)$$

Στη συνέχεια, εξομαλύνεται η απόκριση $h'(t) = F^{-1}\{H'(f)\}$. Το τμήμα της φάσης με το γραμμικό χαρακτήρα $[0, f_{th})$, κατά τη διαδικασία της εξομάλυνσης δεν θα επηρεαστεί, σε αντίθεση με το υπόλοιπο τμήμα της φάσης $[f_{th}, \frac{f}{2}]$ στο οποίο η εξομάλυνση θα επιδράσει σε βαθμό ανάλογο με την τάξη κλασματικής οκτάβας που επιλέγεται.

5. Για την επαναφορά της αρχικής καθυστέρησης τ στην απόκριση, πολλαπλασιάζεται η εξομαλυμένη φάση $\varphi'_{cs}(f)$ (βήμα 4^ο) με τον παράγοντα $-2\pi \frac{f}{f_s} \tau$ και προκύπτει η τελική φάση $\varphi_{LL}(f)$.

1.2 Ψηφιακή ισοστάθμιση απόκρισης χώρου

Η πρώτη μέθοδος ισοστάθμισης βασίζεται στο αποτέλεσμα της εξομάλυνσης της απόκρισης και υπολογίζει το αντίστροφο φίλτρο εξομάλυνσης $g_{cse,n}(t)$, με το οποίο πρέπει να φιλτραριστεί η απόκριση του συστήματος, και το ισοσταθμισμένο σήμα είναι:

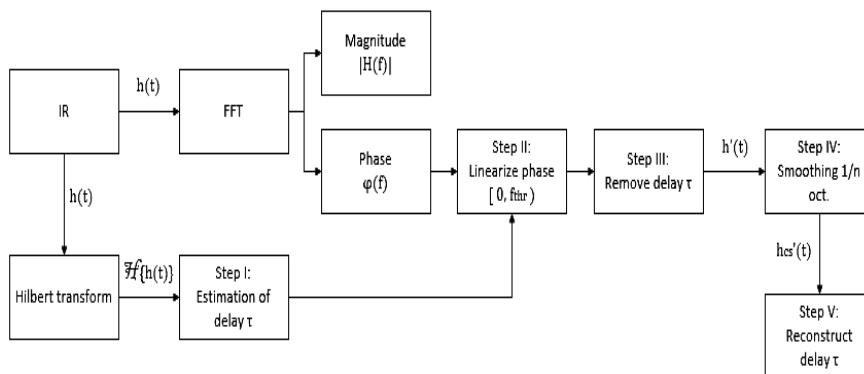
$$H_{eq,cs,n}(f) = H_{cs,n}(f) * G_{cse,n}(f) \quad (1.5)$$

Μελετήθηκαν δύο τάξεις εξομάλυνσης που επιλέχθηκαν από το πρώτο κομμάτι της μελέτης και αφορούν τον παράγοντα n (1/3 οκτάβας και 1/10) και δημιουργήθηκαν αντίστοιχες ισοσταθμισμένες αποκρίσεις $H_{eq,cs,3}(f)$ και $H_{eq,cs,10}(f)$.

Η δεύτερη μέθοδος ισοστάθμισης (θα αναφέρεται ως *ELL-Equalization in magnitude and Linear Low frequencies*), αποτελείται από τον ξεχωριστό σχεδιασμό του μέτρου και της φάσης του αντίστοιχου φίλτρου (Σχήμα 1.2). Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Το φίλτρο ισοστάθμισης $g_{inv}(t)$, που αποτελείται από παράλληλα φίλτρα 2^{15} τάξης [2], υπολογίζεται με βάση την κρουστική απόκριση

ελάχιστης φάσης $h_{min}(t)$ του συστήματος και την επιθυμητή κρουστική απόκριση μετά την ισοστάθμιση $h_{\tau}(t)$. Μετασχηματίζοντας κατά Fourier κρατείται μόνο το μέτρο του φίλτρου.



Σχήμα 1.1 Μέθοδος γραμμικοποίησης σε χαμηλές συχνότητες και εξομάλυνσης σε υψηλές συχνότητες, βήμα προς βήμα.

2. Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος LL (όπως περιγράφεται στο 1.1.2) για τη φάση συστήματος και υπολογίζεται η $h_{LL}(t)$, με γραμμική φάση στο $[0, f_{th})$ και εξομαλυμένη στο $[f_{th}, \frac{f}{2}]$. Εφαρμόζεται μετασχηματισμός Fourier και κρατείται η φάση της κρουστικής $h_{LL}(t)$.

3. Συνδυάζεται το μέτρο του βήματος 1 με τη φάση του βήματος 2 και δημιουργείται το σήμα αντιστροφής:

$$H_{ELL}(f) = |G_{inv}(f)| * e^{j\phi_{LL}(f)} \quad (1.6)$$

4. Πραγματοποιείται συνέλιξη της κρουστικής $h(t)$ του συστήματος με τη συνάρτηση μεταφοράς $h_{ELL}(t)$ του φίλτρου ισοστάθμισης και υπολογίζεται το τελικό σήμα ισοσταθμισμένο ως προς το μέτρο και διορθωμένο ως προς τη φάση :

$$h_{eq}(t) = h(t) * h_{ELL}(t) \quad (1.7)$$

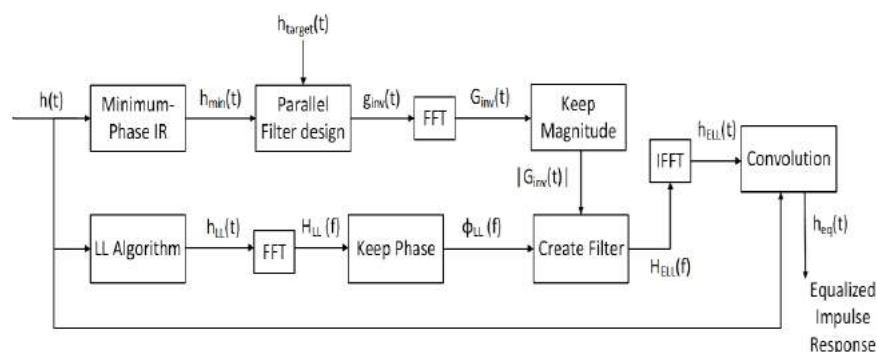
2. Υλοποίηση

Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων των μεθόδων υλοποιήθηκαν υποκειμενικά πειράματα ακρόασης, όπου ομάδες ακροατών κλήθηκαν να εκτιμήσουν το βαθμό

παραμόρφωσης που εμφανίζαν σήματα μουσικής ή ομιλίας ύστερα από την προτεινόμενη επεξεργασία, δηλαδή:

- $r_{x,k}(t) = h_x(t) * S_k(t)$ (2.1), όπου $x = \text{δωμάτιο 1 με διαστάσεις 7.5 x 4.5 x 3m και } RT = 0.7\text{sec, δωμάτιο 2 με διαστάσεις 35x25x8m και } RT = 1.7\text{sec και } k = \text{music, speech}$

Στη συνέχεια, για το πρώτο μέρος του πειράματος υπήρχαν οι συνδυασμοί:



Σχήμα 1.2 Block διάγραμμα με υλοποίηση ισοστάθμισης με φίλτρο ELL

- $r_{x,k,p}(t)$ (2.2), με p να δηλώνει τις επεξεργασίες φάσης με μιγαδική εξομάλυνση (complex smoothing - cs) τάξεως 1/3 ή 1/10 οκτ. με ή χωρίς διαχωρισμό του φάσματος στα 180Hz: $cs\ 1/3, cs\ 1/10, cs\ 1/3-180, cs\ 1/10-180$, στο σήμα $h_{x,k}(t)$,

Αντίστοιχα, για το δεύτερο μέρος του πειράματος:

- $r_{x,k,m}^{EQ}(t) = r_{x,k}(t) * g_{inv,m}(t)$ (2.3), όπου m η ισοστάθμιση με τα φίλτρα $CSE\ 1/3, CSE\ 1/10, ELL\ 1/3, ELL\ 1/10$.

Οι συμμετέχοντες έπρεπε να δώσουν τις ανάλογες βαθμολογίες με βάση τις παρακάτω ερωτήσεις:

Πείραμα I: Ποιο αρχείο εμφανίζει λιγότερη παραμόρφωση κατά τη γνώμη σας; (100-ελάχιστη παραμόρφωση, 0-μέγιστη παραμόρφωση)

Πείραμα II: Ποιο αρχείο ακούγεται καλύτερα κατά τη γνώμη σας; (100-τέλεια ποιότητα, 0-κακή ποιότητα)

Τα προς σύγκριση σήματα αναπαράγονταν με τυχαίο τρόπο για ένα είδος ηχητικού σήματος κάθε φορά (μουσική ή ομιλία), ανά χώρο (μικρός-μεγάλος χώρος) και οι βαθμολογίες μπορούσαν να πάρουν τιμές από 0 έως 100 (χειρίστο και βέλτιστο αντίστοιχα).

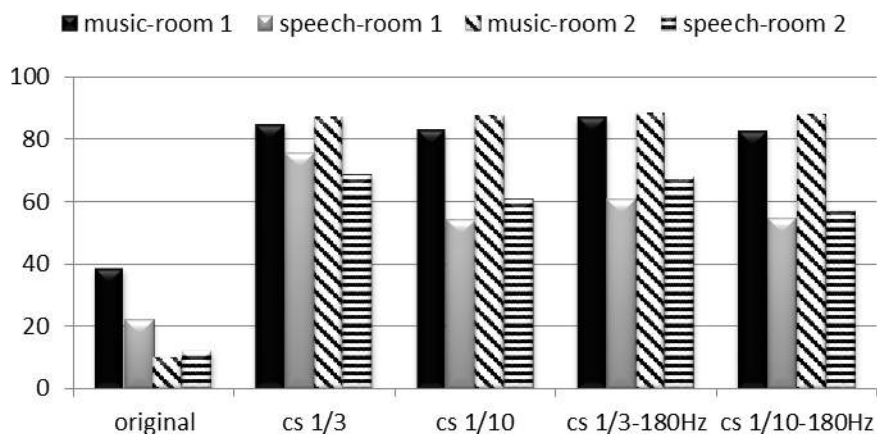
3. Αποτελέσματα

Για την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ANOVA (univariate analysis of varience) και εφαρμόστηκε σε δύο περιπτώσεις: α) για τον έλεγχο της επίδρασης των χαρακτηριστικών των δύο διαφορετικών χώρων στον υποκειμενικό προσδιορισμό της απόδοσης των μεθόδων επεξεργασίας και β) στην επίδραση που έχουν τα διαφορετικά σήματα ανεξάρτητα από το είδος της επεξεργασίας και το είδος του χώρου.

3.1 Αξιολογήση προεπεξεργασίας φάσης

Η ανάλυση ANOVA για το πρώτο μέρος του πειράματος καταλήγει στα εξής αποτελέσματα: το είδος του χώρου δεν φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο σε καμία από τις δύο κατηγορίες εξομάλυνσης της φάσης, που περιγράφηκαν στις παραγράφους 1.1.1 και 1.1.2, με ή χωρίς συχνότητα κατωφλίου (με $p=56\%$ και $p=16\%$ αντίστοιχα με $p_{crit}=1\%$). Αντιθέτως, το είδος του ακουστικού σήματος φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην κρίση των αξιολογητών (με p που τείνει στο 0% και στις δύο περιπτώσεις ακουστικού σήματος). Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει πως η διόρθωση της απόκρισης δεν εξαρτάται σημαντικά από το είδος και τα χαρακτηριστικά του χώρου ακρόασης και επαληθεύεται έτσι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μιγαδικής εξομάλυνσης για την διόρθωση της απόκρισης χώρου - Η/Α αλυσίδας, η οποία πλέον επεκτείνεται και στην περίπτωση της μιγαδικής εξομάλυνσης σε τμήμα του φάσματος της φάσης. Επίσης, η αναζήτηση συχνότητας κατωφλίου για την εφαρμογή της εξομάλυνσης διαφέρει μεταξύ της περίπτωσης σήματος μουσικής και της περίπτωσης σήματος ομιλίας.

Από τα αποτελέσματα (Σχ. 3.1) φαίνεται ότι η εφαρμογή εξομάλυνσης στη φάση από τα 180Hz και έπειτα είναι πιο αποτελεσματική σε σχέση με την εξομάλυνση όλης της φάσης για την περίπτωση του 1/3 οκτ. Ο χωρισμός του φάσματος σε δύο περιοχές φάσης στην περίπτωση δωματίου μικρών διαστάσεων, χαμηλού χρόνου αντήχησης ($RT=0,7sec$) και για σήμα μουσικής έχει νόημα μόνο στην περίπτωση της εξομάλυνσης στο 1/3 οκτ. μιας και το αποτέλεσμα της επεξεργασίας αυτής έχει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες προσπάθειες διόρθωσης της φάσης του σήματος.



Σχήμα 3.1 Αποτελέσματα πειράματος

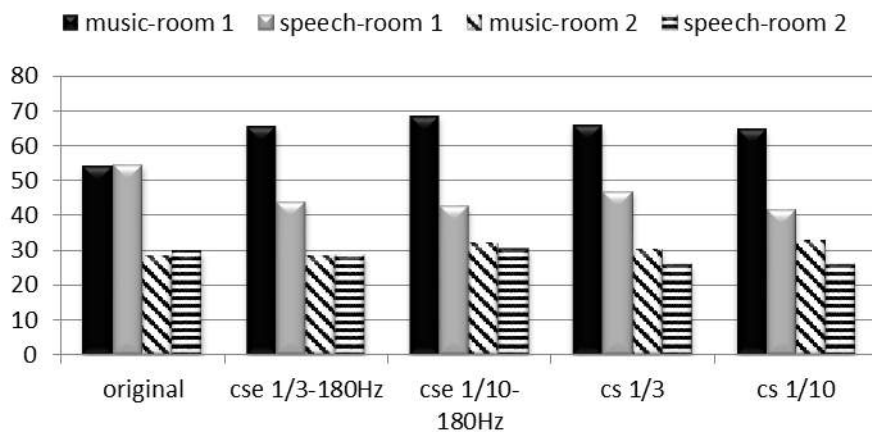
Για το σήμα ομιλίας παρατηρείται η προτίμηση των ακροατών στο σήμα *cs 1/3*, ακολουθεί το *cs 1/3-180Hz*, μετά το *cs 1/10-180Hz* και με πολύ μικρή διαφορά στο τέλος έρχεται το *cs 1/10*. Σημειωτέον ότι η ομιλία είναι ιδιαίτερα “ευαίσθητη” ως σήμα και οι ακροατές ήταν πιο αυστηροί κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1, για τον χώρο με μεγάλη αντήχηση ($RT=1,8$ sec) το σήμα μουσικής συγκέντρωσε τη μεγαλύτερη βαθμολογία, όταν διορθώνεται με τη μέθοδο *cs 1/3-180Hz*. Αμέσως μετά προτιμούνται οι μέθοδοι *cs 1/3*, *cs 1/10* και *cs 1/10-180Hz* με μικρή απόσταση μεταξύ τους και η ύπαρξη της συχνότητας ορίου στα 180 Hz βελτιώνει την μέθοδο της εξομάλυνσης 1/3 οκτάβας σε αυτή την περίπτωση.

Ως προς την ομιλία όλα τα σήματα συγκέντρωσαν αρκετά χαμηλότερες βαθμολογίες σε σχέση με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που κλήθηκαν να αξιολογήσουν οι συμμετέχοντες. Υπολογίζοντας τους νέους μέσους όρους φαίνεται ότι για το σήμα μουσικής η μέθοδος διόρθωσης της φάσης που προτιμάται είναι η *cs 1/3-180Hz*. Με μικρή διαφορά κατατάσσονται οι υπόλοιπες μέθοδοι με την εξής σειρά: *cs 1/3*, *cs 1/10* και *cs 1/10-180Hz* (Σχ.3.1). Για την ομιλία η παραπάνω γενίκευση των αποτελεσμάτων κατατάσσει τις μεθόδους ως εξής: *cs 1/3, cs 1/3-180Hz, cs 1/10, cs 1/10-180Hz*.

3.2 Αξιολόγηση μεθόδων ισοστάθμισης

Εδώ εξετάζεται η συσχέτιση των χαρακτηριστικών του χώρου, των σημάτων και των φίλτρων ισοστάθμισης (Σχήμα 3.2). Μέσω της ανάλυσης ANOVA φαίνεται ότι τα φίλτρα CSE (Complex Smoothing Equalization) επηρεάζονται άμεσα και από το είδος του αναπαραγόμενου σήματος αλλά και από τα χαρακτηριστικά του χώρου ($p=0\%$ και $p=0.03\%$ αντίστοιχα με $p_{crit}=1\%$).



Σχήμα 3.2 Αποτελέσματα για την ισοστάθμιση με την μέθοδο της μιγαδικής εξομάλυνσης και με την προτεινόμενη μέθοδο

Επίσης, υπάρχει άμεση εξάρτηση των βαθμολογιών των φίλτρων της προτεινόμενης μεθόδου από το είδος του χώρου (με $p=0\%$) και από το είδος του ακουστικού σήματος (με $p=0.01\%$). Τέλος, εφαρμόστηκε η ίδια ανάλυση για το σύνολο των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν και το αποτέλεσμα έδειξε μεγάλη

εξάρτηση και από τους δύο παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA είναι αναμενόμενα, αφού η διόρθωση της απόκρισης κάποιου συστήματος όμοιου με αυτό που εξετάζεται, έχει άμεση εξάρτηση προφανώς από το χώρο.

4. Συμπεράσματα

Συμπεραίνουμε ότι η εξομάλυνση της φάσης του σήματος απόκρισης σε μια ζώνη συχνοτήτων, με γραμμικοποίηση στο μη εξομαλυμένο μέρος, εμφανίζει μια τάση βελτίωσης της ψηφιακής διόρθωσης που επιχειρείται. Θεωρητικά η γραμμικοποίηση μέρους της φάσης και συγκεκριμένα των χαμηλών συχνοτήτων, όπου είχαν παρατηρηθεί αλλοιώσεις του ισοσταθμισμένου σήματος, προσεγγίζει την ιδανική φάση σήματος απόκρισης (οποιοδήποτε συστήματος). Οι συμμετέχοντες στο πείραμα προτιμούν το διαχωρισμό του φάσματος της φάσης σε δύο ζώνες, με τη χρήση f_{th} στα 180Hz, στην περίπτωση εξομάλυνσης σε 1/3 οκτάβας και για σήμα μουσικής. Στην περίπτωση του σήματος ομιλίας, η μέθοδος της ενιαίας μιγαδικής εξομάλυνσης σε ολόκληρο το φάσμα της φάσης και για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Μέσω του πειράματος αποδεικνύεται τελικά πως η χρήση της f_{th} στην περίπτωση του σήματος ομιλίας δε μπορεί να επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Από την ανάλυση των μεθόδων ισοστάθμισης, για χώρους με μικρή αντήχηση, η προτεινόμενη μέθοδος με τοποθέτηση πόλων στο μέτρο και εξομάλυνση μέρους της φάσης του φίλτρου αντιστροφής είναι πιο αποτελεσματική για εξομάλυνση της τάξεως του 1/10 οκτάβας στην περίπτωση του σήματος μουσικής. Για το σήμα ομιλίας διαφαίνεται ότι χρειάζεται μεγαλύτερος βαθμός εξομάλυνσης ώστε να είναι αποτελεσματική.

Για χώρους με μεγάλη αντήχηση, η μελετούμενη μέθοδος και στις δύο περιπτώσεις σημάτων έχει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ισοστάθμιση της απόκρισης για βαθμό εξομάλυνσης 1/10 οκτάβας.

Γενικότερα, διαφαίνεται ότι με την τοποθέτηση πόλων στο μέτρο της απόκρισης, είναι δυνατή η μείωση του απαιτούμενου βαθμού εξομάλυνσης στη φάση, ώστε το ισοσταθμισμένο σήμα, να έχει τα βέλτιστα χαρακτηριστικά που επιδιώκονται.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε (Σχ. 1.2) βελτιώνει την ποιότητα αντιστροφής μέσω φίλτρων που υπολογίζονται με βάση την εξομαλυμένη απόκριση, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την προτίμηση των προτεινόμενων φίλτρων κατά την υποκειμενική αξιολόγηση. Η τοποθέτηση των πόλων σε διαφορετικά σημεία στο μέτρο, αναμένεται να βελτιώσει ακόμα περισσότερο τα φίλτρα που παράγονται με την προτεινόμενη μέθοδο.

5. Αναφορές

[1] Panagiotis D. Hatziantoniou, John N.Mourjopoulos. «Generalized fractional-octave smoothing for audio and acoustic responses» J.Audio Eng. Soc., 48(4):259–280, Apr. (2000)

[2] Balazs Bank. «Perceptually Motivated Audio Equalization Using Fixed-Pole Parallel Second Order Filters» IEEE Signal Process. Lett., 15: 477-480 (2008)

Ramon: Αναλύοντας την Ηχητική Επίπτωση

Georgios Siantikos,
Theodoros Giannakopoulos
Ramon Private Company
{siantikosg@gmail.com,
tyiannak@gmail.com}

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα δημοσίευση περιγράφει την λειτουργικότητα και την χρησιμότητα της πλατφόρμας Ramon (www.ramon.gr). Η πλατφόρμα παρέχει ένα σύνολο από υπηρεσίες cloud οι οποίες ποσοτικοποιούν την επίπτωση που έχει η ηχητική πληροφορία στο κοινό στο οποίο απευθύνεται, μέσα από την ανάλυση πληροφορίας πλαισίου (contextual). Μέσω της ανάλυσης ηχητικών ροών σε πραγματικό χρόνο, και μέσω της παροχής σημαντικής πληροφορίας για τις ροές αυτές, η πλατφόρμα Ramon λύνει το πρόβλημα της αναζήτησης ηχητικών δειγμάτων και της κατανόησης της επίπτωσης που έχουν αυτοί οι ήχοι στο κοινό στο οποίο απευθύνονται. Οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να “ανεβάσουν” ένα ή περισσότερα ηχητικά δείγματα και η πλατφόρμα αναλαμβάνει να τα εντοπίσει σε πολλαπλές ηχητικές πηγές: ραδιόφωνο, τηλεόραση, web. Παράλληλα, πραγματοποιείται ανάλυση του πλαισίου (context) στο οποίο αναπαράγονται τα εν λόγω δείγματα.

Ramon: Analysing Audio Impact

ABSTRACT

This paper describes the functionality and the usability of the Ramon platform (www.ramon.gr). Ramon is a cloud based analytics service that measures the impact of audio information by processing contextual information. Through analyzing audio flows in real time and providing meaningful information, Ramon solves the problem of finding an audio excerpt and understanding the effect it is causing to a respective audience. Users have the ability to upload an audio segment and Ramon automatically locates it in various media sources (radio broadcasts, web and TV) and by analysing the audio context of responses, comments and other feedback it indicates meaningful information concerning the impact of the audio.

Εισαγωγή

Το RaMon παρέχει online υπηρεσίες σε εταιρίες marketing, μουσικούς, μανατζερ μουσικών, δισκογραφικές εταιρίες, υπευθύνους δημοσίων σχέσεων και ραδιοφωνικούς/τηλεοπτικούς σταθμούς για την αυτόματη ανάλυση ηχητικού περιεχομένου από ροές δεδομένων που περιέχουν ηχητική πληροφορία. Απώτερος σκοπός είναι η εξαγωγή γνώσης και στατιστικών συμπερασμάτων στα πλαίσια μιας ενοποιημένης πλατφόρμας ανάλυσης ηχητικών δεδομένων μεγάλου όγκου και σε

πραγματικό χρόνο. Στόχος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα αυτόματα εξαγόμενης πληροφορίας από το ηχητικό περιεχόμενο όπως: πρόσωπα που συμμετέχουν σε συζητήσεις – συνεντεύξεις, αναφορές σε γεγονότα, οντότητες και πρόσωπα, συναίσθημα (sentiment), μουσικά κομμάτια και καλλιτέχνες, διαφημίσεις και αντίστοιχα προϊόντα ή / και εταιρίες. Το σύνολο των υψηλού επιπέδου πληροφοριών οπτικοποιείται στον χρήστη στα πλαίσια μίας online διεπαφής από την οποία: διαφημιστές μπορούν να αναλύουν το περιεχόμενο των εκπομπών στις οποίες διαφημίζονται συγκεκριμένα προϊόντα εξάγοντας – έμμεσα – συμπεράσματα για το προφίλ των ακροατών, υπεύθυνοι σχεδιασμού ραδιοφωνικών εκπομπών αναλύουν το ραδιοφωνικό περιεχόμενο, πολιτικοί και πολίτες ενημερώνονται για την συμμετοχή δημοσίων προσώπων σε ραδιοφωνικές εκπομπές, καθώς επίσης και για το πλαίσιο στο οποίο αναφέρονται (θετικά – αρνητικά σχόλια κτλ). Στην παρούσα δημοσίευση γίνεται μια γενική περιγραφή των αλγοριθμικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται πίσω από την πλατφόρμα Ramon.

1. Στόχος και Οφέλη

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου επιχειρηματικού σχεδίου μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για άμεσα διαθέσιμες υπηρεσίες.

Καταρχάς, η ανάλυση ραδιοφωνικού περιεχομένου για τον σχεδιασμό στρατηγικής από τους ίδιους τους παροχείς δεδομένων: η πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από τους υπεύθυνους σχεδιασμού προγράμματος για να εξάγει στατιστικά συμπεράσματα για την κατανομή του περιεχομένου σε σχέση με τον ανταγωνισμό.

Επιπλέον, η πλατφόρμα μπορεί να λύσει το πρόβλημα της αυτοματοποιημένης ανάλυσης μουσικού περιεχομένου από εταιρίες παραγωγής μουσικής και καλλιτέχνες.

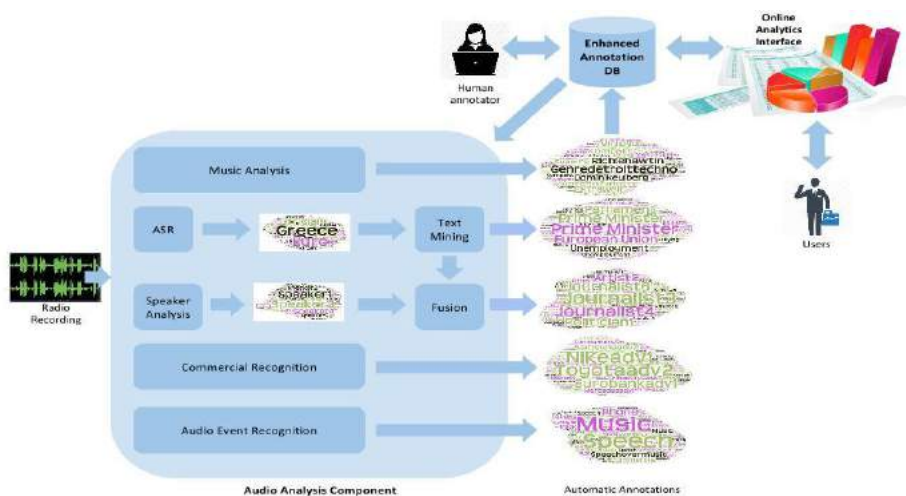
Επίσης, σχετικά με την ανάλυση περιεχομένου σε πολιτικού - κοινωνικού περιεχομένου ζητήματα και πρόσωπα, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση συναισθήματος (sentiment) που συνοδεύει το περιεχόμενο αναφοράς σε πρόσωπα. Η συγκεκριμένη υπηρεσία μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα από συμβούλους επικοινωνίας πολιτικών προσώπων αλλά και από το ευρύ κοινό στα πλαίσια της ενημέρωσης σχετικά με τα επίπεδα πλουραλισμού των ΜΜΕ.

Ιδιαίτερη είναι και η ανάλυση της συσχέτισης του ηχητικού περιεχομένου με διαφημίσεις και προϊόντα. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων για το πώς κατανέμεται το περιεχόμενο των ραδιοφωνικών/τηλεοπτικών εκπομπών ανά διαφημιζόμενο προϊόν. Η πληροφορία αυτή θα χρησιμοποιείται άμεσα από διαφημιστές και υπεύθυνους σχεδιασμού ενεργειών προώθησης μέσω της εξαγωγής συμπερασμάτων για την κάλυψη του περιεχομένου των ραδιοφωνικών εκπομπών από μία διαφήμιση, εφόσον τα συμπεράσματα αυτά ουσιαστικά θα οδηγούν σε γνώση για το προφίλ των αντίστοιχων ακροατών.

Τέλος, θα μπορεί να αποτελέσει ενδιάμεσο βήμα για νέες υπηρεσίες όπως σημασιολογική δεικτοδότηση και οργάνωση βάσεων δεδομένων οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους ίδιους τους παροχείς δεδομένων.

2. Γενική περιγραφή μεθοδολογίας

Σκοπός του RaMon είναι να αναλύσει σε πραγματικό χρόνο ηχητικό σήμα που προέρχεται από ηχητικές πηγές, προκειμένου να εξάγει πληροφορία υψηλής σημασιολογικής αξίας, η οποία θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφημιστές, σχεδιαστές προώθησης προϊόντων, υπεύθυνους πολιτικής ραδιοφωνικών/τηλεοπτικών σταθμών αλλά και ειδικούς ανάλυσης μέσω ενιμέρωσης. Η πρωτοτυπία έγκειται στην χρήση ενός μεγάλου αριθμού μεθόδων αναγνώρισης ηχητικού σήματος η οποία οδηγεί σε ανάλυση ολόκληρου του φάσματος της πληροφορίας που περιέχεται σε μία ραδιοφωνική/τηλεοπτική εκπομπή: ομιλία, ταυτότητα ομιλητών, τύπος εκπομπής, πλαίσιο περιεχομένου, διαφημίσεις και μουσική. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το γενικό εννοιολογικό διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος. Τα γενικά components της πλατφόρμας, τα οποία περιγράφονται και στις επόμενες υποενότητες, είναι τα εξής: (1) Ανάλυση ηχητικής πληροφορίας (Audio Analysis Component), (2) Βάση Δεδομένων Βελτιωμένων Επισημειώσεων (Enhanced Annotation Database), (3) Online Διεπαφή Ανάλυσης Δεδομένων (Online Analytics Interface)



Σχήμα 2 Εννοιολογικό διάγραμμα

3. Ηχητική Ανάλυση

Η συγκεκριμένη κατηγορία μεθοδολογιών περιλαμβάνει τον «πυρήνα» του συστήματος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης ήχου προκειμένου να εξαχθεί σημαντική γνώση για το περιεχόμενο.

Πίνακας 1 Βασικά modules του Audio Analysis Components, και αντίστοιχες περιγραφές

Όνομα	Περιγραφή	Prior Γνώση	Παραδείγματα Εξόδου
Music Analysis Module	Εξάγει χαρακτηριστικά από την μουσική που μεταδίδεται τις υπο επεξεργασία ηχητικές ροές.	Κατηγοριοποίηση μουσικών ειδών, μεταδεδομένα	Είδη μουσικής, αναγνώριση καλλιτεχνών και μουσικών κομματιών
Commercial Recognition Module	Εντοπίζει και αναγνωρίζει διαφημίσεις	Βάση δεδομένων με διαφημίσεις	ID διαφήμισης και προϊόντων
ASR and Text Mining Module	Μετατροπή ομιλίας σε κείμενο και ανάλυση κειμένου για την εξαγωγή topics και αναγνώριση ονομάτων οντοτήτων. Εξαγωγή συναισθήματος (sentiment)	Μοντέλο γλώσσας, λίστα ονομάτων και οντοτήτων	Λίστα και συχνότητες θεμάτων και οντοτήτων
Speaker Analysis Module	Αναγνώριση και ημερολογιοποίηση ομιλητών (speaker identification) και αντιστοίχιση με ήδη υπάρχοντες ομιλητές από την βάση δεδομένων	Βάση ομιλητών και αντιστοίχισης σε οντότητες	Λίστα ομιλητών (με τα χαρακτηριστικά τους) και στατιστικά ομιλίας (τύπος διαλόγου, διάρκειες κτλ)
General Audio Classification Module	Περιλαμβάνει μία σειρά αποδοτικών ταξινομητών οι οποίοι εξάγουν ηχητικές κλάσεις (μουσική, ομιλία, φύλο ομιλητή, ηχητικά συμβάντα, κτλ). Χρησιμοποιείται, τόσο για εμπλουτισμό πληροφορίας όσο και για preprocessing	Επιβλεπόμενα μοντέλα ηχητικών κλάσεων	Λίστα και συχνότητες ηχητικών κλάσεων

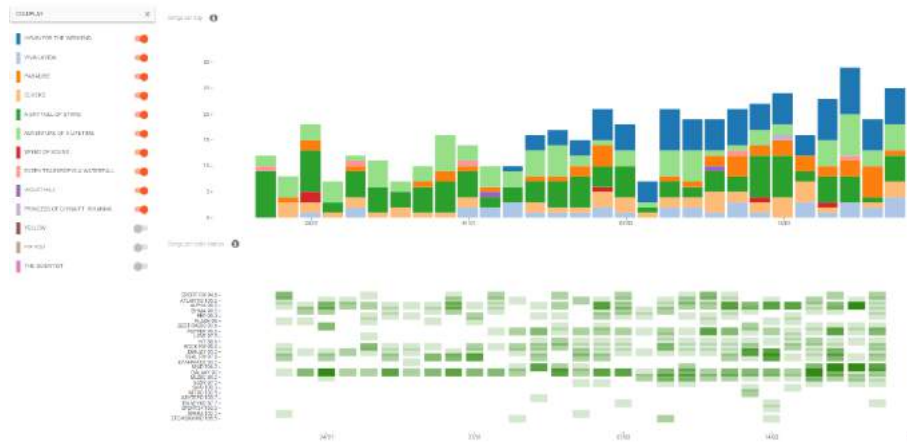
4. Βάση δεδομένων βελτιωμένων επισημειώσεων

Η βάση του συστήματος στην οποία αποθηκεύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ηχητικής πληροφορίας, μαζί με ένα σύνολο από πληροφορίες prior γνώσης, που θα παρέχεται σε αραιά διαστήματα από τους συντηρητές. Εφόσον τα χαρακτηριστικά μεσαίου επιπέδου έχουν εξαχθεί από κάθε ηχητικό σήμα (και αποθηκευτεί στην βάση για μελλοντική χρήση), ένα σύνολο από συσσωρευτικές διαδικασίες εξαγωγής στατιστικών λαμβάνει χώρα και αποθηκεύεται επίσης στην βάση δεδομένων. Εκτός από μία λεπτομερειακή καταγραφή (σε απόλυτη χρονική εξέλιξη) των εξαγόμενων χαρακτηριστικών, στην βάση καταγράφονται και όλα τα

προκαθορισμένα στατιστικά ανά ραδιοφωνικό/τηλεοπτικό σήμα (π.χ. ιστογράμματα συσχέτισης διαφημίσεων με είδη μουσικής) . Στην βάση επίσης αποθηκεύονται περιοδικά τα επισημειωμένα δεδομένα (π.χ. διαφημίσεις προς αναζήτηση, μουσική πληροφορία, πληροφορίες για πρόσωπα κτλ). Αξίζει να σημειωθεί ότι έμφαση δίνεται στην αποδοτική εκτέλεση χρονικών queries τα οποία είναι απαραίτητα στα πλαίσια της βέλτιστης λειτουργίας της τελικής διεπαφής.

5. Online διεπαφή ανάλυσης δεδομένων

Η υψηλού σημασιολογικού περιεχομένου πληροφορία που έχει εξαχθεί από τα ηχητικά σήματα (και θα έχει καταχωρηθεί στην βάση δεδομένων) μπορεί να οπτικοποιηθεί στα πλαίσια του Online Analytics Interface, το οποίο αποτελεί μία φιλική-προς-τον-χρήστη διαδικτυακή διεπαφή ανάλυσης δεδομένων. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα αποστολής στατικών reports στους χρήστες.



Σχήμα 2 Παράδειγμα χρήσης πλατφόρμας 1

7 songs detected in 13 stations
 Biçare is the most frequent song (72 occurrences in total)
 KordonFM is the most dominant station (29 occurrences in total)

Station	Country	Web	Biçare	Kül (Demil...)	Soma	Biçare (Bas...)	Ah O His	Kül	Fer	Sum
Joyturk	tr	karnaval.com/radyolar/joyturk	13	0	0	0	0	12	0	25
Süper FM	tr	karnaval.com/radyolar/superfm	0	0	0	1	0	0	0	1
Show Radyo	tr	www.showradyo.com.tr/	0	0	0	0	0	7	0	7
Kesan FM	tr	canlifm.com/popmuzik/kesanfm	1	0	0	0	0	2	0	3
RadyoD	tr	www.radyod.com.tr/	2	22	0	0	0	0	0	24
Radyo Seyhan	tr	canlifm.com/popmuzik/radyoseyhan	3	5	0	0	0	0	0	8
Radyo Box	tr	canlifm.com/popmuzik/radyobox	0	0	0	0	0	4	0	4
Radyo Ege	tr	canlifm.com/popmuzik/radyoege	0	0	0	0	2	0	0	2
Kral Pop	tr	canlifm.com/popmuzik/kralpop	0	28	0	0	0	0	0	28
AlemFM	tr	canlifm.com/popmuzik/alemfm	0	0	0	0	0	5	0	5
Radyo Net	tr	canlifm.com/popmuzik/konya-radyonet	6	4	1	0	1	8	2	22
Tempo FM	tr	tempofm.com.tr/	18	0	0	0	0	0	0	18
KordonFM	tr	canliradyodinlex.com/kordon-fm/	29	0	0	0	0	0	0	29
Total			72	59	1	1	3	38	2	176

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα δημοσίευση πραγματοποιήθηκε μία γενική περιγραφή των μεθοδολογιών πίσω από την πλατφόρμα Ramon, σκοπός της οποίας είναι η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων από ηχητικές ροές και η εξαγωγή χρήσιμης σημασιολογικής πληροφορίας από τις πηγές αυτές, για ένα σύνολο χρηστών από τους χώρους της διαφήμισης, της μουσικής βιομηχανίας, της διαχείρισης δημόσιας εικόνας και των μέσων μαζικής ενημέρωσης. Βασική καινοτομία της πλατφόρμας είναι η αυτοματοποιημένη εκτίμηση contextual πληροφορίας για τα ηχητικά δείγματα που ενδιαφέρουν τον χρήστη, κάτι το οποίο επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της αναμενόμενης επίπτωσης που έχει η πληροφορία αυτή στο κοινό το οποίο απευθύνεται.

Flying insects wingbeat optically recorded waveform characteristics

Spyros Kouzoupis and Ilyas Potamitis
Department of Music Technology and Acoustics
Technological Educational Institute of Crete (TEI of Crete)
skouzo@staff.teicrete.gr , potamitis@staff.teicrete.gr

ABSTRACT

In this study we examine the characteristics of wingbeat waveforms from three mosquito species belonging to three different genera, namely Culex pipiens, Aedes aegypti and Anopheles arabiensis. The recordings were made by using a novel 2D optical sensor embedded inside insectary cages, avoiding this way the problems arising when microphones are used to capture the sound of flying insects. The potential of using two different methods (mainly harmonic analysis through averaging the power spectral density and the use of empirical mode decomposition), is examined in extracting useful information specific to each species. Preliminary results in using speech and music analysis methods in the classification of these species, are also presented.

Introduction

Mosquitoes infected with bacteria, viruses or parasites may transmit diseases to humans and livestock. Serious diseases and pathogens that can be transmitted by mosquitoes include: malaria, West Nile virus, Zika virus, chikungunya, yellow fever, dengue, lymphatic filariasis, and many forms of encephalitis. It has been reported that nearly 700 million people get a mosquito borne illness each year resulting in greater than one million deaths, [1]. Prevention of the vector borne diseases is best achieved by vector control which, today in Africa, relies on the use of insecticides. Surveillance and monitoring mosquito vector populations is an integral component of most vector control programs and a prerequisite for effective interventions. Public Health departments establish comprehensive surveillance and control programs based on mosquito traps. Due to the worldwide spread of invasive mosquitoes and mosquito-borne pathogens many surveillance programs have been applied that include a monitoring stage using trapping devices.

A major limitation of current surveillance and monitoring of mosquito vectors is the lack of an automated reporting service of the number and species composition of the captured insects.

Manual counting requires highly qualified personnel and is tedious as the pest manager must cover long distances since traps are dispersed at large spatial scale and located in not always easily reachable areas. Manual inspection of dispersed traps can increase the cost of the surveillance program or induce compromises in its design.

Microphones pick up sounds from every direction in an indiscriminate way and are not suitable for field applications. Optical sensors are a promising alternative technology to microphones or cameras. The optoelectronic settings used for data collection in this work are cheap compared to cameras and do not require flash light to be operated in low-visibility conditions. The device used for data collection in this study, is based on sensing the mosquito as it enters the field of view of the sensor, reporting only when the flow of light from emitter to receiver is perturbed. In [2-3] it is shown that recordings from a slightly different optoacoustic sensor, than the one used in this study, are directly related to the sound of the insect's beating wings when picked up by a microphone signal. The light fluctuations are normalized to audio levels and are treated exactly as microphone recordings. The qualitative characteristics of the recorded wingbeats are very high (i.e. SNR, duration, noise). In [2], we show that although the generative process of audio and optical recordings are completely different, their sound and their associated spectrum look quite similar. Quality microphone recordings are hard to obtain for insects performing a free flight. Indeed, most reported literature is based on measuring the wingbeat of one or few tethered specimens, [4]. Tethering is suspected to affect movement as it alters wing kinematics. Microphone recordings of wingbeat audio, stemming from non-tethered insects, can be acquired in the case of mosquitoes being enclosed in a spacy insectary box. In such a case, even a gun-shot small aperture microphone cannot avoid the background noise of a swarm of insects.

1. Recordings

The novel optoacoustic sensor is comprised of a light emitter that consists of a 2x4 LED infrared array operating at 940 nm and a receiver of light placed opposite to the infrared light emitter. The optoacoustic sensor is shown in Fig. 1.

The multiple LEDs solution forming a 2D array were chosen for two reasons: a) to ensure uniform light distribution across the entrance of the trap, b) to increase the field of view of the sensor as a single line of emitters will miss to illuminate insects flying on the border. The receiver is made of 20 photodiodes in a 2x10 arrangement and connected in parallel, thus forming a 2D light receiving surface. Details on the electronics' board used for 1D sensors can be found in [2-3]. The recordings are normalized in the range -1 to 1 in order to be treated as line-level audio signals (therefore the term optoacoustic). The sensors carry rechargeable batteries and because of their low power consumption they can record unattended for a number of days, or indefinitely by connecting the kit containing the battery to a charger.

Mosquitoes perform erratic movements during flight, they beat their wings at higher rates compared to other insects commonly encountered in domestic environments (e.g. flies, bees, hawkmoths) and are generally slower than these. Being slower and less direct in movement makes them ideal candidates for the proposed optoacoustic device as they spend enough time inside the field of view of the sensors and since they have a beating frequency of more than 300 Hz they leave ample trace of their locomotion. In the dataset examined here the problem of interferences (for example slow-varying illumination variations) in the low frequency region (below 250 Hz), remains. In this frequency region besides external interference in most cases high energy spectral content is present due to the main-body wambling movements of the mosquitoes. The sensor can also be used for measuring tethered insects, but was

mainly designed this way in order to be inserted at the entrance window of insectary cages containing flying insects of a single species. Insects incidentally cross the field of view of the sensor on a random basis and, therefore their wingbeat is recorded. Note that the optical nature of the sensor makes it immune to external sounds and to insects flying outside the field of view.



Fig. 1. A two-dimensional optoelectronic sensor for recording flying insects' wingbeat inside insectary cages. The receiving surface houses 20 photodiodes aligned as two linear layers of 10 diodes each. The emitter consists of 8 infrared LEDs. Dimensions of the rectangular passing through window, is 9 cm.

2. Mosquitoes

The experiments took place at the premises of Biogents in Regensburg Germany, in a mosquito breeding establishment at approximately 26-27 °C and 53-74% humidity for all experiments. Counting from the time of being able to fly all species were 3-10 days old. We placed 200-300 adult insects of both sexes strictly of a single species in cages and the recording of their wingbeat took place the moment they were passing through the rectangle of the sensors on a random basis.

The initial dataset used in this study consisted of 6648 recordings of *Culex pipiens*, 6439 recordings of *Aedes aegypti* and 108 recordings of *Anopheles arabiensis*. In what follows we will refer to these species, for short, as: *Culex*, *Aedes* and *Anopheles*, respectively. In this dataset we stretch that there was not any information about the sex of each species. Thus, every species recordings include male and female subjects. This fact, as we will be more evident below, makes the species discrimination more difficult.

3. Processing and Analysis of Measurements

For the tests in this study we mainly used a subset of the initial database consisting of 108 recordings from each species. In this subset, in every wav file we added two more channels; a 2nd channel containing a filtered version of the original and a 3rd channel holding a normalized to 95% of its maximum value replica of the filtered

waveform. The elliptic highpass filter was designed with: Stopband Frequency = 200 Hz, Passband Frequency = 250 Hz, Stopband Attenuation = 60 dB, Passband Ripple = 1 dB. That was done in order to remove low frequency contributions due to interferences and wobbling movements of the mosquitoes at the moment of passing through the detecting gate and to check if this filtering helps the peak detection procedure of their spectra.

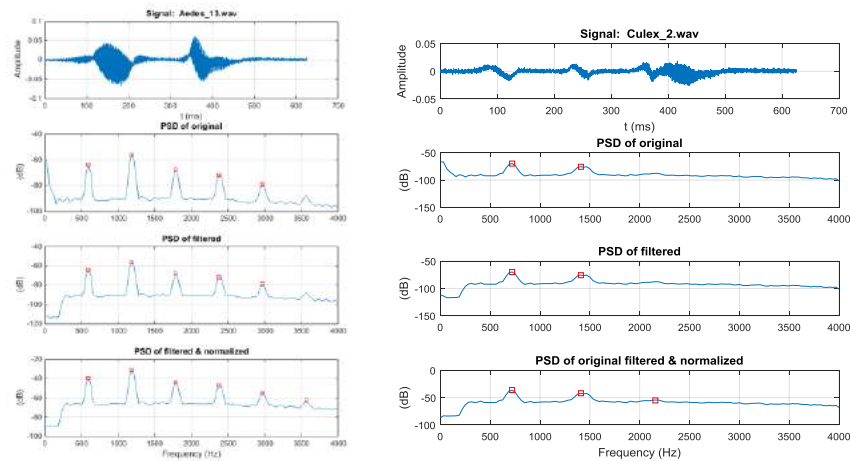


Fig. 2: A typical case of optoacoustic recording (left) with the PSD of the original, filtered and filtered/normalized waveform along with the results of peak detection. Only 2 peaks were detected in a more peculiar case (right).

A systematic, one by one, inspection of the average power spectral density (PSD) was carried out for all 3 species in order to establish the proper parameter values for the peak finding procedure. Welch's method was used for the power spectral density estimation with a 256 points FFT window and an overlap of 200 points. Looking to pinpoint the peaks by using the minimum peak height, the peak prominence, the minimum distance between the peaks and the maximum number of peaks, we noticed the following: With -80 dB for minimum peak height, 4 dB prominence and 130 Hz minimum distance between peaks, in all 3 species and in the great majority of the files, at least 4 peaks out of 6, were successfully selected in most cases. In every single case, the same peaks and the same total number of peaks was detected when the original or the filtered version of the original signal, was used. The normalized version of the filtered waveforms produced different results. This can be attributed to the varying energy of the different initial signals. All files have duration of 1 s (due to the automatic gating process). There might be cases where the insects can momentarily trigger the device in various ways, i.e. by either flying towards the detecting window, reaching it, but without passing through it and going out again, or by flying and then sit on the rim of the detecting window somewhere (and probably take off again). In these (and other possible) cases the files contain mostly noise and a small flying insect trace. Two realistic cases are shown in Fig. 2, where we can on the left see that 4 peaks are easily detected, while on the right only 2 peaks are detected.

With the above peak finding parameters prescribed, there was not any case where a peak was selected in the very low frequency region (even for the non-filtered waveforms). As mentioned, 4 peaks were selected in most cases. The PSD peaks appear well pronounced, even in cases where the file is not filled out with useful information, as seen in Fig. 2 (left). Recordings in which 2, 5 or 6 peaks were detected, were rare. With these in mind, we can use either the original recording or the filtered version, for extracting information concerning the PSD peaks in a classification process, because the relative energy is preserved among all files in the dataset in these two cases. A few more remarks are worth mentioning on the matter of using various possible extracted elements as features: For all three species 4 to 5 partials and in some cases 6 partials were easily distinguishable especially when the recorded file had captured an uninterrupted insect flight. The frequency of the fundamental, for all species, was never below 500 Hz. While it would initially seem important to consider the absolute amplitudes of the partials in a possible classification scheme, we promote as more meaningful the frequency values of the peaks. This is because the overall strength of the harmonics may vary, as it depends on the orientation of the insect with respect to the detecting array, as well as the exact trace taken while flying inside the detecting area. Furthermore the complexity of the insect's wing movements can affect the relative strengths of the partials. These facts may affect the absolute and relative strengths of the harmonics and we claim that their values might not be indicative of each species, as much as their frequency footprints. On the other hand, as it is known from other studies, the frequency wingbeat characteristics of female compared to male mosquitos of the same species, have lower frequencies because females are more voluminous than males. This fact makes the discrimination task more difficult. Nevertheless, in order to clarify these issues more research should be conducted on this subject, by designing specific experiments with tethered insects.

In an effort to better understand the wingbeat functioning and to find other ways to extract useful parameters with possible use in a classification procedure, we also applied the empirical mode decomposition analysis method. This is a time domain method and it is appropriate for analyzing non stationary signals, [4]. It has been through various modifications such as using noise to assist the process and recently adaptive noise came into play, [5]. The whole method cannot be described in detail here, but the main idea is that it decomposes a signal into intrinsic mode functions (IMFs) or modes, from which instantaneous frequencies (IF) can be found and a Hilbert-Huang spectrum can be constructed, providing hopefully, new insights.

In applying this method to several wingbeat recordings 11 to 12 IMFs were derived in most of the cases. The information that we are primarily interested in, is contained in the first four IMFs. Mode order from low to high, contain the high to low frequencies. In some cases an IMF might be monochromatic as it is revealed from its PSD spectrum and its oscillogram, but a phenomenon known as mode mixing might also be present (see Fig. 4). The smoothed instantaneous frequency (IF) traces for the two modes are shown at the lowest part of Fig. 4 (see their relation with the initial oscillograms). Note the abrupt frequency changes as time advances particularly for mode 2. While this can be attributed to the complicated insect wing movement, it is undoubtedly a weakness of this method to distinctively break down the various modes. Nevertheless, a peak detection process similar to the previous

one, can be implemented quite successfully here, as well, using each mode's PSD estimate, depicted in the figure. Here, by looking at the PSD of each mode we notice that the peaks appear more prominent than in many previous cases. The peak frequencies may appear in 2 or 3 IMFs with the same numeric values (in Hz), although they were also cases where the peak frequency values, in different IMFs, were off by the equivalent of one bin. In these cases the average numeric value across two or three modes can be attributed to a certain peak.

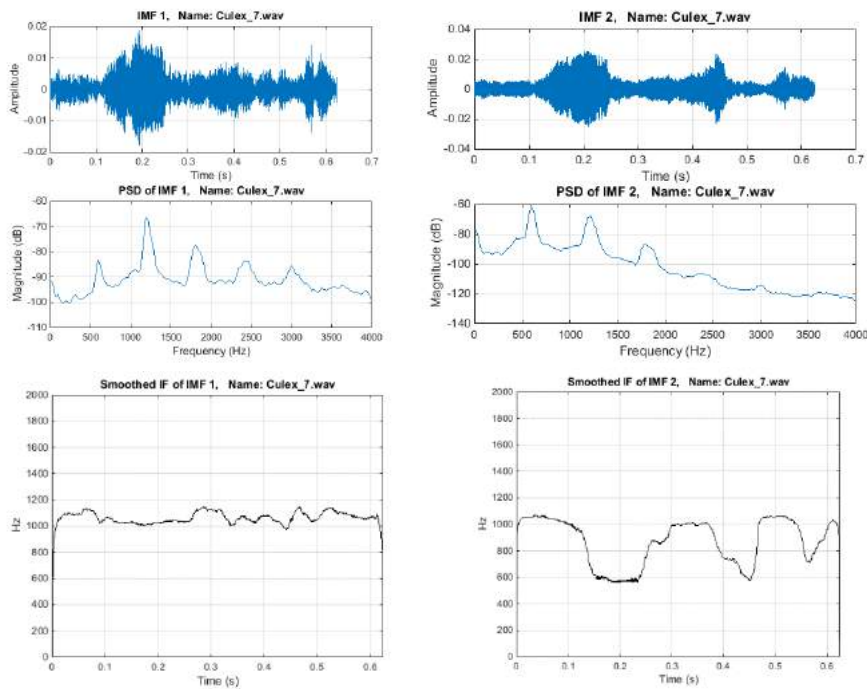


Fig. 4: Oscillograms of the first 2 modes (IMFs) from a *Culex* recording, their PSDs and their respective smoothed instantaneous frequency traces.

4. Preliminary classification experiments

Following the audio analysis methods of speech and music a preliminary investigation was undertaken concerning the classification of the three species, [7]. Since all files were approximately 1 s in duration a short term window of 0.02 s with a step of 0.01 s was selected. Although several statistical indicators, obtained through averaging were tried, we ended up in using only the mean value and the standard deviation for each feature. The effectiveness of using various time and frequency domain features was also examined. From the first 13 mel-frequency cepstrum coefficients (MFCCs) that are usually selected, coefficients 5 to 12 were proven more efficient. Other features considered were: Spectral centroid and spectral spread, spectral entropy, spectral rolloff as well zero crossing rate, energy and harmonic ratio. Although some of them did not seem to have great potential to be used as discriminators among the classes, they were finally included. The same

stands for most of the chroma vectors. In total 30 features were used and two or six statistics were tried. Two experiments were run by training k-NN classifiers using two datasets consisting of A) 108 optoacoustic recordings from each of the three mosquito species and B) 1000 optoacoustic recordings from *Culex* and *Aedes* species and 108 from the *Anopheles* species.

In the validation stage the leave-one-out cross-validation method, that produces reliable results, [7] was used, resulting (for the case A above), in an overall accuracy of 0.88, for k=8 as shown in Fig. [5]. Other indicators for the three species *Culex*, *Aedes* and *Anopheles* were, respectively: Precision = 0.795, 0.926, 0.944, Recall = 0.941, 0.735, 0.964 and F1 score = 0.862, 0.820, 0.954. The confusion matrix for row wise normalization is shown in Table 4.1.

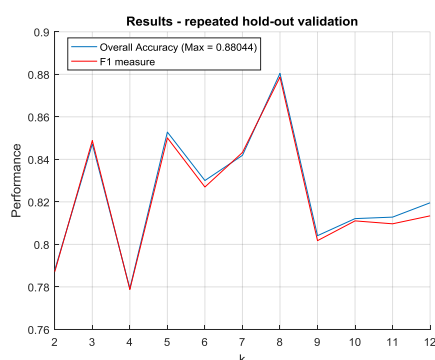


Fig. 5: Performance of the k-NN classifier for different values of the k parameter on the 3 insect classification task.

Table 4.1: The confusion matrix for row wise normalization.

Culex	Aedes	Anoph
0.9412	0.0588	0
0.2075	0.7358	0.0566
0.0357	0	0.9643

5. Concluding remarks

In this study we show that the novel and practical optoacoustic sensor (that was briefly described), while ideal for recording free flight mosquitoes, can reveal many particularities of insect wingbeat functioning, by using basic and more trendy spectral analysis methods. More research is needed, in order to get more insights in this functioning and more experimentation is also necessary on the extraction of proper descriptors in order to improve the classification results. Several practical applications could arise from these analyses, some of which are: optical detectors to alert for the presence of potentially dangerous mosquito species in sensitive domestic environments (hospitals, elderly nurseries), as well as specially designed mosquito traps that report counts and species composition of trapped adults.

6. Acknowledgements

This research is funded from EU HORIZON 2020 fast track to innovation, project No. 691131, REMOSIS.

7. References

[1] Caraballo, H. (2014). “Emergency Department Management of Mosquito-Borne Illness: Malaria, Dengue, and West Nile Virus”. *Emergency Medicine Practice* 16 (5).

[2] Potamitis, I. Rigakis, I. “Novel Noise-Robust Optoacoustic Sensors to Identify Insects Through Wingbeats”. *IEEE Sensors Journal*, vol.15, no.8, pp. 4621-4631, Aug. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2424924

[3] Potamitis, I. Rigakis, I, Fysarakis K. “Insect Biometrics: Optoacoustic signal processing and its applications to remote monitoring of insect traps of the McPhail type”, *PLoS ONE*, 2015.

[4] Sueur J., Tuck E., Robert D., Sound radiation around a flying fly. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118 (1), 2005.

[5] N.E. Huang et al., “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 454, pp. 903–995, 1998.

[6] Torres M.E., Colominas M.A., Schlotthauer G., Flandrin P. “A Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise”. *Proc. 36th Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP 2011*.

[7] T. Giannakopoulos and A. Pikrakis, “*Introduction to audio analysis: A MATLAB approach*”, Academic Press, 1st Edition, 2014.

Συνεδρία A3: Ηχοτοπία (I)

Παραγωγή χώρου και ατμόσφαιρας από λογισμικά σύνθεσης ήχου από εικόνα

Βασιλική Φαρμάκη

Απόφοιτος Τμήματος Αρχιτεκτόνων
Μηχανικών Α.Π.Θ,
/ Λάρισα, Ελλάδα

vasso.fa@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα ασχολείται με τις "ατμόσφαιρες" και τα ηχοτοπία που παράγονται από κάποια προγράμματα και εφαρμογές που "μεταφράζουν" την εικόνα σε ήχο, συγκεκριμένα παρουσιάζεται και ερμηνεύεται η διαδικασία παραγωγής "ατμοσφαιρών". Κατά τη διάρκεια της έρευνας συλλέχθηκαν εφαρμογές και λογισμικά που ασχολούνται με τη δημιουργία ηχοτοπιών και τη σύνδεση της εικόνας - δισδιάστατης είτε τρισδιάστατης- με τον ήχο. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετώνται και παρατηρούνται κάποια από τα παραπάνω αναφερθέντα λογισμικά. Διάφορες κατηγορίες προέκυψαν με βάση τον τρόπο που κάθε πρόγραμμα χειρίζεται την εικόνα που του εισάγεται, τον ήχο που παράγεται, τη χρησιμότητα και το στόχο κάθε προγράμματος, τη φύση του λογισμικού και άλλους παράγοντες. Από κάθε κατηγορία επιλέχθηκαν κάποια λογισμικά που κρίθηκαν πιο πλήρη, ως προς την πληροφορία που παρείχαν, και αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας τους, για να εξετασθούν εις βάθος.

Generation of space and atmosphere via software tools that synthesize sound based on images

ABSTRACT

This research explores the generation of "atmospheres" and soundscapes synthesised through certain computer programs and applications that "translate" images into sounds; specifically the processes behind producing "atmospheres" are presented and interpreted. In the context of this research, computer software and applications that create soundscapes through translating images (2D or 3D) into sounds were collected and analysed. A categorisation of computer programs is proposed based on the way that each program manipulates the imported image and expresses the produced sounds, while the usefulness and purpose of each program is also examined, among other factors. From each category the software programs

that are were considered as most complete, with regards to the information provided to the user, were selected as representative programs of their class, in order to be examined in further depth.

Εισαγωγή

Στις μέρες μας ο ψηφιακός κόσμος εισβάλλει όλο και περισσότερο στον φυσικό. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών κόσμων οδηγεί στον επαναπροσδιορισμό της έννοιας του χώρου. Αναπόσπαστο κομμάτι κάθε χώρου είναι η ατμόσφαιρα με τα ηχοτοπία της. Σε αυτή την προσέγγιση ως ατμόσφαιρα ορίζεται μία δυναμική ποιότητα του χώρου που εμπεριέχει πληροφορίες και προβάλλει εμπειρίες και συναισθήματα.

Εδώ και κάποια χρόνια ξεκίνησαν να αναπτύσσονται λογισμικά, προγράμματα και εφαρμογές που ασχολούνται και πειραματίζονται με την δημιουργία ήχου και ηχητικής ατμόσφαιρας από εικόνα, δημιουργώντας έναν διάλογο μεταξύ των αισθήσεων της όρασης και της ακοής και προσπαθώντας να βρουν τις πιθανές σχέσεις και συνδέσεις ανάμεσα στα χαρακτηριστικά τους.

Στην παρούσα έρευνα μελετώνται και παρατηρούνται τέτοιου είδους λογισμικά. Μέσα από την ανάλυση και την κατηγοριοποίηση των διάφορων μεταβλητών τους εξερευνάται ποιές και τι σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ της εικόνας και του ήχου.

1. Κριτήρια και κατηγοριοποίηση

Πάνω από διακόσες εφαρμογές και λογισμικά που ασχολούνται με τη σύνθεση ήχου και ηχοτοπίου χρησιμοποιώντας ως εργαλείο την εικόνα συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της έρευνας. Μια σειρά από κατηγορίες προέκυψαν μέσα από την ανάλυση κάθε λογισμικού. Αυτή η ανάλυση συμπεριλάμβανε χαρακτηριστικά της εφαρμογής σε σχέση με το πώς χειρίζεται στοιχεία της εικόνας, του ήχου, του χώρου και του χρόνου καθώς και ποιά παρουσιάζεται να είναι η χρήση και η αξιοποίηση του λογισμικού. Κάποιο πρόγραμμα/λογισμικό θα μπορούσε να ανήκει σε πάνω από μία από τις παρακάτω κατηγορίες. Ωστόσο τα ισχυρά του στοιχεία το εντάσσουν πρωταρχικά σε μία από αυτές. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κριτήρια και οι κατηγορίες:

1.1 Εικονική μορφή

Με κριτήριο την "εικονική" μορφή ο διαχωρισμός γίνεται κατά κύριο λόγο βασισμένος στο πώς χειρίζεται το λογισμικό την έννοια της εικόνας. Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να τονιστεί πως στην παρούσα έρευνα δεν θα μας απασχολήσει η όποια σύνδεση μπορεί να γίνεται με το χρώμα, αρκεί απλά να αναφερθεί αν υπάρχει κάποια σύνδεση. Το κύριο κριτήριο της έρευνας είναι η μορφή. Έτσι προέκυψαν οι παρακάτω κατηγορίες:

σχέδιο/ σκίτσο/ γραμμές/ σχήματα: η εικόνα αποτελεί σκίτσο ή ένα σχέδιο, μία γεωμετρικό σύμπλεγμα που χειρίζεται γραμμές και σχήματα.

_ζωγραφιά/ τεθλασμένη/ κίνηση/ συνδυασμοί/ άλλο: η εικόνα παρουσιάζεται με έναν συνδυαστικό τρόπο μορφών που συμπεριλαμβάνει μή γεωμετρικό τρόπο απεικόνισης.

_πόλοι/ κόμβοι: παρουσιάζεται η εικόνα ενός σχεδίου που παραπέμπει σε δίκτυα.

_κελιά/ κουτάκια: η εικόνα είναι ένα σχέδιο από pixel

_εικόνα/ φωτογραφία: το λογισμικό χειρίζεται φωτογραφικές εικόνες

_κινούμενη κάμερα: το λογισμικό χειρίζεται εικόνα που προέρχεται από κινούμενη κάμερα ή βίντεο

_spectogram/ somogram: η εικόνα λειτουργεί ως κάποιου είδους γράφημα του παραγόμενου ήχου.

_διάφορα: εδώ εντάσσονται και εικονικές μορφές που δεν μπορούν να συμπεριληφθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες ή λειτουργούν με έναν συνδυαστικό τρόπο σε σχέση με αυτές.

1.2 Μουσική μορφή

Το κριτήριο σε αυτή την περίπτωση έχει να κάνει με τον μουσικό ρόλο που αποκτούν τα συγκεκριμένα λογισμικά:

_synth/ instrument (μουσικό όργανο): η εφαρμογή αποτελεί μια εναλλακτική μορφή ενός υπάρχοντος μουσικού οργάνου το οποίο χρησιμοποιεί την εικόνα ως επικοινωνιακό μέσο και εργαλείο σύνθεσης.

_συχρότητες: ο ήχος εμφανίζεται ως σύνολο/φάσμα συχνοτήτων που αξιοποιεί την εικόνα ή την κίνηση για να εκφραστεί και να δημιουργήσει σύνθεση.

1.3 Χρήση και αξιοποίηση

Κάθε λογισμικό έχει αναλάβει διάφορους ρόλους και αξιοποιείται με διαφορετικούς τρόπους αποκτώντας χρήση και καθιστώντας τον εαυτό του χρήσιμο σε κάποιους κλάδους/ενότητες. Με βάση αυτό το κριτήριο δημιουργήθηκαν οι παρακάτω κατηγορίες:

_παιχνίδια (gaming): η μετάφραση της εικόνας σε ήχο είναι μέρος ενός παιχνιδιού ή αποτελεί η ίδια αυτούσιο παιχνίδι.

_μουσική: η μετάφραση της εικόνας σε ήχο έχει αξιοποιηθεί στη δημιουργία συγκεκριμένης μουσικής σύνθεσης (κομματιού) ως μέρος αυτής ή σχετίζεται με το βίντεο κλιπ αυτής.

_τέχνες/ έκθεση/ installation/ performance: η εφαρμογή λειτουργεί ή έχει υπάρξει μέρος κάποιας εγκατάστασης ή κάποιου εκθέματος, ή αποτελεί η ίδια το έκθεμα.

_έρευνα/ εκπαίδευση: η εφαρμογή αποτελεί μέρος κάποιας έρευνας ή εκπαιδευτικό εργαλείο.

_προγραμματισμός: το λογισμικό βασίζεται στη δημιουργία-προγραμματισμό των σχέσεων μεταξύ εικονικών και ηχητικών στοιχείων. Ο χρήστης μπορεί άλλες φορές να επαναπροσδιορίσει αυτές τις σχέσεις με τα εργαλεία που του δίνονται είτε σε άλλες περιπτώσεις να χειριστεί τις αλλαγές μέσα από τις τιμές κάποιων μεταβλητών.

_sound analysis/ ανάλυση ήχου: το λογισμικό λειτουργεί ως μέρος μιας διαδικασίας ανάλυσης του ήχου

_music production/ sound design: το λογισμικό λειτουργεί ως εργαλείο ή ως μορφή προγράμματος μουσικής παραγωγής.

_άλλες χρήσεις: το λογισμικό έχει αναλάβει κάποιο πολύ συγκεκριμένο ρόλο και αξιοποιεί την εικόνα για την παραγωγή των αναγκαίων παραγόμενων ήχων (π.χ. circle for i phone- ρολόι). Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται χρήσεις που δεν ανήκουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Τέλος, μία ακόμα κατηγορία, λίγο διαφορετική από της άλλες, θα προστεθεί εδώ που δείχνει μία δυνατότητα δημιουργίας ηχοτοπίου μέσα από τον χειρισμό της εικόνας.

_χωρίς ήχο/ δυναμικά αξιοποιήσιμη σύνδεση εικόνας ήχου: λογισμικά που δύνανται να αποκτήσουν μια σύνδεση των εικονικών τους στοιχείων με ηχητικά.

2. Σχέσεις στους δύο άξονες

Αν προσπαθήσει κανείς να παρατηρήσει τις σχέσεις που δημιουργούνται μεταξύ των εικονικών και των ηχητικών στοιχείων στους δύο άξονες στα διάφορα λογισμικά θα εντοπίσει μία ποικιλία εκδοχών. Πολλές φορές οι σχέσεις αυτές δεν είναι καν τόσο εύκολα προσδιορίσιμες με αυτόν τον τρόπο καθώς επικεντρώνονται και εισάγονται στα διάφορα σχεδιαστικά στοιχεία. Άλλες φορές πάλι μεταβάλλονται ή προγραμματίζονται επί τόπου από τον ίδιο τον χρήστη. Παρακάτω αναφέρονται οι συνδέσεις που εμφανίζονται στο επίπεδο των δύο αξόνων:

συχνότητα/τόνος - ένταση
τόνος - οκτάβα
τόνος - τόνος
συχνότητα/τόνος - χρόνος/ρυθμός
χροιά - χρόνος/ρυθμός

3. Ηχητικές ατμόσφαιρες

Βασική λειτουργία των εξεταζόμενων λογισμικών είναι η παραγωγή ηχητικών ατμοσφαιρών. Οι μορφές στις οποίες συναντώνται αυτές εξαρτώνται από τόσο από τον τρόπο που παράγεται ο ήχος όσο και από τα χαρακτηριστικά του. Στην παρούσα έρευνα επικράτησαν οι παρακάτω ηχητικές ατμόσφαιρες:

ambient: είναι συνήθως αποτέλεσμα λογισμικών που ανήκουν στην κατηγορία του προγραμματισμού (βλ. ενότητα 1.3). Μέσα από την διαχείριση των σχέσεων εικόνας και ήχου παράγεται μία ατμοσφαιρική σύνθεση.

ηχοτοπίο (ηλεκτρονικό ή και με φυσικούς ήχους): η εικόνα αντιστοιχεί σε ηχητικά γεγονότα φυσικά (μέσω ηχογράφησης) ή σε τεχνητούς-ηλεκτρονικούς ήχους. Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει εξαρτάται από τη μορφή της εικόνας και τις σχέσεις που έχουν οριστεί ανάλογα με το κάθε λογισμικό.

μουσική: παραγωγή μουσικής σύνθεσης. Οι χροιές μπορεί να είναι τόσο ηλεκτρονικές όσο και ήχοι μουσικών οργάνων. Οι συνθέσεις μπορεί να είναι

μελωδικές ή και ρυθμικές. Ο χρήστης χειρίζεται χαρακτηριστικά της μουσικής όπως οι τόνοι, οι αρμονίες, κλίμακες, ρυθμός μέσα από ένα εικονικό περιβάλλον για να συνθέσει μελωδίες ή ρυθμικά μοτίβα.

Theremin: ένα ηλεκτρονικό μουσικό όργανο που εφευρέθηκε το 1920, παίζεται από απόσταση αφήνοντας τον ερμηνευτή να χρησιμοποιήσει τον χώρο κάνοντας το παίξιμο να μοιάζει με "εναέρια γλυπτική". Η ατμόσφαιρα που δημιουργεί είναι ιδιαίτερη. Πολλές από τις εφαρμογές που το χρησιμοποιούν, αξιοποιούν επίσης το χώρο με την μετα-κίνηση και κάμψη της συσκευής.

συχνότητες: το αποτέλεσμα προέρχεται από αντιστοίχιση κίνησης ή εικόνας πάνω σε ορισμένο φάσμα συχνοτήτων.

θόρυβος: το αποτέλεσμα μπορεί να αποτελέσει θόρυβο ανάλογα με τις συχνότητες, τις τιμές των μεταβλητών που επιλέχθηκαν και την εικόνα που "μεταφράστηκε".

4. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας και μελέτης προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

_Τα λογισμικά που σχεδιάστηκαν για να παράγουν ηχητικές ατμόσφαιρες μέσα από τη μετάφραση εικόνας σε ήχο ποικίλουν.

_Οι μορφές της εικόνας που συναντάει κανείς σε τέτοιου τύπου λογισμικά διαφέρουν. Κάποιες φορές εισάγεται η τρίτη διάσταση ενώ κάποιες άλλες αξιοποιείται και η κίνηση στο επίπεδο ή στο χώρο.

_Τέτοιου είδους λογισμικά εμφανίζονται σε διάφορους κλάδους, κυρίως των τεχνών και της ψυχαγωγίας, ενώ κάποια από αυτά συναντώνται ως πειραματικά, ερευνητικά και εκπαιδευτικά εργαλεία. Αν και αυτά είναι μικρά σε αριθμό η αξιοποίησή τους και τα πορίσματά τους θα μπορούσαν να συμβάλουν στην συνεργασία με άλλα επιστημονικά παιδιά και τομείς όπως είναι η ιατρική, η διδακτική, η ψυχολογία κ.ά.

_Παρά την ποικιλία των εφαρμογών δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη μέθοδος ή θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται η αντιστοίχιση των ηχητικών με τα εικονικά στοιχεία. Η έρευνα πάνω σε τέτοιου είδους εφαρμογές έχει ακόμα μεγάλα περιθώρια ανάπτυξης.

_Η ένταξη του χώρου και της τρίτης διάστασης στην σύνδεση της εικόνας με τον ήχο συναντάται μόνο σε πολύ μεμονωμένες περιπτώσεις μέχρι τώρα.

_Ο φυσικός χώρος παραμένει ασύνδετος με τις ηχητικές ατμόσφαιρες που παράγονται, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων.

5. Αναφορές

_Belgiojoso R. "Constructing Urban Space with Sounds and Music", Ashgate Publishing,(2014)

_Caleb K., "SOUND. Documents of Contemporary Art", Whitechapel Gallery, The MIT Press, London, (2011)

_Collopy, F., Fuhrer, R., & Jameson, D. (1999). Visual music in a visual programming language. In: IEEE Symposium on Visual Languages. Tokyo, Japan, pp.111-118

_Drossos K., Zormpas N., Giannakopoulos G., Floros A." Accessible Games for Blind Children, Empowered by Binaural Sound", PETRA'15 Proceedings of the 8th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, ACM, New York, Article No.5, (2015)

_Filimowicz M., "Aesthetic challenges of sonified video gestures", Empirical Musicology Review, Vol.8, p.84-87, No.2, (2013)

_Filimowicz M., "The audio affect image: Five hermeneutic modalities of sound design", The Soundtrack, Intellect Ltd, Volume 5, Number 1(2012)

_Francis D.K. Ching "Architecture Form, Space & Order", John Wiley & Sons. 3rd ed. (2007)

_Richard E. Cytowic, M.D. "Synesthesia. A Union of the Senses", A Brandford Book, The MIT Press, 2nd edition, (2002)

_Sexton J. "Music, Sound and Multimedia, From Live the Live to the Visual", Music & the Moving Image Series, Edinburg University Press, (2007)

LINKS

<http://www.creativeapplications.net/>

<http://www.emusician.com/>

<http://electro-music.com/>

<http://www.musicalandroid.com/>

<https://play.google.com/store/apps>

<http://www.apple.com/itunes/charts/free-apps/>

Ο ήχος της πόλης: Η ατμόσφαιρα ενός περιπάτου (city grooves)

Βασιλική Φαρμάκη

Απόφοιτος Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Α.Π.Θ,
/ Λάρισα, Ελλάδα

vasso.fa@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία περιγράφεται, σε θεωρητικό επίπεδο, η ανάπτυξη μιας εφαρμογής η οποία αντλεί πληροφορίες και δεδομένα από χαρτογραφικές αναλύσεις και σε συνδυασμό με μεταβλητές που καθορίζονται από τον χρήστη παράγει ηχητικές συνθέσεις για μία προκαθορισμένη ή σε πραγματικό χρόνο διαδρομή περιπάτου.

Αρχικά εξετάζονται τα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός τόπου καθώς και ηχητικά στοιχεία που μπορούν να απαρτίσουν μία σύνθεση. Στην πορεία γίνεται η σύνδεση των μορφολογικών παραμέτρων και ηχητικών μεταβλητών και οργανώνεται ένα λογισμικό μέσα από το οποίο μορφολογικά (ποιοτικά και ποσοτικά) χαρακτηριστικά ενός αστικού χώρου μεταφράζονται σε ηχητικά δεδομένα. Από τη μετάφραση επιδιώκεται να προκύψουν ηχητικές συνθέσεις μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας με στόχο την αφύπνιση των αισθήσεων του περιπατητή. Η σχεδιαζόμενη εφαρμογή θα αποτελεί μία προσιτή στο κοινό άτυπη μορφή χαρτογράφησης.

The sound of a city: the ambience of a rout (city grooves)

ABSTRACT

This project describes the development of audio-generating spatial software, from a theoretic perspective. This software draws information from cartographic analysis, and in combination with user-defined variables (such as genre, mood, feelings, etc.), produces audio compositions and soundscapes for a predetermined or real-time walk route.

Initially, an investigation is presented, focusing on the morphological features of place, as well as audio elements, which can constitute an audio composition. Following that, a link is formed between morphological parameters and audio variables, and an overview of the software is presented, which enables the translation of urban morphological elements (both qualitative and quantitative) into audio data. This translation aims for the emergence of audio compositions through an automated process, with the end goal being a sensory stimulation for the wanderer. This software will thus offer an informal cartographic approach, easily accessible to the public at-large.

Εισαγωγή

Η επιθυμία του ανθρώπου να χρησιμοποιήσει συνδυαστικά τις αισθήσεις του επιδιώκοντας την εμπλουτισμένη εμπειρία ενός τόπου μπορεί να ικανοποιηθεί όλο και ευκολότερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας στις μέρες μας. Η παρούσα έρευνα ασχολείται με τη δημιουργία εμπλουτισμένων ηχητικών ατμοσφαιρών με ψηφιακά μέσα. Σε αυτό το σημείο ως "ατμόσφαιρα" ορίζεται μία δυναμική ποιότητα ενός πραγματικού ή πλασματικού χώρου που εμπεριέχει πληροφορίες και προβάλλει εμπειρίες και συναισθήματα, μία άυλη προβολή ενός τόπου.

Στα πλαίσια της έρευνας προτείνεται και μελετάται η δομή ενός λογισμικού το οποίο εντοπίζει αστικά μορφολογικά χαρακτηριστικά πάνω σε μία προκαθορισμένη ή σε πραγματικό χρόνο διαδρομή περιπάτου και με βάση αυτά να παράγει ηχητικές συνθέσεις. Η εφαρμογή χρησιμοποιώντας εξίσου την ψηφιακή τεχνολογία και τον φυσικό χώρο δημιουργεί έναν αισθητηριακό χώρο. Οι ηχητικές συνθέσεις που παράγονται λειτουργούν ως "αφηγήσεις" που φανερώνουν στοιχεία από "ατμόσφαιρες" ξεχασμένες στο χρόνο και από τον τόπο, θολωμένες από τις άλλες αισθήσεις.

1. Μορφολογικά χαρακτηριστικά αστικού χώρου

1.1 Αστική μορφολογία

Η αστική μορφολογία συνδέει τη γεωγραφία, την ιστορία, την αρχαιολογία, την αρχιτεκτονική, και τον σχεδιασμό για να επικεντρωθεί στη δόμηση της πόλης. Προσεγγίζει την πόλη ως έναν οργανισμό, όπου ο φυσικός κόσμος είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τις διαδικασίες αλλαγής του, ενώ επικεντρώνεται στον φυσικό κόσμο ως το αποτέλεσμα δυναμικών κοινωνικών και οικονομικών δυνάμεων.

1.1.1. Αρχές της αστικής μορφολογίας

Η μορφολογική ανάλυση βασίζεται σε τρία θεμελιώδη συνθετικά στοιχεία: *μορφή, ανάλυση και χρόνος*

Μορφή: η αστική μορφή ορίζεται από 1_τα κτίρια και τους συσχετιζόμενους υπαίθριους χώρους, 2_τα οικοδομικά τετράγωνα ή τμήματα αυτών, και 3_τους δρόμους.

Ανάλυση(resolution): η αστική μορφή μπορεί να αναγνωστεί σε τέσσερα επίπεδα ανάλυσης, που αντιστοιχούν 1_στο κτήριο/ οικόπεδο, 2_στο δρόμο/ οικοδομικό τετράγωνο, 3_στην πόλη, και 4_στην περιφέρεια (region)

Χρόνος: η αστική μορφή μπορεί να γίνει κατανοητή μόνον ιστορικά καθώς τα στοιχεία που την αποτελούν υποβάλλονται σε συνεχείς .

1.1.2. Αστικά "κελύφη"

Το μικρότερο κέλυφος μιας πόλης αναγνωρίζεται ως ο συνδυασμός 1_των μεμονωμένων τμημάτων γης και 2_των κτιρίων και ελεύθερων χώρων της. Τα χαρακτηριστικά αυτών των κελυφών καθορίζουν το σχήμα και την πυκνότητα της αστικής μορφής, καθώς και τις υπάρχουσες και δυνατές χρήσεις στη διάρκεια του χρόνου.

Οι ποιότητες του κελύφους αντανακλούν τόσο μια ιστορική χρονική περίοδο όσο και την κοινωνικοοικονομική κατάσταση που ίσχυε τη στιγμή της δόμησης. Με τον καιρό αυτά τα στοιχεία υπόκεινται με φυσικό μετασχηματισμό, εξαλείφονται ή αντικαθίστανται από νέες μορφές.

1.1.3. Σχεδιαστικές μονάδες

Οι σχεδιαστικές μονάδες είναι κτιριακά σύνολα, ελεύθεροι χώροι, τμήματα οικοπέδων και οδοί, τα οποία σχηματίζουν ένα ενιαίο όλο είτε επειδή κτίστηκαν είτε την ίδια περίοδο είτε με κοινούς περιορισμούς ή επειδή υποβλήθηκαν σε μια κοινή διαδικασία μετασχηματισμού.

1.2 Ποιότητες και χαρακτηριστικά αστικής μορφολογίας (ποιοτικά και ποσοτικά)

Από ποικίλες βιβλιογραφίες μπορεί κανείς να εντοπίσει ομάδες χαρακτηριστικών που παίζουν κρίσιμο ρόλο στον αστικό σχεδιασμό, τα οποία αφορούν το κτήριο, το χώρο και τη χρήση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από αυτά.

Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά αστικής μορφολογίας

	ΚΤΙΡΙΟ	ΧΩΡΟΣ (ΟΙΚΟΠΕΔΟ-ΠΕΡΙΟΧΗ)	ΧΡΗΣΗ	ΡΥΘΜΟΣ
ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	παισιότητα: έτος δόμησης	Κενό-πλήρες/ δομημένο- αδόμητο	χρήση	
	στυλ: τυπολογία/ μορφολογία		ώρες λειτουργίας	
			πεζός- αυτοκίνητο- ιεράρχηση οδικού δικτύου	
			δημόσιο- ιδιωτικό	
			πράσινο πλατεία αστική επίπλωση φως	
ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	συντελεστής/ποσοστό δόμησης	Πυκνότητα	ποσοστό χρήσης	
	εμβαδό βάσης (εμβαδό/ επιφάνεια ισογείου)	Πλάτος δρόμου		
	εμβαδό ακαλύπτου	Πλάτος πεζοδρομίου	ποσοστό εγκατάλειψης	
	όροφοι ύψη			

ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ				κορυφογραμμή: ύψος, πλάτος
				δώμα-στέγη
				όψη: ανοίγματα
ΤΥΠΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ				Είσοδοι
				Στοές
				κλιμακοστάσια/ κατακόρυφη επικοινωνία
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	κόστος			

2 Ηχητικά χαρακτηριστικά

Τα χαρακτηριστικά του ήχου και τις μορφές του θα μπορούσαμε να τα εντάξουμε σε διάφορες κατηγορίες:

Αντικειμενικά και Υποκειμενικά χαρακτηριστικά: Ανάλογα αν ανιχνεύονται από επιστημονικά όργανα ή βάσει του τρόπου που αντιλαμβανόμαστε τον ήχο.

Απλοί και σύνθετοι ήχοι: Αφορά το είδος του ήχου

Φυσικοί και Τεχνητοί: ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στο μέσο που δημιουργεί τον ήχο. Εξαρτάται από το αν ο ήχος παράγεται από φυσικό μέσο (άνθρωπο, ζώο, φυσικό φαινόμενο κλπ.) ή το δημιουργεί ο άνθρωπος με τεχνητά μέσα

Ακουστικές κωδικοποιήσεις: Αφορά τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να εκφραστεί ένας ήχος, τη μορφή με την οποία παρουσιάζεται.

Ρεαλιστικοί και Αφηρημένοι: Σχετίζεται με την αμεσότητα με την οποία ένας ήχος μπορεί να μεταδώσει πληροφορία. Ο διαχωρισμός αυτός αφορά τη χρήση του ήχου στην χαρτογραφία.

Πίνακας 2.0 Κατηγοριοποιήσεις του ήχου

Αντικειμενικά χαρακτηριστικά	ένταση, συχνότητα, φασματικό περιεχόμενο	Ακουστικότητα, ύψος, χροιά ή ηχόχρωμα	Υποκειμενικά χαρακτηριστικά
Απλοί ήχοι	τόνοι	φθόγγοι, θόρυβοι, κρότοι	Σύνθετοι ήχοι
Φυσικοί ήχοι	χρήση φυσικών πηγών	χρήση τεχνητών μέσων	Τεχνητοί ήχοι
Ρεαλιστικοί ήχοι (χαρτογραφία)	Άμεση μετάδοση πληροφορίας χωρίς τη χρήση υπομνήματος. (φωνητική αφήγηση, ηχητικά γεγονότα)	Μετάδοση δεδομένων σε συνδυασμό με οπτικές πληροφορίες. (χρήση	Αφηρημένοι ήχοι (χαρτογραφία)

		συνισταμένων του ήχου σαν ακουστικές μεταβλητές)
Ακουστικές κωδικοποιήσεις	Ομιλία, μουσική, ηχητικά γεγονότα	

Επιπρόσθετα ο ήχος διαμορφώνεται βάσει των ηχητικών παραμορφώσεων και των φαινομένων που παρουσιάζονται.

Σε πιο πρόσφατες μελέτες μπορεί κανείς να βρει υποκατηγοριοποιήσεις τόσο των χαρακτηριστικών του ήχου όσο και της μουσικής και του ρυθμού.

3 Γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS)

3.1 Αστική μορφολογία και GIS

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographical Information System/ GIS) μπορούν να καταγράψουν τα χωρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και να τα συνδέσουν με ποσοτικά δεδομένα. Έτσι ο φυσικός χώρος μπορεί να μετρηθεί και να αναλυθεί σε σχέση με κοινωνικοοικονομικές δυνάμεις που τον διαμορφώνουν. Το GIS προσφέρει τα εμπειρικά δεδομένα που χρειάζονται όσοι ασχολούνται με την αστική μορφολογία. Αυτές οι κωδικοποιημένες βάσεις δεδομένων επιτρέπουν τη μελέτη της εξέλιξης μεγάλων αστικών περιοχών.

3.2 Χρήση του ήχου στη χαρτογραφία

Αν και ο ήχος συνδέεται άρρηκτα με το χώρο και τη γεωγραφία, άρχισε μόλις πρόσφατα να αξιοποιείται στους χάρτες. Ειδικότερα οι χάρτες στο διαδίκτυο συμπεριλαμβάνουν όλο και πιο συχνά ηχητικά στοιχεία. Η χρήση του ήχου αποσκοπεί στο να συμπληρώσει την οπτική πληροφορία, να απεικονίσει φαινόμενα τα οποία είναι πιο εύκολα κατανοητά ακουστικά και να δώσει νέους τρόπους μετάδοσης χωρικών πληροφοριών.

Η ορθή χρήση του ήχου στην χαρτογραφία απαιτεί ανάλυση των συνισταμένων του. Δύο βασικές κατηγορίες ως προς τη χρήση του ήχου είναι ο ρεαλιστικός ήχος (realistic sound) και ο αφηρημένος (abstract sound), ενώ τρεις ακουστικές κωδικοποιήσεις που τονίζουν τα ενημερωτικά και αφηγηματικά χαρακτηριστικά του χάρτη είναι η φωνή, τα ηχητικά εφέ και η μουσική.

4. Προτεινόμενο λογισμικό / ηχητική σύνθεση (city grooves)

4.1 Σύνθεση μορφολογικών και ηχητικών χαρακτηριστικών

Παρακάτω παρουσιάζεται μια διαφοροποίηση ηχητικών μεταβλητών του αφηρημένου ήχου. Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με φωνητική αφήγηση και ηχητικά μηνύματα. Τα επιμέρους στοιχεία του ήχου συνεχίζουν να αλληλοεπιδρούν, ωστόσο ο διαχωρισμός αυτός χρησιμεύει στη διευκρίνιση αρχικών επιλογών σχεδιασμού.

Θέση (location): η θέση ενός ήχου σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο. Η θέση είναι ανάλογη με τη θέση στο δισδιάστατο επίπεδο του χάρτη και ως μεταβλητή του ήχου απαιτεί στερεοφωνικό ή τρισδιάστατο ήχο. Η θέση μπορεί να αντιπροσωπεύει ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα.

Ένταση (loudness): το «μέγεθος» του ήχου. Από τη φύση της κρίνεται σκόπιμη για την αναπαράσταση ποσοτικών δεδομένων. Η ένταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει την κατεύθυνση ή μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο για να αναπαραστήσει ποσοτική αλλαγή των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου. Η επίδραση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει πληροφορίες, όπου ένας ήσυχος τόνος αντιπροσωπεύει μια σταθερή κατάσταση και κάθε παραλλαγή αντιπροσωπεύει αλλαγή.

Ύψος (pitch): η συχνότητα του ήχου. Οι μεταβολή του τόνου είναι εξαιρετικά διακριτή και είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για την απόδοση δεδομένων που διαφοροποιούνται ως προς την κλίμακα τάξης. Η τονικότητα (διαιρούμενη σε οκτάβες) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει περισσότερες από μία μεταβλητές σε μια απεικόνιση (Yeung 1980, 1121). Η χρήση της τονικότητας κρίνεται κατάλληλη κυρίως για ποσοτικά δεδομένα, ενώ επιπλέον, μπορεί να υποδηλώνει μεταβολή. Κάθε δωδέκατος τόνος (δηλαδή από ντο σε ντο κτλ.) έχει το ίδιο χρώμα και αυτό μπορεί να χρησιμεύσει για να αναπαραστήσει ποιοτικά και ποσοτικά διαφοροποιούμενα δεδομένα (Weber 1993b). Σαν συνέχεια θα μπορούσαν διαφορές στον τόνο να αναπαραστήσουν ταξινομημένα ποσοτικά δεδομένα.

Έκταση (register): η σχετική θέση ενός τόνου σε ένα συγκεκριμένο εύρος τονικότητων. Είναι μια γενικότερη περίπτωση του ύψους, όπου θα μπορούσε κανείς να καθορίσει ομάδες υψηλών, μεσαίων και χαμηλών συχνοτήτων, όπου η κάθε μια θα περιλάμβανε ένα σύνολο τόνων. Θα μπορούσε να προσθέσει στην τονικότητα μια ευρύτερη διάκριση δεδομένων.

Ηχώχρωμα (timbre): η γενική ποιότητα ή αλλιώς η χροιά του ήχου. Το ηχώχρωμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόδοση ποιοτικών διαφορών. (Risset & Wessel 1982, Kramer & Ellison 1992).

Διάρκεια (duration): το χρονικό διάστημα που ένας ήχος ακούγεται (ή δεν ακούγεται). Αναφέρεται στο χρόνο αναπαραγωγής ενός μεμονωμένου ήχου (ή σιωπής) και μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ποσότητα που αντιστοιχεί στη χρονική αυτή διάρκεια.

Ρυθμός μεταβολής (rate of change): η σχέση της διάρκειας του ήχου και της σιωπής στην πάροδο του χρόνου. Ο ρυθμός μεταβολής είναι μια συνάρτηση της εναλλαγής του ήχου και της σιωπής και μπορεί να αναπαραστήσει αρμονική ή μη, αλλαγή στα φαινόμενα που αναπαριστά.

Διάταξη (order): Η αλληλουχία των ήχων στην πάροδο του χρόνου. Η σειρά με την οποία παρουσιάζονται οι ήχοι μπορεί να είναι "φυσική" - όπως η εξέλιξη από μια χαμηλή συχνότητα σε μια υψηλή - και αυτό συνεπάγεται μια εύκολη αναγνώριση των γενικών τάσεων (μοτίβων) στα δεδομένα που παρουσιάζονται με

μεταβλητές, όπως η τονικότητα ή η ένταση. Η "φυσική διάταξη" των ήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της ομοιογένειας των στοιχείων.

Μειστοποίηση / Ελαχιστοποίηση του ήχου (attack / decay): ο χρόνος που χρειάζεται ένας ήχος για να φτάσει τη μέγιστη / ελάχιστη τιμή του. Η μειστοποίηση έχει βρεθεί πολύ πιο επιτυχής στη μετάδοση πληροφοριών από ό, τι η ελαχιστοποίηση (Lunney & Morrison 1990, 144). Η μεταβλητή αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να δείξει το εύρος των δεδομένων σε σχέση με μια τιμή. Επίσης η μεταβλητή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τους ρυθμούς ανάπτυξης ή ύφεσης.

Οι Brauen & Taylor (2007) επιχείρησαν μια αντιστοίχιση των οπτικών λειτουργιών με ακουστικές, σε ένα διαδραστικό χάρτη. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήγαγαν είναι:

- Στις αλληλεπιδράσεις με την αναπαράσταση των δεδομένων μπορούμε να εφαρμόσουμε πολλές ακουστικές λειτουργίες ανάλογες με τις οπτικές όπως
 - _ πρόσθεση ή αφαίρεση θεματικών επιπέδων
 - _ επεξήγηση υπομνήματος και άλλων εννοιών, κ.α.
- Στις αλληλεπιδράσεις με τα δεδομένα δεν έχουμε προφανή ακουστική αναλογία των λειτουργιών που αναφέρονται στη διαλογή και επιλογή των δεδομένων.
- Στη συσχέτιση διαφορετικών αναπαραστάσεων μπορούμε να έχουμε
 - _ τη διασύνδεση μιας συντονισμένης επιφάνειας στο χάρτη
 - _ τη δυναμική σύγκριση πολλαπλών ηχητικών αναπαραστάσεων
- Στις αλληλεπιδράσεις με τη χρονική διάσταση μπορούμε να ενσωματώσουμε λειτουργίες ήχου που αφορούν
 - _ αναπαραγωγή/παύση
 - _ διαχείριση δυναμικών μεταβλητών
 - _ δυναμική σύγκριση-αναπαράσταση χρονικά διατεταγμένων παρατηρήσεων κ.α.

4.2 Επιπρόσθετες μεταβλητές

Στην ενότητα 1.2 παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά αστικής μορφολογίας με τα οποία ασχολείται το λογισμικό. Πέρα όμως από αυτά υπάρχει και μία προτεινόμενη λίστα εξωτερικών μεταβλητών από τις οποίες κάποιες ενισχύουν τη σύνθεση σε πραγματικό χρόνο και κάποιες δίνουν στον χρήστη τη δυνατότητα να συμπεριλάβει τη δική του διάθεση και χαρακτήρα στην παραγόμενη ηχητική σύνθεση:

Εξωτερικοί Παράγοντες:

- _ Φυσικό φως: ενημερώνεται με βάση την ώρα και την ημερομηνία και σε συνεργασία με προγράμματα καιρού ή και μέσω της κάμερας της συσκευής.
- _ Καιρός: σε συνεργασία με προγράμματα ή σελίδες που δίνουν πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες και τη θερμοκρασία.
- _ Αναγνώριση πεζού: αναγνώριση πεζού που έχει εγκατεστημένη την εφαρμογή ή και αναγνώριση προσώπου μέσω της κάμερας.

Χρήση των εργαλείων/ πολυμέσων του κινητού:

- _ Χρώμα όψεων: αναγνώριση αποχρώσεων μέσα από φωτογραφία ή βίντεο και ενημέρωση του συστήματος.

_Ηχοτοπία / soundscape: ενεργοποίηση, ηχογράφηση και ενημέρωση του συστήματος.

_Αφήγηση: ενεργοποίηση, ηχογράφηση και ενημέρωση του συστήματος.

Άλλες επιλογές:

_Επιλογή επιπέδου: ύψους ή ορόφου

_Επιλογή ρυθμού: πραγματικός χρόνος (real time) / επιλογή διάρκειας / επιλογή ταχύτητας-tempo

_Επιλογή ύφους

_Ηχητικές βιβλιοθήκες

_Επιλογή χρονολογίας της πόλης

4.3 Δομή προτεινόμενου λογισμικού

Η δομή του προτεινόμενου λογισμικού, μετά την οθόνη υποδοχής, οργανώνεται με τον παρακάτω τρόπο.

Πληροφορίες (info) : πληροφορίες σε σχέση με την έκδοση του λογισμικού, τον προγραμματισμό και τα πνευματικά δικαιώματα

Βοήθεια (help / how to) : παρουσίαση της λειτουργίας της εφαρμογής

Είσοδος (enter) : εισαγωγή στο επόμενο στάδιο όπου βρίσκονται οι μεταβλητές.

Ρυθμίσεις: επιλογή γλώσσας και διαμόρφωση του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής

Από την "Είσοδο", όπως προαναφέρθηκε, ο χρήστης περνάει στο επόμενο επίπεδο επιλογών, όπου συναντάει τα εξής:

Χάρτες:

_επιλογή χάρτη: υπάρχοντα χάρτη ή πόλης

_δημιουργία χάρτη: σχεδιασμό "πόλης" μέσα από επιλογή των μεταβλητών χαρακτηριστικών αστικής μορφολογίας ή σύνθεση "ηχητικής πόλης" μέσα από την επιλογή χαρακτηριστικών του ήχου.

_διαδραστικό περιβάλλον του χάρτη: επιλογή δισδιάστατου ή τρισδιάστατου τρόπου παρουσίασης του χάρτη καθώς και πραγματικού ή εικονικού μοντέλου του χάρτη. Επιπλέον επιλογή αποχρώσεων/ τονικότητας παρουσίασης του χάρτη καθώς και δημιουργία ατμόσφαιρας μέσα από επιλογή μοτίβων διάθεσης και συναισθημάτων.

Διαδρομή:

_σχεδιασμός διαδρομής: σχεδιασμός της επιθυμητής διαδρομής πάνω στον επιλεγμένο χάρτη.

_ορισμός από και προς σημείων: αναγραφή των οδών ή ορισμός των σημείων πάνω στον χάρτη. Από τις προτεινόμενες πορείες μπορεί να επιλεγεί μια συγκεκριμένη είτε να ακολουθηθεί αυτόματα τυχαία πορεία.

_real time: παρακολούθηση της διαδρομής σε πραγματικό χρόνο. Απαιτείται να είναι ενεργοποιημένα τα δεδομένα της συσκευής.

Λίστα επιπέδων (Layers):

Η λίστα των επιπέδων περιλαμβάνει αυτά τα χαρακτηριστικά και τις τιμές που παρουσιάζονται στις ενότητες 1.2 και 4.2 . Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει τις μεταβλητές που επιθυμεί και να ελέγξει την έντασή τους. Προτείνεται η ενεργοποίηση 3-5 μεταβλητών. Οι μεταβλητές χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

_έτος: Επιλογή χρονολογικού έτους. Ορίζει τα χαρτογραφικά δεδομένα που υπάρχουν για το συγκεκριμένο έτος παρουσιάζοντας μια πόλη του "τότε".

_κτίρια: περιλαμβάνει ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα κτίρια. (βλ. ενότητα 1.2)

_χώρος: περιλαμβάνει ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το οικοδομικό τετράγωνο και την περιοχή. (βλ. ενότητα 1.2)

_χρήση: περιλαμβάνει ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά που αφορούν τόσο το κτίριο όσο και το χώρο. (βλ. ενότητα 1.2)

_ρυθμός: περιλαμβάνει μορφολογικά και τυπολογικά στοιχεία που προσδίδουν ρυθμό στην "εικόνα της πόλης". (βλ. ενότητα 1.2)

_οικονομικά χαρακτηριστικά: όπως είναι το κόστος ενοικίασης και πώλησης

_εξωτερικοί παράγοντες: όπως είναι ο φυσικός φωτισμός, καιρικά δεδομένα και η αναγνώριση πεζού. (βλ. ενότητα 4.2)

_χρήση πολυμέσων: αφορά μεταβλητές που απαιτούν την ενεργοποίηση και τη χρήση των πολυμέσων της συσκευής όπως κάμερα και μικρόφωνο (βλ. ενότητα 4.2)

Επίπεδο (level):

Αφορά με ποιόν τρόπο επιθυμεί να ορίσει ο χρήστης ποιο επίπεδο γης επιθυμεί να αφογκραστεί.

_Υψος: ορισμός τιμής μεγέθους σε μέτρα (m)

_Οροφος: ορισμός ορόφου

Ρυθμός περιπλάνησης (tempo):

_real time: διαρκεί όσο η διαδρομή σε πραγματικό χρόνο

_διάρκεια: ορίζεται τιμή διάρκειας της τελικής ηχητικής σύνθεσης σε μονάδα μέτρησης χρόνου (sec / min / h)

_ταχύτητα: ορίζεται η ταχύτητα βάρδισης (m/s, km/h)

Συναίσθημα-Διάθεση:

Ο χρήστης επιλέγει έναν καθαρά υποκειμενικό παράγοντα ο οποίος επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται το περιβάλλον γύρω του και την "ατμόσφαιρα" του χώρου και αφορά τη διάθεση του χρήστη. Οι επιλογές του συνδιαμορφώνουν τα χαρακτηριστικά του ήχου που θα χρησιμοποιηθούν από το σύστημα για την ηχητική απεικόνιση της αστικής μορφολογίας.

Βιβλιοθήκες ήχων:

_επιλογή βιβλιοθήκης: επιλογή μεταξύ έτοιμων βιβλιοθηκών από ήχους

_νέα βιβλιοθήκη: δημιουργία νέας βιβλιοθήκης ήχου και αποθήκευση της.

Αυτή μπορεί να δημιουργηθεί είτε από συνδυασμό υπάρχοντων ήχων και την αντιστοίχησή τους με χαρακτηριστικά αστικής μορφολογίας, είτε με τη χρήση νέων ήχων και τη δημιουργία νέων αντιστοιχήσεων. Οι νέοι ήχοι μπορούν είτε να εισαχθούν είτε να ηχογραφηθούν είτε να δημιουργηθούν, με τη δυνατότητα αποθήκευσης.

Η παραπάνω δομή που παρουσιάστηκε αποτελεί μία ανεπτυγμένη μορφή της εφαρμογής που θα μπορούσε να υλοποιηθεί και να αναπτυχθεί μελλοντικά. Ο προγραμματισμός όλων αυτών των στοιχείων και μεταβλητών παρουσιάζει έντονη πολυπλοκότητα, εμπεριέχει ωστόσο τις δυνατότητες εξέλιξης της εφαρμογής.

4.4 Υπάρχουσες έρευνες

Η ιδέα του λογισμικού βασίστηκε τόσο στην ύπαρξη ποικίλων λογισμικών που ασχολούνται με την μετάφραση δισδιάστατης εικόνας σε ήχο όσο και σε μελέτες γύρω από την ηχητική χαρτογράφηση, τους ηλεκτρονικούς χάρτες και τα συστήματα GIS. Έρευνες γύρω από τα ηχοτόπια, την αυτοματοποιημένη σύνθεση και τη σύνδεση του ήχου με την ψυχολογία τροφοδοτούν τον τρόπο ανάπτυξης και πιθανής υλοποίησης του προτεινόμενου λογισμικού.

5 Πιθανές εφαρμογές

5.1 Δυνατότητες εξέλιξης

Οι δυνατότητες του προτεινόμενου λογισμικού μπορούν να αυξηθούν με την ύπαρξη κάποιας βιβλιοθήκης τόσο "δεδομένων" της πόλης όσο και ηχητικών συνδυασμών. Έτσι δίνεται η δυνατότητα "ακρόασης" του παρελθόντος, βάσει δεδομένων που υπάρχουν για προηγούμενες φάσεις της πόλης. Επιπλέον υπάρχει η πρόβλεψη στο μέλλον ο χρήστης να μπορούσε να συνθέσει ηχητικά το δικό του τοπίο και να αφογκραστεί ένα εικονικό χώρο.

5.2 Συνεργασία με άλλους τομείς

Το προτεινόμενο λογισμικό ανοίγει δρόμους συνεργασίας και με άλλους τομείς και κλάδους της επιστήμης και αξιοποίησης του και με άλλους τρόπους. Παρακάτω αναφέρονται κάποιοι από αυτούς:

_Χαρτογράφηση: Η εφαρμογή μπορεί να προσφέρει μία επιπρόσθετη και διαρκώς εξελισσόμενη μέθοδο χαρτογράφησης με έναν πιο δυναμικό τρόπο, ενημερώνοντας αυτόματα το σύστημα και ανατροφοδοτώντας το με επιπλέον πληροφορίες.

_Αρχιτεκτονική: Το λογισμικό μπορεί να αποτελέσει ένα διαφορετικό μέσο σχεδιασμού και ερμηνείας του χώρου προσιτό και σε άτομα με προβλήματα όρασης. Δύναται να παρουσιάσει έναν άλλο τρόπο αρχιτεκτονικής σύνθεσης. Ακόμα θα μπορούσε να λειτουργήσει ως ένας βιωματικός τρόπος ξενάγησης ενός τόπου.

_Εκπαίδευση: Το λογισμικό μπορεί να λειτουργήσει και ως ένα εργαλείο "εκπαίδευσης" σε χωρικά ζητήματα και θέματα ογκοπλασίας, φιλικό και προς άτομα με προβλήματα όρασης, δίνοντας μία πιο ολοκληρωμένη αντίληψη της έννοιας του χώρου, ενώ παράλληλα μέσω του λογισμικού εξασκείται η συναισθητική αντίληψη.

_Πολυμέσα: Μία διαφορετική διάσταση μπορεί να προστεθεί στην έννοια και τη χρήση της "ατμόσφαιρας" σε πολυμέσα. Από τον κινηματογράφο, το gaming και τη διαφήμιση, μέχρι τις παρουσιάσεις και τις υπόλοιπες μορφές πολυμέσων η χρήση του προτεινόμενου λογισμικού μπορεί να εμπλουτίσει τη μεταδιδόμενη πληροφορία.

_Τέχνες: Τόσο στις παραστατικές τέχνες όσο και σε άλλους κλάδους των τεχνών δίνεται η δυνατότητα εξέλιξης και αξιοποίησης ενός επιπλέον τρόπου αναπαράστασης των τριών διαστάσεων, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει τόσο συνεργατικά όσο και επιπρόσθετα ως προς τους υπάρχοντες.

_Ψυχοακουστική: Τα εξαγόμενα δεδομένα της εφαρμογής μπορούν να δώσουν τροφή για επιπλέον μελέτη σε σχέση με την αντίληψη του ήχου και την επίδραση του στην ανθρώπινη νόηση και συμπεριφορά. Τα πορίσματα της έρευνας με τη σειρά τους μπορούν να ανατροφοδοτήσουν την ίδια την εφαρμογή.

_Μουσικοθεραπεία: Η εφαρμογή εισάγει έναν διαφορετικό τρόπο έκφρασης και επικοινωνίας εντός των τριών διαστάσεων με βασικό στοιχείο τον ήχο που θα μπορούσε να λειτουργήσει ως μέσο για άτομα που δυσκολεύονται να εκφραστούν με άλλους, πιο συμβατικούς τρόπους.

6 Επίλογος / Συμπεράσματα

Μέσα από μία ανάλυση S.W.O.T παρουσιάζονται παρακάτω τα συμπεράσματα γύρω από την εφαρμογή "city grooves"

"Δυνάμεις-Δυνατότητες":

_Η ιδέα του λογισμικού βασίζεται σε σχετικά νέα και αναπτυσσόμενα ερευνητικά πεδία. Έτσι μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για περαιτέρω έρευνα, προβληματισμό και ανάπτυξη.

_Η υλοποίηση ενός τέτοιου λογισμικού απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση και συνεπώς χρειάζεται τη συνεργία ατόμων από διάφορους κλάδους. Αυτό το χαρακτηριστικό του ενισχύεται μέσα από τη δομή του λογισμικού που δίνει αφορμές συνεργασίας και με άλλους τομείς.

_Ο τρόπος ανάπτυξης του λογισμικού το καθιστά πέρα από ένα διαπαιδαγωγικό μέσο και εργαλείο για μία σειρά από ποικίλες άλλες χρήσεις.

_Το λογισμικό αφήνει περιθώρια παραπάνω και διαρκούς εξέλιξης.

_Ο πολύπλευρος χαρακτήρας το καθιστά φιλικό και ενδιαφέρον σε ποικίλες ομάδες ανθρώπων τόσο για καθημερινή χρήση όσο και για επιστημονική έρευνα.

_Η μετάφραση χώρου σε ήχο αποτελεί ένα αρκετά πρωτοποριακό και πρωτοπόρο στοιχείο στο χώρο των πολυμέσων.

"Αδυναμίες-Απειλές":

_Καθώς κινείται σε σχετικά νέα πεδία και τομείς υπάρχουν ακόμα μέρη ανεξερεύνητα που μπορεί να καθυστερήσουν το κομμάτι της έρευνας.

_Η πολυπλοκότητα του δυσκολεύει τη διαδικασία υλοποίησης. Δεν την καθιστά ωστόσο αδύνατη.

_Το πρωτοπόρο στοιχείο που χαρακτηρίζει την εφαρμογή την καθιστά ευάλωτη σε λάθη και ανοιχτή σε πειραματισμούς.

7 Αναφορές

_American Planning Association (APA). "Planning and Urban Design Standards", Wiley graphic Standards, New Jersey/ Canada, p.401 (2006)

- _Bafna, S. , Space Syntax: a brief introduction to its logic and analytical techniques. *Environment and Behavior* 35: 17. (2003)
- _Belgiojoso.R. "Constructing Urban Space with Sounds and Music", Ashgate, Burlington (2014)
- _Brauen G. "Designing Interactive Sound Maps Using Scalable Vector Graphics", Department of Geography, Carleton University, Ottawa. *Cartographica*, vol. 41, no. 1, pp. 59–71.(2006)
- _Caquard, S., G. Brauen, and B. Wright., "Exploring Sound Design in Cybercartography." Paper read at the 22nd International Cartographic Conference, 9–16 July, A Coruna, Spain.(2005)
- _Dorien Herremansa, Kenneth Sørensen and David Martensb, " Classification and generation of composer-specific music using global feature models and variable neighborhood search", *Computer Music Journal*, MIT Press, Fall 2015, Vol. 39, No. 3, Pages 71-91(2015)
- _Francis D.K. Ching , "Architecture Form, Space & Order", John Wiley & Sons. 3rd ed. (2007)
- _Gloria Lanci , "Translating cities the use of digital technologies in urban environments", University of the West of England – UK
- _Kaliakatsos-Papakostas, M. A., Epitropakis, M. G., Floros, A., & Vrahatis, M. N.. Controlling interactive evolution of 8-bit melodies with genetic programming. *Soft Computing*, 16(12), 1997–2008. (2012a) doi:10.1007/s00500-012-0872-y
- _Kaliakatsos-Papakostas, M. A., Epitropakis, M. G., Floros, A., & Vrahatis, M. N.. Chaos and music: From time series analysis to evolutionary composition. *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*. 23, (2013a)
- _Kaliakatsos-Papakostas, M. A., Floros, A., Vrahatis, M. N., & Kanellopoulos, N.. Genetic evolution of L and FL–systems for the production of rhythmic sequences. In *Proceedings of 21st International Conference on Genetic Algorithms and the 17th Annual Genetic Programming Conference (GP) (GECCO 2012)*, 2nd Workshop in Evolutionary Music. Philadelphia, USA. ACM. (2012b)
- _Kang J. " Urban sound environment", Taylor & Francis, New York (2007)
- _Konstantinos Drossos and Andreas Floros, "An Approach for Modeling Affective Acoustic Ecology in City Environments", *Audiovisual Signal Processing Lab.*, Dpt. of Audiovisual Arts, Ionian University, Corfu - Greece
- _Konstantinos Drossos, Andreas Floros, Andreas Giannakoulopoulos, and Nikolaos Kanellopoulos. " Investigating the Impact of Sound Angular Position on the Listener Affective State", *IEEE TRANSACTIONS ON AFFECTIVE COMPUTING*, VOL. 6, NO. 1, (JANUARY-MARCH 2015)
- _Konstantinos Drossos. Maximos Kaliakatsos-Papakostas. Andreas Floros , " Affective Audio Synthesis for Sound Experience Enhancement", Chapter 6, *Experimental Multimedia Systems for Interactivity and Strategic Innovation*, IGI Global, Information Science(p.122-145),(2016)
- _Kraak, M-J. and A. Brown (Eds). "Web Cartography", New York. Peterson M. P. 2003, "Maps and the Internet". Oxford: Elsevier Science. (2001)

_Kramer, G. and S. Ellison. "Audification: The Use of Sound to Display Multivariate Data," Unpublished manuscript.(1992)

_Krygier, J.B., "Sound and Geographic Visualization", Visualization in Modern Cartography, των A.M. MacEachren και D.R.F. Taylor. Νέα Υόρκη: Pergamon, 149–66,(1994)

_Lunney, D. and R. Morrison., "Auditory Presentation of Experimental Data". In: Farrell, E., (ed.), op cit., pp. 140-146.(1990)

_Maximos A Kaliakatsos-Papakostas, Andreas Floros, Michael N Vrahatis, " Interactive music composition driven by feature evolution", SpringerPlus, Springer International Publishing, Volume 5, p1-38, (2016)

_Maximos A Kaliakatsos-Papakostas, Andreas Floros, Michael N Vrahatis, " EvoDrummer: Deriving rhythmic patterns through interactive genetic algorithms", International Conference on Evolutionary and Biologically Inspired Music and Art, Springer Berlin Heidelberg,p25-36, (2013)

_Moudon, Anne Vernez."Urban Morphology as a Emerging Interdisciplinary Field". Urban Morphology Vol.1. International Seminar on Urban Form (1997)

_Patrik N. Juslin and Petri Laukka "Communication of Emotions in Vocal Expression and Music Performance: Different Channels, Same Code?", Uppsala University, Psychological Bulletin Copyright 2003 by the American Psychological Association, Vol. 129, No. 5, 770–814,(2003)

_Risset, J. and D. Wessel., "Exploration of Timbre by Analysis and Synthesis", In: Deutsch D., (ed.), op cit.(1982)

_Seashore, Carl E. Psychology of Music, Dover Publications, New York. (1967)

_Tzanetakis, G., Cook, P.: Musical genre classification of audio signals. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 10 (5), 293–302 (2002)

_Vasconcellos, R. and B. Tsuji, "Interactive Mapping for People Who Are Blind or Visually Impaired". In Cybercartography: "Theory and Practice edited by D.R.F. Taylor. Amsterdam: Elsevier Science.(2006)

_Yeung, E. "Pattern Recognition by Audio Representation of Multivariate Analytical Data," Analytical Chemistry, Vol. 52 (7), pp. 1120-1123. (1980)

_Αλεβιζάκης, Αλέξανδρος. " Διαδραστικός ηχητικός χάρτης σε περιβάλλον διαδικτύου - Εφαρμογή: Χάρτης θορύβου της πόλης της Βέροιας ", Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο/ Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα, (Απρίλιος 2014)

The Sounds of Silence: Ησυχία και Σιωπή στον κινηματογράφο ως μέσα του ηχητικού σχεδιασμού και της αφήγησης

Χρήστος Γούσιος, Ελένη Γκολφινόπουλου, Δήμητρα Μαργαριτίδου,
Αναστάσης Πετρέλης, Γιάννης Συκοβάρης
Τμήμα Κινηματογράφου, ΣΚΤ, ΑΠΘ / Θεσσαλονίκη
cgoussios@hotmail.com 6974407843, minchord@gmail.com 6976870220,
instantagon7@gmail.com 6974548508, anastasis_pet@hotmail.com 6942949838,
giannis.sykovaris@gmail.com 6973571925

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση της σιωπής, αναφορικά με τις σχέσεις εικόνας-ήχου στον κινηματογράφο, έχει ιδιαίτερα σημαντική και ενδιαφέρουσα θέση. Ο βωβός (muet) ή σιωπηλός (silent) κινηματογράφος (1895-1927), συνυπήρχε πάντα με ήχους ηθελημένους και μη. Σήμερα η παύση, η απουσία των ήχων, η σιωπή, η ησυχία -ως εκφάνσεις του κινηματογραφικού ήχου- εφαρμόζονται, με διάφορους τρόπους και διαφορετικούς σκοπούς σε αρκετές ταινίες διαφορετικών κινηματογραφικών ειδών. Αναφέρονται κατηγορίες και παραδείγματα χρήσης της σιωπής και ησυχίας σε ταινίες, καθώς και η κατηγοριοποίησή τους αναφορικά με το περιεχόμενό, αλλά και την αφηγηματική τους διάσταση. Παρατίθενται δεδομένα στάθμης και συχνότητας από κάποιες επιλεγμένες κινηματογραφικές σκηνές, όπου χρησιμοποιείται η σιωπή/ησυχία/απουσία ήχων ως μέσο αφήγησης.

The Sounds of Silence: Silence and Quiet as sound design and narration media in films

ABSTRACT

The use of silence has a significant role in the interrelations between image and sound in films. The movies of the silent era (1895-1927) were screened together with intentional and unintentional sounds. Nowadays pause, lack of sounds, silence and quiet, as sonic expressions, are used in different ways and with many techniques for the achievement of different emotional and storytelling purposes. On this current work, some examples of the use of silence and quiet in feature films of different genres are presented and categorized regarding their content and also their narrative dimension. Some technical data concerning level and frequency response of such examples are also reported.

1. Εισαγωγή

Η ησυχία, ως ηχητική συνθήκη, ορίζεται συχνά σε συνάρτηση με τη φασαρία, τον θόρυβο, τον ανεπιθύμητο ήχο. Επίσης, δεν είναι πάντα η ησυχία που γίνεται

αισθητή, αλλά επιβεβαιώσή της από τη διόγκωση κάποιων ασθενών ήχων, που υπό άλλες συνθήκες δεν ακούμε/συνειδητοποιούμε. Για παράδειγμα ο ήχος ενός εντόμου στην εξοχή, είναι αυτός που επιβεβαιώνει την ήσυχη ακουστική συνθήκη. Παύση είναι η στιγμιαία ή για μικρό χρόνο διακοπή. Στην αγγλική ορολογία της Μουσικής ονομάζεται *rest*, όπου πρόκειται για είναι σταμάτημα, μια διακοπή της δράσης, αλλά μπορεί και να είναι και χρόνος-απόηχος προηγούμενων ήχων, επίσης μπορεί να μην αφορά όλους τους μουσικούς μιας ορχήστρας. Αναφορικά με τη σιωπή, διαπιστώνει κανείς τη δυσκολία που παρουσιάζεται στον ορισμό της. Κι αν στην καθημερινότητα θεωρούμε ότι η σιωπή σχετίζεται με την παύση ενεργειών και δραστηριοτήτων που παράγουν ήχους, είναι γιατί δεν δίνουμε ιδιαίτερη σημασία στους υπόλοιπους ήχους του περιβάλλοντος. Κάνουμε ησυχία και σιωπαίνουμε και απολαμβάνουμε την ηρεμία της φύσης, η οποία όμως παράγει πλήθος ήχων. Θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η σιωπή είναι η απουσία ήχων. Όμως κάτι τέτοιο πρακτικά δεν είναι ποτέ εφικτό (ακόμη και στον ανηχοϊκό θάλαμο). Τεχνικά όμως, έχουμε τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσουμε τη στάθμη του ήχου, όμως και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ο ήχος του χώρου, στον οποίο αναπαράγεται το όποιο ηχογράφημα. Η σιωπή υπήρξε επίσης ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά της πρώιμης πειραματικής Μουσικής κι απασχόλησε ιδιαίτερα τους πρωτοπόρους του είδους (John Cage, 1912-1992) [1], πέρα από στοιχείο της καλλιτεχνικής δημιουργίας τους, κι ως ένα πεδίο φιλοσοφικού στοχασμού. Το ανατρεπτικό μουσικό έργο 4':33'' (1952) του John Cage, παρουσίασε έμμεσα τη συνθήκη της ησυχίας, την ανάδειξη των ακουστικών παραμέτρων κάθε χώρου, τις δράσεις και αντιδράσεις του κοινού αλλά και το ηχοτοπίο της performance, ως στοιχεία της μουσικής σύνθεσης, πέρα από τις μουσικές και μουσικολογικές του distâncias. Στον κινηματογράφο, με την έλευση του σύγχρονου ήχου (1927), δόθηκε η δυνατότητα διαχείρισης των ήχων με τρόπο τέτοιο, ώστε να προκαθορίζεται η ηχητική εμπειρία του κοινού, γεγονός που απασχόλησε για πολλά χρόνια την έρευνα στην τεχνολογία του κινηματογραφικού ήχου (λ.χ. Hollywood Curve, Dolby κ.ο.κ.). Με την εξέλιξη της τεχνολογίας της ηχογράφησης, επεξεργασίας και αναπαραγωγής, καθώς και με την έλευση του ψηφιακού ήχου, η δυνατότητα αυτή έφτασε σε εξαιρετικά υψηλό επίπεδο, δίνοντας έτσι την ευκαιρία σε περισσότερους δημιουργούς να χρησιμοποιήσουν δημιουργικά τον ήχο στις ταινίες. Η σιωπή στον κινηματογράφο, όπου η παρουσία των ήχων είναι συνήθως συνεχής σε όλη τη διάρκεια μιας ταινίας, φαντάζει να είναι ένας ήχος μεγάλης αφηγηματικής αξίας, καθώς σε σχέση με τους προηγούμενους και επόμενους ήχους, έχει μεγάλη διαφορά δυναμικής. Η διαφορά αυτή έχει μεν αρνητικό πρόσημο –είναι ασθενέστερος ήχος, ή ορθότερα είναι μη-ήχος– αλλά το αισθητικό αποτέλεσμα μπορεί και να είναι εντονότατο, ακριβώς αντίστροφο από τη στάθμη, όπως διατυπώνεται από πολλούς κινηματογραφιστές (η σιωπή είναι ο ισχυρότερος ήχος). Γενικότερα, αυτό που συμβαίνει στον ηχητικό σχεδιασμό των ταινιών, είναι ότι για να υπάρξουν κορυφές, πρέπει να υπάρξουν κοιλάδες και στην περίπτωση της σιωπής έχουμε μια έντονη κορυφή, καθώς ως μη-ήχος, γίνεται πάντα αισθητή. Είναι γεγονός ότι η σιωπή ως ηχητική συνθήκη αποτελεί το αντικειμενικότερο ακουστικό περιβάλλον στο οποίο μπορούν να προβληθούν οι εικόνες [2], καθώς αναφορικά με τον ήχο η ανάγνωση είναι κοινή για όλους: η έλλειψή του κι έτσι η σιωπή αποτελεί έναν ήχο αναφοράς. Διαφαίνεται κατά συνέπεια, ότι στον κινηματογράφο, όπου πλέον έχουν ωριμάσει κι αφομοιωθεί οι εφαρμογές και λειτουργίες του ήχου, και με την μεγάλη ευκολία της

επεξεργασίας που παρέχεται από τα ψηφιακά συστήματα, σε σημεία και περιπτώσεις επιστρέφουμε στη σιωπή, για την εξυπηρέτηση της αφήγησης.

2. 1895-1927, Σιωπηλός κινηματογράφος

Η συνολική μελέτη όλης της περιόδου 1895-1927 ως μιας ομοιογενούς περιόδου, αναφορικά με τον ήχο και τη Μουσική στον κινηματογράφο, δεν διευκολύνει την διερεύνηση των σχέσεων των οπτικοακουστικών μέσω της αφήγησης [3]. Όμως αυτή η περίοδος, κάθε άλλο παρά ομοιογενής φαντάζει, αν κανείς σκεφτεί τον τρόπο με τον οποίο ο κινηματογράφος κάνει την εμφάνισή του, την εμφάνιση του πρώτου επίσημου soundtrack (L'Assassinat du duc de Guise, 1908), το πλήθος των μουσικών εκδόσεων για τη μουσική συνοδεία/συνύπαρξη των ταινιών, την εξέλιξη του ίδιου του κινηματογράφου και την εγκαθίδρυσή του ανάμεσα στις Καλές Τέχνες, τα ανατρεπτικά καλλιτεχνικά κινήματα και τις κινηματογραφικές τους προσεγγίσεις. Επιπρόσθετα, ο κινηματογράφος πρακτικά ποτέ δεν ήταν βωβός ή σιωπηλός. Ακόμα κι αν η Μουσική αρχικά χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει τον ήχο της μηχανής προβολής, υπήρχε ο ήχος της, που συνόδευε την κάθε ταινία, σε συνδυασμό με τους ήχους που παρήγαγε το κάθε κοινό, αλλά και η ακουστική που χαρακτήριζε την κάθε αίθουσα, τον κάθε χώρο, όπου προβάλλονταν οι πρώτες κινηματογραφικές ταινίες. Οι κινούμενες εικόνες είχαν πάντα το δικό τους, μοναδικό και συχνά τυχαίο ηχοτόπιο, που τις συνόδευε, καθώς ακόμα και η εσκεμμένη επιθυμητή σιωπή δεν θα μπορούσε να γίνει εφικτή. Το πιθανότερο είναι ότι η σιωπή, ως μη-ήχος και ως στοιχείο ενός συνολικού ηχητικού περιβάλλοντος, έως το 1927 (πρώτη προβολή με σύγχρονο ήχο), δεν θα μπορούσε εύκολα να χρησιμοποιηθεί ως αφηγηματικό εργαλείο, καθώς πιθανότατα θα δημιουργούσε ποικίλες αντιδράσεις στο πρώιμο κινηματογραφικό κοινό. Όμως οι μουσικές παύσεις των συνθέσεων που συνυπήρχαν με τις ταινίες, σίγουρα έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίσουν το συναισθηματικό αποτέλεσμα, το οποίο μας απασχολεί. Επιπρόσθετα, υπήρξαν ανέκαθεν κινηματογραφιστές, που ενδιαφέρονταν για τις αφηγηματικές διαστάσεις του ζωντανού ή προηχογραφημένου-σύγχρονου ήχου, ακόμη και πριν το 1927. Για παράδειγμα, ο Dziga Vertov στις σημειώσεις-οδηγίες του για τη μουσική για την ταινία του *Man with a Movie Camera* (1929), αναφέρει ότι θέλει σε κάποιο σημείο αυτή να σταματάει και να ακούγεται ένα ρολόι, σε κάποιο άλλο, να σταματάνε όλοι οι ήχοι και μετά να ξεκινάει πιάνο. Όμως η απόλυτη σιωπή ως αντίληψη και κατά συνέπεια και ως δυνατότητα στον κινηματογραφικό ήχο, έχει διατυπωθεί πολύ συγκεκριμένα από τον Pudovkin [4] ως οργανική δυνατότητα του ανθρώπου, ως δηλαδή επιλεκτικότητα της ακοής (όπως λ.χ. σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, όπως μπαρ, εργοστάσιο σε συγκεκριμένες συναισθηματικές συνθήκες και καταστάσεις).

3. Κατηγορίες χρήσης σιωπής

Σήμερα η χρήση της σιωπής στον κινηματογράφο αποτελεί μια όχι τόσο σπάνια επιλογή, η οποία άλλοτε διατυπώνεται με ήδη γνωστούς τρόπους κι άλλοτε με πρωτοποριακή διάθεση. Αυτό που συμβαίνει όμως πάντα, είναι ότι αποτελεί ένα ξεκάθαρο αφηγηματικό σχόλιο, το οποίο μπορεί να ενταχθεί σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τις προθέσεις της εφαρμογής της σιωπής.

3.1 Υπογράμμιση υποκειμενικών συναισθημάτων ενός χαρακτήρα

Με τη χρήση της σιωπής εστιάζουμε στην συναισθηματική κατάσταση, στον εσωτερικό κόσμο ενός χαρακτήρα, ο οποίος δείχνει να είναι βυθισμένος στις σκέψεις του. Συγκεκριμένα παραδείγματα συναντάμε στο *The Fountain* (2006), όπου η σιωπή υπογραμμίζει την απομόνωση του ήρωα από το ρεαλιστικό ηχητικό περιβάλλον, όπως και στο *Louder Than Bombs* (2015). Ουσιαστικά η σιωπή έχει τη δυνατότητα να μετατοπίζει μια εικόνα ή έναν χαρακτήρα από τη σύνδεσή του με το φυσικό κόσμο και το περιβάλλον του [5].

3.2. Σιωπή ως διόγκωση των διαστάσεων ενός ήχου ή και των εικόνων

Η σιωπή είναι ουσιαστικά έννοια που σχετίζεται με τον ήχο και κατά συνέπεια και με τον χρόνο. Η προσθήκη της, έχει ως επακόλουθο και την προσθήκη χρόνου. Ένας πυροβολισμός, ο οποίος ακολουθείται αρχικά από την αντήχηση του ήχου και στη συνέχεια από ελάχιστο χρόνο ησυχίας ή και σιωπής, αποκτά πρακτικά, αλλά και συναισθηματικά, πολύ μεγαλύτερη διάσταση από αυτήν που πραγματικά έχει. Η απουσία των ήχων σε συνδυασμό φυσικά με την κινηματογράφηση και το μοντάζ, μπορεί και να διογκώσει και να δραματοποιήσει τις εικόνες, όπως σε κάποιες περιπτώσεις συναντάμε κραυγές αγωνίας, γέλια ειρωνικά, στόματα που ανοιγοκλείνουν, χωρίς όμως να ακούμε τους αντίστοιχους ήχους που παράγονται. Τέτοιοι συνδυασμοί είναι άλλοτε τρομακτικοί, κι άλλοτε δραματικοί.

3.3. Χρόνος συνειδητοποίησης ενός γεγονότος/προσμονή για κάτι σημαντικό

Όταν μετά από ένα έντονο γεγονός ακολουθεί σιωπή, δίνεται η δυνατότητα στον θεατή να το αντιληφθεί με ακόμα μεγαλύτερη προσοχή και συγκέντρωση, σαν να κόβεται η ανάσα. Και μαζί μ' αυτήν κι ο ήχος. Σε άλλες περιπτώσεις όπου ο ήχος διακόπτεται πριν ή κατά τη διάρκεια της δράσης, μπορεί να δημιουργηθεί ή και να αυξηθεί η αγωνία ή και η προσμονή για κάποιο –έντονο συνήθως– γεγονός που ακολουθεί, λ.χ. μια πτώση, της οποίας το αποτέλεσμα περιμένουμε.

3.4. Περιγραφή άγνωστων τόπων

Η σιωπή ως ηχητική έκφραση χρησιμοποιείται συχνά σε μια προσπάθεια απόδοσης του ηχητικού περιβάλλοντος άγνωστων τόπων, όπως το διάστημα (όπου λόγω ανυπαρξίας μέσου, δεν υπάρχει η διάδοση του ήχου όπως τη γνωρίζουμε), αλλά και άλλων μη υπαρκτών χώρων λ.χ. σε ταινίες SciFi και animation. Στην πρώτη περίπτωση, πρόκειται για μια προσπάθεια συνέπειας σε σχέση με την εντύπωση που έχουμε για την ατμόσφαιρα του διαστήματος, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα τις ταινίες *Gravity* (2013) και *Interstellar* (2014).

3.5. Υπογράμμιση έντονων-ακράιων καταστάσεων και συνθηκών

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις όπου η ησυχία και η σιωπή δραματοποιούν έντονα καταστάσεις όπως καταστροφές, θάνατος, έλλειψη διαύγειας, λιποθυμία -όπως στο *Mulholland Dr.*, (2001)- παραισθήσεις, αλλά και όνειρα ή εφιάλτες. Η τελευταία

είναι μια πολύ συνηθισμένη ηχητική συνθήκη στα περισσότερα κινηματογραφικά είδη.

3.6. Προσπάθεια απόδοσης της κώφωσης

Σε ταινίες στις οποίες υπάρχουν κουφοί ήρωες ή κάποιος παθαίνει προσωρινά κώφωση ή αυτή εξελίσσεται, η σιωπή με την προσθήκη κάποιων χαμηλών συχνοτήτων, είναι ο τρόπος με τον οποίο συνήθως αποδίδεται η υποκειμενική τους ακοή. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα, όπως *The Scarlet Letter* (1995), *The Pianist* (2002), *Babel* (2006) κ.ά. Επιπρόσθετα, καθώς υπάρχουν και ήχοι που περισσότερο τους νιώθουμε ή τους ακούμε με το εσωτερικό μας αυτί, η ίδια μεθοδολογία μπορεί να ακολουθηθεί και σε αυτές τις περιπτώσεις.

3.7. Περιγραφή ηχοτοπίων

Στην περίπτωση της ηχητικής περιγραφής ενός ήρεμου χώρου, κατασκευάζεται μια ηχητική συνθήκη η οποία υπογραμμίζει συναισθηματικές καταστάσεις διαφορετικού περιεχομένου, που μπορεί να κινούνται από την ηρεμία μέχρι και την απειλή, π.χ. μια ήσυχη βραδιά με ήχους από τριζόνια σε μια κοινωνική ταινία τονίζει τη γαλήνη, ενώ σε ένα θρίλερ δημιουργεί αναμονή για ένα ξάφνιασμα.

3.8. Υπερφυσικό στοιχείο

Η υπογράμμιση του υπερφυσικού στοιχείου, ή ακόμα και η δημιουργία του ηχητικού περιβάλλοντος το οποίο το συνοδεύει, κάποιες φορές πραγματοποιείται με την αποκοπή όλων των ήχων ή με την ξαφνική ησυχία έπειτα από μια άλλη, πιο έντονη, ηχητική ατμόσφαιρα. Η σιωπή εντείνει την αίσθηση του απόκοσμου, του άγνωστου και του ξένου.

3.9. Αμηχανία

Η ησυχία, κυρίως ως έλλειψη διαλόγου, όταν βρισκόμαστε με άλλους ανθρώπους μπορεί και να προκαλέσει αμηχανία κι ακριβώς αυτό το γεγονός εφαρμόζεται και στον κινηματογράφο, όταν θέλουμε να υποδηλώσουμε και να υπογραμμίσουμε τέτοιου είδους άβολα συναισθήματα.

3.10. Αυτοαναφορικότητα

Μπορεί η σιωπή να είναι και κομμάτι της ίδιας της αφήγησης, ως σεναριακό στοιχείο, λ.χ. ένας χαρακτήρας να προτρέπει τους υπόλοιπους να κάνουν ησυχία ή να σιωπάσουν. Με αρκετά πειραματική διάθεση στο *Bande à Part* (1964), κόβεται όλος ο ήχος της ταινίας.

3.11. Τρόμος

Η ησυχία και η απόλυτη σιωπή είναι μάλλον ασυνήθιστες ηχητικές συνθήκες για τους περισσότερους κατοίκους των αστικών κέντρων. Ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το σκοτάδι, μπορεί να δημιουργηθεί ταραχή, πανικός ή και τρόμος. Αυτό ακριβώς

εκμεταλλεudμαστε και στα θρίλερ, σε συνδυασμό πολλές φορές με ξαφνικούς ήχους (φτερούγισμα και κρώξιμο πουλιών, κραυγές ανθρώπων, ιαχές ζώων, πυροβολισμοί, σπασίματα, τριξίματα κ.ο.κ.).

4. Πίνακας παραδειγμάτων εφαρμογής σιωπής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με σκηνές από συγκεκριμένες ταινίες, οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικά είδη και στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η σιωπή κι η ησυχία, με σκοπό τη συνδρομή τους στην αφήγηση. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν κάποια άλλα κινηματογραφικά στοιχεία, τα οποία συνήθως συνυπάρχουν με τη σιωπή, όπως: voice over, slow motion στην εικόνα, χρήση αντήχησης και υπόκωφον ήχων, κάποια έντονη φωνή, όπως θα ακουγόταν αν μιλούσε κοντά στο αυτί μας και μουσική –συνήθως ambient– και τα οποία σημειώνονται κατά περίπτωση στον πίνακα.

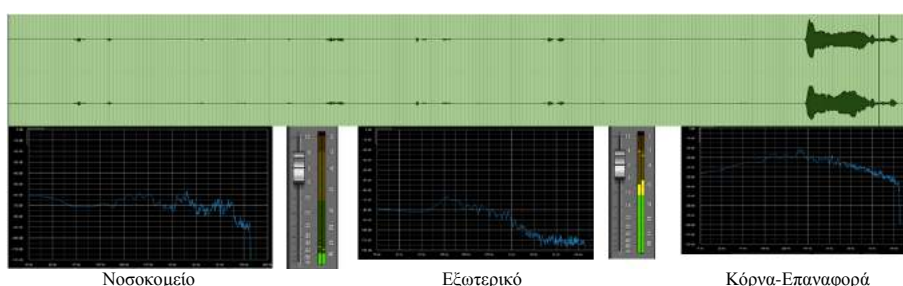
Πίνακας 1. Παραδείγματα εφαρμογής σιωπής

Ταινία/ είδος	Τι επιχειρείται/επιτυγχάνεται με τη χρήση της σιωπής	Voice over	Slow motion	Αντήχηση	έντονη φωνή	Μουσική/ Ambient
Fountain/SciFi & Drama	Εστίαση στην συναισθηματική κατάσταση του ήρωα. Ο ήρωας είναι βυθισμένος στις σκέψεις του (1)	-	-	x	x	-
Looper/SciFi	Αύξηση της διάστασης των ήχων (2). Χρόνος για τη συνειδητοποίηση της δράσης (3). Ησυχία περιβάλλον (7)	x	x	x	x	ρολόι
Gravity/Adventure Drama SciFi	Απόπειρα ρεαλισμού (4). Παραισθήσεις (5). Ανάδειξη της συναισθηματικής κατάστασης της ηρωίδας (1)	-	x	x	x	x
Louder than Bombs/Drama	Ανάδειξη της συναισθηματικής κατάστασης του ήρωα (1). Ονειρική κατάσταση/POV, παραίσθηση (5)	~	x	x	x	-
Carrie/Horror	Διόγκωση των εικόνων (2). Τρομακτικό (11). Εφιαλτική κατάσταση (5). Υπερφυσικές διαστάσεις (8)	-	x	x	στο τέλος	-
Children of Men/Drama	Επικέντρωση στο συμβάν (1)	-	-	x	-	-
Jarhead/Action	Εστίαση στην συναισθηματική κατάσταση του ήρωα (1)	x	x	x	x	-
Hotel Transylvania/Animation	Αναμονή και προσμονή για κάτι έντονο, όπως και αγωνία για το τι θα συμβεί (3)	-	x	-	-	-
Seventh Son/Action	Αναμονή και προσμονή για το τι θα συμβεί (3).	-	x	x	-	x
Drive/Crime Drama	Αύξηση της διάστασης των ήχων (2). Συνειδητοποίηση της δράσης (3)	-	x	x	-	-
Babel/Drama	Απόπειρα απόδοσης κίψωσης (6). Εισαγωγή στον κόσμο της ηρωίδας (1). Διόγκωση των ήχων του χώρου (2)	-	x	x	-	ενδιάμεσα
Bande a Part/Drama	Η στιγμή είναι ενδοδηγητικό στοιχείο της αφήγησης (10)	-	-	-	-	-

5. Δεδομένα στάθμης και συχνότητας

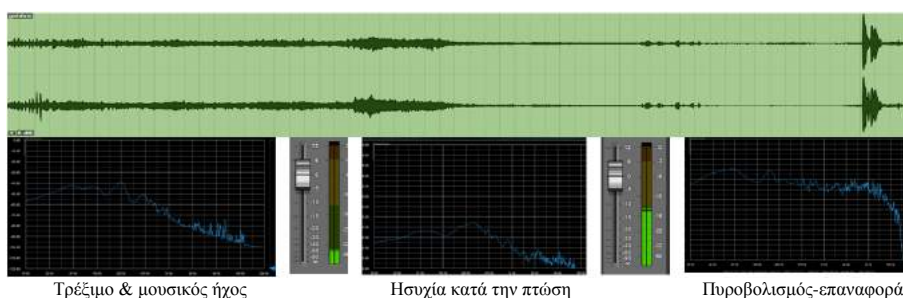
Με απλό τρόπο, υπολογίστηκε προσεγγιστικά η διαφορά στάθμης και η απόκριση συχνότητας σε δύο σκηνές, όπου χρησιμοποιήθηκε σιωπή με κάποιον ή κάποιους από τους τρόπους που προαναφέρθηκαν, και όπου η σιωπή λειτουργεί ως οργανικό κομμάτι της αφήγησης. Στη σκηνή στο νοσοκομείο από την ταινία The Fountain (2006), υπάρχει ήσυχια ατμόσφαιρα όπου κυριαρχεί ο διάλογος. Στη συνέχεια ο ήρωας είναι στο δρόμο και καθώς είναι βυθισμένος στις σκέψεις του, ακούγονται αποκλειστικά τα βήματά του στα διαφορετικά υλικά (χιόνι στο πεζοδρόμιο, στο δρόμο, ξύλινη ράμπα, ξύλινο βάρθο). Κάποιες έντονες εικόνες ακούγονται

πιθανότητα με το εσωτερικό αυτί του θεατή, όπως για παράδειγμα ένα ασθενοφόρο με αναμμένη σειρήνα, ένα μηχάνημα που παράγει σπινθήρες. Ο ήρωας προχωράει μπροστά σε ένα αυτοκίνητο. Το φρενάρισμα και η κόρνα, επαναφέρουν όλους τους ήχους του αστικού τοπίου (κυρίως κυκλοφοριακοί θόρυβοι). Η διαφορά στη στάθμη που καταγράφεται είναι της τάξης των 50dB. Στο νοσοκομείο το αναπαράγονται όλοι οι ήχοι του ακουστού φάσματος. Το συχνοτικό περιεχόμενο των βημάτων περιορίζεται μέχρι το 1kHz περίπου με εντονότερες τις πολύ χαμηλές συχνότητες (100Hz), που αναπαράγονται από τα subwoofer. Η επαναφορά όλων των ήχων πραγματοποιείται με τη συνολική αύξηση της στάθμης και σε όλο το ακουστικό φάσμα.



Σχήμα 1. Παράδειγμα 1

Το δεύτερο παράδειγμα είναι από την ταινία Golden Eye (1995), όπου ο Bond τρέχει και στη συνέχεια πηδάει στο κενό πάνω από ένα φράγμα. Ο ήχος ο οποίος μας επαναφέρει, είναι από ένα πιστόλι και η διαφορά στάθμης που καταγράφεται, είναι της τάξης των 44dB. Το συχνοτικό περιεχόμενο κατά την πτώση, αποτελείται αποκλειστικά από χαμηλές συχνότητες (με κορυφές στα 50 και 300Hz), καθώς ακούγεται μόνον ένα βουητό, και με τον πυροβολισμό, επανέρχονται όλες οι συχνότητες του ακουστού φάσματος, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο, λόγω της κρουστικής φύσης του συγκεκριμένου ήχου. Και στις δύο περιπτώσεις επαναφέρεται το σύνολο με ένα ήχο του οποίου η φύση είναι κρουστική: κόρνα, πυροβολισμός.



Σχήμα 2. Παράδειγμα 2

6. Συμπεράσματα & Περεταίρω εργασία

Η σιωπή ως έκφραση του κινηματογραφικού ήχου, ανέκαθεν ενδιέφερε τους δημιουργούς της έβδομης Τέχνης. Από τα παραδείγματα που αναφέρθηκαν, διαφαίνεται η ευρεία εφαρμογή της στα περισσότερα κινηματογραφικά είδη. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο διάλογος ανάμεσα στη σιωπή, την ησυχία και τους άλλους κινηματογραφικούς ήχους (διάλογοι, ατμόσφαιρες, εφέ, Μουσική), ένα πεδίο στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί περεταίρω έρευνα. Η σιωπή και η ησυχία ως ηχοτοπία, σε συνάρτηση με τα θορυβώδη περιβάλλοντα των αστικών κέντρων, θα μπορούσαν να εξεταστούν διεπιστημονικά, αναφορικά με τον τρόπο με τον οποίο τελικά εκλαμβάνουμε την κινηματογραφική ανυπαρξία των ήχων. Από τον πίνακα των παραδειγμάτων διαφαίνεται ότι η λειτουργικότητα της σιωπής και η επιτυχία της χρήσης της, συνδυάζεται συνήθως και με κάποια άλλα -μη ηχητικά- στοιχεία της κινηματογράφησης, όπως η αργή κίνηση, αλλά και με ακουστικά χαρακτηριστικά, όπως η αντήχηση. Επίσης τις περισσότερες φορές η επαναφορά στην κανονικότητα του ηχητικού περιβάλλοντος, πραγματοποιείται με έναν έντονο ήχο. Τα τεχνικά δεδομένα δεν καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί και η σιωπή και η ησυχία στον κινηματογράφο, όμως μπορούν να δώσουν χρήσιμες εκτιμήσεις και κατευθυντήριες για την ορθότερη εφαρμογή τους και την ενσωμάτωσή τους στην αφήγηση. Κατά συνέπεια, η ανάλυση περισσότερων σκηνών, και η παράθεση περισσότερων αποτελεσμάτων, θα ήταν εποικοδομητική.

Αναφορές

- [1] Nyman M., *Experimental Music: Cage and Beyond*, 2nd ed, 1999, Πειραματική Μουσική, μετάφραση Δανάη Στεφάνου, εκδόσεις οκτώ, Αθήνα, (2012)
- [2] Bela Balazs, *Theory of the Film: Sound*, στο *Film Sound, Theory and Practice*, ed. Weis E. and Belton J., Columbia University Press, NY, 1985, σ. 117-119
- [3] Altman R., *Silent Film Sound*, Columbia University Press, (2004)
- [4] Pudovkin V. I., *Asynchronism as a Principle of Sound Film*, στο *Film Sound, Theory and Practice*, ed. Weis E. and Belton J., Columbia University Press, NY, 1985, σ. 86-91
- [5] Camper F., *Sound and Silence in Narrative and Nonnarrative Cinema*, στο *Film Sound, Theory and Practice*, ed. Weis E. and Belton J., Columbia University Press, NY, 1985, σ. 369-381
- [6] Michael Chion, *Ο Ήχος στον κινηματογράφο*, μετάφραση Μαριάννα Κουταλου, Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα, (2010)
- [7] Sonnenschein D., *Sound Design*, Wiese Productions, CA, (2001)
- [8] Salome Voegelin, *Listening to Noise and Silence: Towards a Philosophy of Sound Art*, Continuum International Publishing Group, (2010)

Συνεδρία Β3: Ψηφιακή επεξεργασία ήχου (II)**Έλεγχος αυθεντικότητας ψηφιακού περιεχομένου με βάση τον ήχο**

A. Κατσαουνίδου N. Βρύζας P. Κωτσάκης X. Δημούλας
Υπ. Δρ. Υπ. Δρ. Δρ. Επικ. Καθηγητής
akatsaounidou@gmail.com nvryzas@auth.gr rkotsakis@gmail.com babis@eng.auth.gr

Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε., Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε.
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση τεχνικών ελέγχου της αυθεντικότητας ψηφιακού περιεχομένου, με έμφαση στον ήχο. Ως γνωστό, η ηχητική πληροφορία αποτελεί βασικό συστατικό των σύγχρονων μορφών ψηφιακού περιεχομένου (τόσο σε δημοσιογραφικές δημοσιεύσεις επαγγελματιών όσο και σε υλικό που συνεισφέρουν απλοί «συμμετοχικοί χρήστες»), που συχνά υπόκειται σε ανεπιθύμητα φαινόμενα παραποίησης ή/και σε στοχευμένη δημιουργία ψευδών ειδήσεων. Σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή της προόδου που έχει συντελεστεί σε ερευνητικό και εφαρμοσμένο επίπεδο και η παρουσίαση χαρακτηριστικών παραδειγμάτων και βέλτιστων πρακτικών ελέγχου της αυθεντικότητας ηχητικού και οπτικοακουστικού περιεχομένου. Η έρευνα επικεντρώνεται στη διερεύνηση μεθόδων επεξεργασίας μέσω χαρακτηριστικών παραμέτρων ήχου (features) και τεχνικών μάθησης μηχανής (machine learning).

Audio-Based Digital Content Authentication**ABSTRACT**

The current work investigates authentication techniques of digital content, specialized in the audio modality. As known, the audio information constitutes the basic element of the contemporary digital content (both in professional journalistic reports and in content contributions of "participatory users"), which is subjected to unwanted tampering and/or on purpose content manipulation. The present work focuses on the state of the art review of the current progress in research and application level, bringing forward characteristic examples and best practices towards audio and audiovisual content. The research put emphasis on feature-based audio authentication processes, including machine learning.

Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές σε διάφορους τομείς δραστηριοποίησης του σύγχρονου ανθρώπου, συμπεριλαμβανομένων αυτών της μαζικής ενημέρωσης και διαμεσικής επικοινωνίας. Ως αποτέλεσμα των σύγχρονων αναγκών συνεχούς και άμεσης ενημέρωσης παρατηρείται εκθετική αύξηση των ρυθμών παραγωγής και κατανάλωσης ψηφιακού περιεχομένου, όπου έχει κυριαρχήσει το μοντέλο παραγωγής και συνεισφοράς περιεχομένου από απλούς χρήστες (User Generated Content –UGC model) [1]-[3]. Ανάμεσα σε άλλα, η εξάπλωση του μοντέλου UGC και οι δυνατότητες εύκολης πολυμεσικής επεξεργασίας έχουν οδηγήσει και σε ανεπιθύμητα φαινόμενα παραποίησης περιεχομένου ή/και δημιουργίας ψευδών πληροφοριών και χαλκευμένων ειδήσεων. Καθώς τα ψηφιακά πολυμέσα χρησιμοποιούνται ευρέως στο Διαδίκτυο προκειμένου να παραθέσουν τις πληροφορίες με έναν περισσότερο ελκυστικό τρόπο, η έρευνα, εκτός από την επαλήθευση των εκάστοτε γεγονότων, πρέπει να επικεντρωθεί και στον έλεγχο της αλήθειας και της αυθεντικότητας του ψηφιακού αυτού περιεχομένου. Την παραπάνω ανάγκη επαλήθευσης έρχεται να καλύψει το επιστημονικό πεδίο της Εγκληματολογίας Ψηφιακού Περιεχομένου (Digital Forensics) και δη ο σχετικός κλάδος του ήχου (Audio Forensics), με στόχο τον έλεγχο της αυθεντικότητας ηχητικών καταγραφών και αποσπασμάτων [1], [4]. Ως γνωστό, ο ήχος αποτελεί βασικό συστατικό των σύγχρονων ψηφιακών μέσων (/πολυμέσων), συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της αμεσότητας και παραστατικότητας (συγκριτικά με το κείμενο και τις στατικές εικόνες), καθώς και το πλεονέκτημα των μικρότερων υπολογιστικών και αποθηκευτικών απαιτήσεων (π.χ. έναντι του βίντεο). Σκοπός της εργασίας είναι να καταγράψει την πρόοδο που έχει συντελεστεί σε ερευνητικό και εφαρμοσμένο επίπεδο και να παρουσιάσει χαρακτηριστικά παραδείγματα, που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στην ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών ελέγχου της γνησιότητας ηχητικού και οπτικοακουστικού υλικού.

1. Έλεγχος αυθεντικότητας οπτικοακουστικού περιεχομένου: Θεώρηση του προβλήματος και βιβλιογραφική επισκόπηση

Η επίδραση των τεχνολογιών είναι εμφανής στα περισσότερα «παραδοσιακά» μέσα μαζικής επικοινωνίας, όπου έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές αλλαγές στις αλυσίδες παραγωγής και διανομής με έμφαση στον ηλεκτρονικό τύπο. Μία από τις συνέπειες που έχει ήδη αναφερθεί είναι η έντονη εμφάνιση του φαινομένου της παραπληροφόρησης. Ενώ το εξελιγμένο λογισμικό καθιστά εύκολη και δύσκολα ανιχνεύσιμη την παραποίηση περιεχομένου, η τεχνολογία προσφέρει ολοένα και περισσότερες μεθόδους ανίχνευσης τυχόν επεξεργασίας /παραποίησης, με σκοπό την αποκατάσταση κάποιων επιπέδων εμπιστοσύνης. Διαφορετικές στρατηγικές αξιολόγησης συνδέονται με τις διάφορες μορφές και τα χαρακτηριστικά των ψηφιακών μέσων. Η απλούστερη προσέγγιση επαλήθευσης περιεχομένου συνίσταται στην αξιολόγηση του ευρύτερου περιβάλλοντος πλαισίωσης, δηλαδή στον εντοπισμό αφύσικων δεδομένων μέσω της ανθρώπινης παρατήρησης, και γι' αυτό μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα ήδη περιεχομένου [1], [4]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της παραπάνω προσέγγισης αποτελούν τα συντακτικά λάθη ή/και η απουσία νοήματος στο κείμενο, η απουσία ή η αφύσικη ύπαρξη σκιών ή αντανάκλασεων στην εικόνα, η απότομη διακοπή του ακουστικού παρασκήνιου ή ο απροσδόκητος τονισμός στον ήχο, ο συνδυασμός των παραπάνω

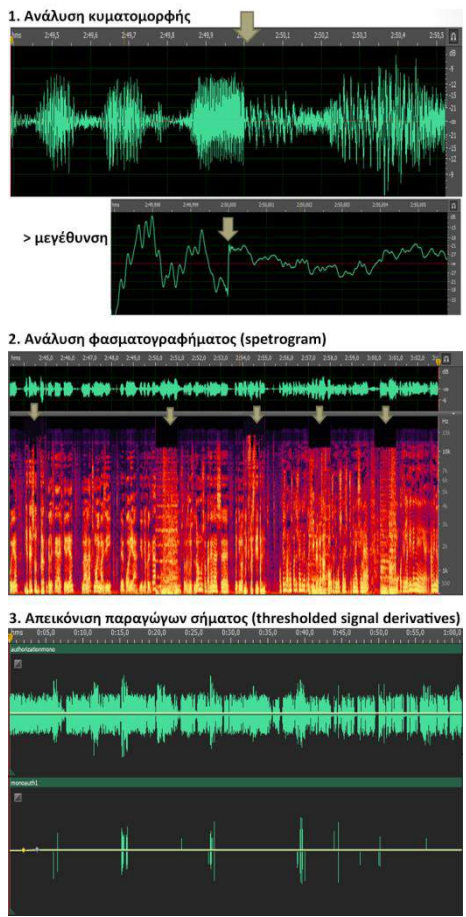
σε καταγραφές βίντεο, κ.ο.κ. [1]-[7]. Εξίσου σημαντικές είναι και οι ημιαυτόματες τεχνικές που εφαρμόζονται όταν η παραποίηση έχει συμβεί σε σημασιολογικό επίπεδο, όπως για παράδειγμα η επαναχρησιμοποίηση του περιεχομένου σε διαφορετικό χώρο και χρόνο από αυτόν της παραγωγής του. Τέλος, υπάρχουν και οι μέθοδοι που δεν κάνουν χρήση της υψηλής ποιότητας πληροφορίες (metadata) αλλά εξετάζουν στα δομικά χαρακτηριστικά του ίδιου του περιεχομένου [1]-[4], [6]-[8].

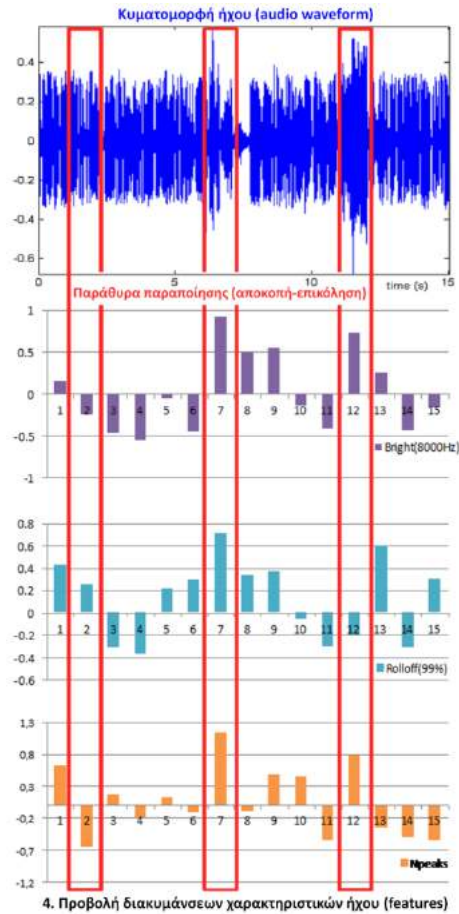
Ο κλάδος audio forensics αρχικά επικεντρώθηκε στα αναλογικά μέσα αποθήκευσης και στα ευρήματα των συσκευών καταγραφής, όπως τα μεταβατικά φαινόμενα εναλλαγής/μεταγωγής της κεφαλής κλπ., προκειμένου να καθοριστεί η ακεραιότητα των ηχογραφήσεων [9]-[11]. Με το πέρασμα στον ψηφιακό κόσμο το πρόβλημα έγινε πιο περίπλοκο, καθώς οι ψηφιακές συσκευές δεν αφήνουν «ορατά αποτυπώματα» / ίχνη εγγραφής [4], ενώ παράλληλα είναι πολύ πιο εύκολη η επεξεργασία /συναρμογή των ψηφιοποιημένων ηχητικών καταγραφών. Έτσι, κατέστη αναγκαία η ανάπτυξη αντίστοιχων μεθόδων αναγνώρισης «πλαστών» αρχείων ήχου (π.χ. μέσω ανάλυσης των παραμέτρων συμπίεσης) [6]-[7]. Εδώ εντάσσονται τεχνικές σημασιολογικής επεξεργασίας, περιγραφής και τεκμηρίωσης του ηχητικού περιεχομένου, με σκοπό τον εντοπισμό ασυνεπειών σε επίπεδο ηχητικών συμβάντων /προτύπων και σε συνδυασμό με τις διάφορες θεματικές /συναισθηματικές κατηγορίες, τους εμπλεκόμενους ομιλητές και το γενικότερο ακουστικό περιβάλλον της ηχογράφησης (π.χ. ταξινόμηση ηχητικών προτύπων, εντοπισμός ομιλητών, ανίχνευση και χρονική κατάτμηση ηχητικών συμβάντων, αναγνώριση ομιλίας και απομαγνητοφώνηση διαλόγων, θεματική και συναισθηματική κατηγοριοποίηση, κ.ά.). Έτσι, οι ηχογραφήσεις μπορούν να υποβληθούν σε ελέγχους (ανάλυση κυματομορφής /φάσματος συχνοτήτων) για την ανίχνευση ασυνήθιστων μεταβάσεων [6], ενώ αξιοποιούν και άλλα ηχητικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στη συσκευή εγγραφής ή/και στον περιβάλλοντα χώρο (π.χ. αλλαγές ακουστικού φόντου, αντήχησης κλπ.), απ' όπου αντλούνται δεδομένα για την ακεραιότητα της φύσης τους [12]-[17]. Άλλες μέθοδοι παρακολουθούν τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου (ENF), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο χρονικής σήμανσης και ταυτοποίησης [18]-[19]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια άλλη προσέγγιση (που χρησιμοποιείται ευρύτατα και στο χώρο της εικόνας) είναι η ανίχνευση διαφορετικών επιπέδων συμπίεσης, που υποδεικνύει ότι διαφορετικά τμήματα του υλικού ανήκουν σε διαφορετικές πηγαίες ηχογραφήσεις. Επί του παρόντος, η έρευνα στον τομέα της ανίχνευσης παραποιημένου περιεχομένου έχει επικεντρωθεί στην ψηφιακή εικόνα και το βίντεο. Στον τομέα του ήχου, παρά την πρόοδο που έχει συντελεστεί, οι μέθοδοι και τα διαθέσιμα εργαλεία «πραγματικού κόσμου» (real world) εξακολουθούν να υπολείπονται απαιτώντας εξειδικευμένη τεχνογνωσία, τεχνικές και εξοπλισμό που δεν διαθέτει ο μέσος χρήστης. Ανάμεσα σε αυτά μπορούν να αναφερθούν τα λογισμικά FAAS (Forensic Audio Analysis System) [24] και EdiTracker Plugin [25].

2. Τεχνικές εντοπισμού ασυνεχειών παραποίησης ηχογραφήσεων με χρήση ηχητικών παραμέτρων (audio features)

Με δεδομένη την πρόοδο των μεθόδων στατιστικής ανάλυσης των επιπέδων ηχητικής συμπίεσης (και αντίστοιχα των ρυθμών ροής ψηφιακών δεδομένων) [20]-[23], η εργασία επικεντρώθηκε στην διερεύνηση τεχνικών βασισμένων στο ίδιο το

ψηφιακό περιεχόμενο (content-based). Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να βρουν εφαρμογή σε πολλά σύγχρονα παραδείγματα, όπως στις περιπτώσεις αποκοπής /επικόλλησης ηχητικών τμημάτων από την ίδια την ηχογράφηση (επομένως, έχοντας παραπλήσια χαρακτηριστικά φόντου, συχνότητας ηλεκτρικού δικτύου ή/και στοιχείων συμπίεσης), που όμως μπορούν να αλλάξουν εντελώς το νοηματικό περιεχόμενο μιας (παραποιημένης) ηχογράφησης. Επίσης, εξετάζεται το σενάριο του «μονόπλευρου ελέγχου» που θεωρείται και ιδιαίτερα απαιτητικό, όπου δηλαδή διατίθεται μόνο η τελική ηχογράφηση προς έλεγχο, χωρίς κάποιο αρχικό ή ενδιάμεσο στάδιο αυθεντικού περιεχομένου (όπως συμβαίνει συχνά στην περίπτωση των εικόνων [1], [7]). Έτσι, η έρευνα οργανώθηκε, αρχικά, στη βάση εκτενών πειραματικών παρατηρήσεων τύπου “trial and error”, αξιοποιώντας διάφορα πραγματικά παραδείγματα διαφορετικής δυσκολίας και πολυπλοκότητας (π.χ. ως προς την παρουσία ομιλίας και μουσικής, ακουστικού φόντου / θορύβου περιβάλλοντος και αντήχησης, μουσικής υπόκρουσης, κλπ.). Παράλληλα, δημιουργήθηκε μια βάση αληθείας (ground-truth) με παραποιημένες και μη ηχογραφήσεις κλιμακούμενης δυσκολίας, επιτρέποντας τον απόλυτο έλεγχο του «επιπέδου παραποίησης», μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης των διαφόρων παραμέτρων μίξης και πολυπλοκότητας που προαναφέρθηκαν. Οι σχετικές παρατηρήσεις περιελάμβαναν την ανάλυση των ηχητικών κυματομορφών και των φασματογραφημάτων τους, καθώς επίσης την απεικόνιση των «χρονικών μεταβολών» μέσω των παραγώγων του σήματος (signal derivatives) και την εξαγωγή χαρακτηριστικών παραμέτρων (audio features), αντίστοιχες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα προβλήματα αναγνώρισης προτύπων και σημασιολογικής επεξεργασίας ήχου [2]-[4], [8], [26]-[27]. Όπως φαίνεται και στο χαρακτηριστικό παράδειγμα του σχήματος 2.1, υπάρχουν σημεία όπου ο εντοπισμός είναι εξίσου εύκολος σχεδόν με όλα τα διαθέσιμα εποπτικά εργαλεία, ενώ σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται συνδυασμός παραμέτρων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανίχνευση των περιοχών που έχει γίνει η παραποίηση.





Σχήμα 2.1 Εμπειρικός εντοπισμός ηχητικών ασυνεχειών βάσει περιεχομένου: 1. ανάλυση κυματομορφής, 2. χρήση φασματογραφημάτων, 3. επεξεργασία παραγώγων σήματος, 4. εξαγωγή χαρακτηριστικών ήχου (features): *Bright(8000Hz)*, *Rolloff(99%)*, *Npeaks*

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την απεικόνιση του σήματος στο χρόνο και το συχνότητα, τα υπόλοιπα εργαλεία ανάλυσης δεν είναι προσβάσιμα από το μέσο χρήστη. Για το λόγο αυτό, η μελέτη συνεχίστηκε με την διεξαγωγή όχι μόνο ποιοτικών αλλά και ποσοτικών αναλύσεων, όπου εξετάστηκε η συμβολή κάθε χαρακτηριστικής παραμέτρου στον εντοπισμό των σημείων παραποίησης, επομένως και στον έλεγχο σχετικά με την ακεραιότητα μιας ηχητικής καταγραφής. Σε πρώτη φάση, χρησιμοποιήθηκαν αποσπάσματα 3 διαφορετικών ραδιοφωνικών εκπομπών και δημιουργήθηκε ένα σήμα δοκιμής διάρκειας 10 λεπτών, στο οποίο περιλαμβάνονται 100sec «πειραγμένων» ηχητικών αποσπασμάτων διαφορετικού επιπέδου δυσκολίας, όπως προαναφέρθηκε. Βασισμένοι σε προηγούμενη εμπειρία ως προς την καταλληλότητα των ηχητικών παραμέτρων ανάλυσης, επιλέχθηκαν συνολικά 37 χαρακτηριστικές τιμές από το πεδίο του χρόνου (αριθμός

περασμάτων από το μηδέν –zero-cross, εντροπία-entropy, ενεργός τιμή-rms κλπ.) και της συχνότητας (συχνότητες roll-off, φασματικές στατιστικές τιμές μέσου όρου-centroid, διασποράς-spread, κύρτωσης-kurtosis κλπ.), καθώς και σφαιρικές ιδιότητες (mel frequency cepstral coefficients-mfccs). Οι τιμές αυτές εξήχθησαν για κάθε κομμάτι του ηχητικού σήματος (audio segment) μέσω παραθυρικής διαδικασίας. Αναλυτική περιγραφή των προαναφερθέντων ηχητικών παραμέτρων και της όλης διαδικασίας μπορεί να βρεθεί στις εργασίες [2]-[3], [26]-[28]. Παρά το γεγονός ότι οι ηχογραφήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στερεοφωνικές, στην παρούσα φάση αποφασίστηκε να μην αξιοποιηθούν παράμετροι βασισμένοι στην στερεοφωνία των σημάτων [28], έτσι ώστε τα συμπεράσματα να είναι εφαρμόσιμα και σε μονοφωνικές καταγραφές (αυξάνοντας παράλληλα τον αριθμό των διαθέσιμων δειγμάτων, επί 2 σε κάθε πείραμα). Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε κατάτμηση του ηχητικού σήματος σε διαφοροποιημένα μήκη παραθύρων (1000ms, 500ms, 250ms) με σκοπό να εξαχθούν ηχητικοί παράμετροι από κάθε ηχητικό δείγμα, διαμορφώνοντας συνεπώς την αντίστοιχη βάση αληθείας (ground truth) σε συνδυασμό με την επισημείωση του κάθε δείγματος (annotation, labeling).

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η κατάταξη των 10 πιο αποδοτικών χαρακτηριστικών αναγνώρισης (για όλα τα μήκη παραθύρων), που πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο “InfoGainAttributeEval” με μετρικές κέρδους πληροφορίας στο λογισμικό WEKA [29].

Πίνακας 2.1 Κατάταξη χαρακτηριστικών ως προς τη συνεισφορά στον εντοπισμό ασυνεχειών

	1000ms	500ms	250ms
1	Rms	Rms	Rms
2	Rolloff(99)	Rolloff(99)	Rolloff(99)
3	Bright(8000Hz)	Mfcc2	Sp_kurtosis
4	Rolloff(90)	Rolloff(20)	Mfcc2
5	Mfcc2	Mfcc12	Bright(8000Hz)
6	Sp_kurtosis	Rolloff(90)	Rolloff(20)
7	Sp_spread	Bright(8000Hz)	Rolloff(90)
8	Mfcc12	Sp_spread	Mfcc12
9	Sp_skewness	Sp_kurtosis	Sp_spread
10	Rolloff(20)	Rolloff(80)	Mfcc9

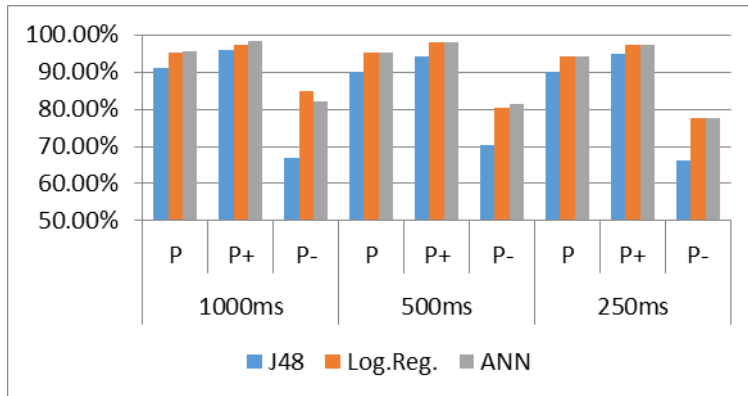
3. Πειραματικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Εκτός από την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών ήχου, τα δεδομένα εισόδου - εξόδου χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση εκπαίδευσης ενός συστήματος ταξινόμησης των χρονικών παραθύρων (σε αυθεντικά και μη) μέσω αλγορίθμων μάθησης μηχανής (machine learning). Σκοπός του υπό ανάπτυξη συστήματος ήταν ο εντοπισμός των τμημάτων στα οποία λαμβάνει χώρα παραποίηση των καταγραφών, κλάση που σημειώθηκε ως c^- (και αντίστοιχα c^+ είναι η κλάση μη

παραποίησης, δηλαδή αυθεντικού τμήματος). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι τα 3 διαφορετικά μήκη παραθύρων (παρέχοντας διαφορετικά επίπεδα χρονικής αναλυτικότητας /ακρίβειας εντοπισμού), ενώ εξετάστηκαν και 3 από τις πλέον κλασσικές /δημοφιλείς «μηχανές ταξινόμησης» (J48 classification algorithm, Logistic regression, Artificial Neural Networks). Η συνολική απόδοση ταξινόμησης P προκύπτει από τη μήτρα σύγχυσης (confusion matrix), ως λόγος του αριθμού δειγμάτων που κατατάχθηκαν σωστά, προς το σύνολο τους [2]-[3], [8], [26]-[29]. Ανάλογα ορίζεται και η απόδοση αναγνώρισης σε κάθε επιμέρους κλάση P⁺ και P⁻. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1 και στο σχήμα 3.1 για όλους τους αλγορίθμους και τα παράθυρα που δοκιμάστηκαν.

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναγνώρισης παραποιημένων και μη τμημάτων

	1000ms			500ms			250ms		
	P (%)	P ⁺ (%)	P ⁻ (%)	P (%)	P ⁺ (%)	P ⁻ (%)	P (%)	P ⁺ (%)	P ⁻ (%)
J48	91,17	96,00	67,00	90,17	94,10	70,50	90,00	94,75	66,25
Log. Reg.	95,33	97,4	85,00	95,08	98,00	80,50	94,08	97,40	77,50
ANN	95,67	98,40	82,00	95,25	98,00	81,50	94,08	97,40	77,50



Σχήμα 3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναγνώρισης παραποιημένων και μη τμημάτων

Κατά την εκπαίδευση εφαρμόστηκε η τεχνική αναδίπλωσης του συνόλου δειγμάτων εισόδου-ελέγχου (k-fold validation), έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ανεπαρκούς γενίκευσης και υπερ-εκπαίδευσης λόγω του σχετικά μικρού πληθυσμού δειγμάτων [2]-[3], [8], [26]-[29]. Ο αριθμός αναδιπλώσεων ορίστηκε σε k=10 (δηλαδή, το σύνολο των δειγμάτων διαιρείται σε 10 υποσύνολα, 9 από τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση και το τελευταίο για έλεγχο της απόδοσης, ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται 10 φορές). Επιπλέον πειράματα

έγιναν με χρήση πολλών διαφορετικών συνδυασμών κυλιόμενων παραθύρων οδηγώντας σε αντίστοιχα αποτελέσματα, που μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα ικανοποιητικά για την παρούσα πιλοτική φάση. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση με σημαντική αύξηση των δειγμάτων εκπαίδευσης και αξιολόγησης, ώστε να μπορούμε να οδηγηθούμε σε ένα γενικευμένο σύστημα ελέγχου της αυθεντικότητας ψηφιακού ήχου, που θα μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε αποκλειστικά ηχητικές καταγραφές όσο και συνδυαστικά σε οπτικοακουστικό και πολυμεσικό περιεχόμενο. Προς την κατεύθυνση αυτή είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική η περαιτέρω εξέλιξη των παραμέτρων και αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία, όπως είναι για παράδειγμα η προσέγγιση κατάτμησης με χρήση των παραγώγων σήματος. Όλα αυτά τα υπο-συστήματα θα μπορούσαν να λειτούργησουν συνδυαστικά ή/και παράλληλα με στόχο τη δημιουργία ενός πολυτροπικού (multimodal) εργαλείου ελέγχου και εντοπισμού παραποιημένου πολυμεσικού υλικού, αξιοποιώντας έτσι το σύνολο των προαναφερθέντων συγκριτικών πλεονεκτημάτων του ήχου.

4. Αναφορές

- [1] Katsaounidou A. & Dimoulas C., “Integrating Content Authentication Support in Media Services”, in *Encyclopedia of Information Science and Technology* (4th Ed.) edited by Dr. Mehdi Khosrow-Pour, IGI global, forthcoming, (2017).
- [2] Kotsakis R., Kalliris G., Dimoulas C., “Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification,” *Speech Communication*, Vol. 54, no. 6, pp. 743-762, (2012).
- [3] C. Dimoulas and A. Symeonidis, “Syncing shared multimedia through audiovisual bimodal segmentation,” *IEEE MultiMedia*, 22(3), 26-42, (2015).
- [4] Malik, H. “Acoustic environment identification and its applications to audio forensics” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 8(11), 1827-1837 (2013).
- [5] Silverman C. (Ed.) *Verification handbook*, European Journalism Centre (2013)
- [6] Gupta, S., Cho, S., & Kuo, C. C. J. “Current developments and future trends in audio authentication. *MultiMedia*”, *IEEE*, 19(1), 50-59 (2012).
- [7] Ho, A. T., & Li, S. (Eds.) *Handbook of Digital Forensics of Multimedia Data and Devices* John Wiley & Sons (2015).
- [8] R. Kotsakis, A. Mislow, G. Kalliris and M. Masiola, “Feature-Based Language Discrimination in Radio Productions via Artificial Neural Training,” *Proceedings of the 10th Audio Mostly*, ACM, (2015).
- [9] D. Boss, “Visualization of magnetic features on analogue audiotapes is still an important task,” in *Proc. Audio Engineering Society 39th Int. Conf. Audio Forensics*, pp. 22–26 (2010).
- [10] D. Begault, B. Brustad, and A. Stanle, “Tape analysis and authentication using multitrack recorders,” in *Proc. Audio Engineering Society 26th Int. Conf.: Audio Forensics in the Digital Age*, pp. 115–12 (2005).
- [11] AES Recommended Practice for Forensic Purposes-Managing Recorded Audio Materials Intended for Examination, AES Standard 27 (1996).
- [12] C. Kraetzer, A. Oermann, J. Dittmann and A. Lang, “Digital Audio Forensics: A First Practical Evaluation on Microphone and Environment Classification,” *In Proceedings of the 9th Workshop Multimedia & Security*, pp. 63-74 (2007).

- [13] R. Buchholz, C. Kraetzer, and J. Dittman, "Microphone Classification Using Fourier Coefficients," *LNCS 5806, Springer*, pp. 235-246 (2009).
- [14] Kurniawan F., Khali M. S., Malik, H. "Robust Tampered Detection Method for Digital Audio using Gabor Filterbank", Proc. *ICIPCS'2015*, pp.75-82 (2015).
- [15] Garcia-Romero D. and Espy-Wilson C. Y. "Automatic acquisition device identification from speech recordings", In *ICASSP 2010*, pp.1806-1809, (2010).
- [16] Malik H. "Acoustic Environment Identification and Its Applications to Audio Forensics" *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, 8(11), pp.1827-1837 (2013).
- [17] H. Malik and H. Farid, "Audio Forensics from Acoustic Reverberation". Proc. *ICASSP 2010*, pp. 1710-1713 (2010).
- [18] C. Grigoras, "Application of ENF Analysis Method in Authentication of Digital Audio and Video Recordings", Proc. *AES 123rd Convention*, paper 1273 (2007).
- [19] A. J. Cooper, "The Electric Network Frequency (ENF) as an Aid to Authenticating Forensic Digital Audio Recordings: An Automated Approach," Proc. *AES 33rd Int'l Conf. Audio Forensic: Theory, and Practice* (2008).
- [20] B. D'Alessandro & Y.Q. Shi, "MP3 Bit Rate Quality Detection through Frequency Spectrum Analysis," Proc. *11th ACM Workshop Multimedia and Security*, ACM Press, , pp. 57-61 (2009).
- [21] Q. Liu, A.H. Sung, and M. Qiao, "Detection of Double MP3 Compression," *J. Cognitive Computing*, vol. 2, no. 4, 2010, pp. 291-296 (2010).
- [22] M. Qiao, A.H. Sung, and Q. Liu, "Revealing Real Quality of Double Compressed MP3 Audio," Proc. *Int'l Conf. Multimedia*, ACM Press, pp. 1011-1014 (2010).
- [23] Ren, Y., Fan, M., Ye, D., Yang, J., and Wang, L. "Detection of double MP3 compression based on difference of calibration histogram", *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-16 (2015).
- [24] Grigoras, C., & Smith, J. M. "Audio Enhancement and Authentication", *Encyclopedia of Forensics Sciences*, (2012).
- [25] http://speechpro-usa.com/product/forensic_analysis/editracker
- [26] Vrysis L., Tsipas N., Dimoulas C., Papanikolaou G., "Mobile Audio Intelligence: From Real Time Segmentation to Crowd Sourced Semantics," *Proceedings of the 10th Audio Mostly*, ACM, (2015).
- [27] Kotsakis R., Kalliris G., Dimoulas C., "Investigation of salient audio-features for pattern-based semantic content analysis of radio productions", Proc. of the *132nd AES Convention*, paper no. 8663, Budapest, Hungary, April 26-29 (2012).
- [28] Kotsakis R., Dimoulas C., Kalliris G., "Contribution of stereo information to feature-based pattern classification for audio semantic analysis", Proc. *SMAP 2012*, pp.68-72.
- [29] M. Hall, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann, I.H. Witten, "The WEKA Data Mining Software: An Update", *SIGKDD Explorations 11*(1), 10-18, (2009).

**ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΧΩΝ ΜΕΣΩ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΗ
ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

Μ. Καλαϊτζή
MSc. Ηλ. Μηχανικός
kalaitzh.maria@gmail.com

Λ. Μαγκαφάς
Καθηγητής
magafas@teikav.edu.gr

*Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ
ΤΕΙ Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης*

Ρ. Κωτσάκης
Δρ. Ηλ. Μηχανικός
rkotsakis@gmail.com

Γ. Καλλίρης
Αναπλ. Καθηγητής
gkal@jour.auth.gr

*Εργαστήριο Ηλεκτρονικών ΜΜΕ
Τμήμα Δημοσιογραφίας & ΜΜΕ
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να προτείνει ένα μοντέλο κατηγοριοποίησης ηχητικών συμβάντων που προέρχονται από ηχητικές πηγές βασικών κατηγοριών μηχανών (γεννητριών, αντλιών και συμπιεστών), τα οποία συναντώνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται βασίζονται κυρίως στην εξαγωγή ηχητικών παραμέτρων από το αντίστοιχο περιεχόμενο, ενώ στη συνέχεια οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση μοντέλων εξόρυξης γνώσης. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιούνται ποικίλα πειράματα σχετικά με την αποδοτικότητα και αξιολόγηση των ηχητικών χαρακτηριστικών, ενώ παράλληλα συγκρίνονται βασικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες αλγοριθμικές τεχνικές μηχανικής μάθησης.

Semantic Classification of Industrial Sounds through Non-Linear Techniques

ABSTRACT

The current paper attempts to propose a classification model of acoustic events deriving from basic electric motors (generators, pumps and compressors), which are found in industrial sites. The methods presented are based mainly on the export of audio features from the corresponding content, and then these properties are used for training data mining models. In this framework, various experiments were made on the effectiveness and evaluation of acoustic characteristics while comparing basic and widely used algorithmic machine learning techniques.

Εισαγωγή

Η ιδέα της εξαγωγής χρήσιμων γνώσεων από όγκους δεδομένων είναι κοινή σε πολλούς κλάδους, από τη στατιστική και τη φυσική, μέχρι την οικονομετρία και τα συστήματα ταυτοποίησης και προσαρμοστικού ελέγχου [1]. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας της πληροφορίας, παράγονται και αποθηκεύονται όλο και περισσότεροι ψηφιακοί ήχοι, εικόνες και βίντεο. Πολλές δημοσιεύσεις επικεντρώνονται στην ανάκτηση και δεικτοδότηση πολυμεσικών δεδομένων, κάτι που αποδεικνύει το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον που υπάρχει, προκειμένου να μπορούν οι πληροφορίες που αποθηκεύονται σε τέτοιου τύπου αρχεία, να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά και αποδοτικά [2], [3], [4].

Η ποσότητα των διαθέσιμων αρχείων ήχου σε βάσεις δεδομένων πολυμέσων, αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς, με αποτέλεσμα η ανάκτηση πληροφοριών από αυτά να γίνεται όλο και πιο δύσκολη [4]. Ο χειρισμός ηχητικών δεδομένων με βάση το περιεχόμενό τους, είναι πλέον καίριας σημασίας, ενώ οι τεχνικές για την τμηματοποίηση, ταξινόμηση, δεικτοδότηση και ανάκτηση αρχείων ηχητικού περιεχομένου είναι απαραίτητες [5].

1. Περιγραφή προβλήματος

Κάθε εξάρτημα ηλεκτρικής μηχανής εκπέμπει κάποιο είδος ηχητικού σήματος, που μπορεί να προέρχεται από τους κραδασμούς ή την τριβή των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων του μηχανήματος [6]. Στους βιομηχανικούς χώρους εργασίας (π.χ. σε γραμμές παραγωγής), παρατηρείται σύνθετο και ποικίλο ηχητικό περιεχόμενο, που προέρχεται από τα εξαρτήματα των μηχανών, το οποίο αξίζει να μπορεί να ανιχνευθεί και να κατηγοριοποιηθεί σε βασικούς άξονες με βάση την πηγή προέλευσης. Στο πλαίσιο αυτό, η αρχική ανίχνευση και μετέπειτα ο εντοπισμός ενός μηχανήματος με βάση τον παραγόμενο από αυτό ηχητικό σήμα, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ορθής ή εσφαλμένης λειτουργίας με έναν αυτοματοποιημένο τρόπο, όπως επίσης και για την αξιολόγηση της λειτουργικής της κατάστασης, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος συντήρησης και βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος [7],[8].

Τα ηχητικά σήματα, ανεξάρτητα από την πηγή προέλευσης μπορούν να χαρακτηριστούν-περιγραφούν από βασικές ιδιότητες, όπως η ένταση, φασματική απόκριση κτλ, οι οποίες συνιστούν την καθαντό πληροφορία με μαθηματικούς-στατιστικούς όρους [9]. Συνεπώς, απαιτείται να προσδιοριστούν ποικιλότροπα ηχητικά χαρακτηριστικά από τα προκείμενα σήματα ενδιαφέροντος, έτσι ώστε να τροφοδοτήσουν εξειδικευμένα μοντέλα ταξινόμησης, τα οποία συχνά απαντώνται στη βιβλιογραφία ως συστήματα τεχνητής νοημοσύνης.

Δεδομένου του πλήθους των ηχητικών σημάτων και της ομοιότητας που μπορεί να εμφανίζουν, η παρούσα εργασία επιχειρεί να προτείνει ένα αρχικό μοντέλο κατηγοριοποίησης ηχητικών συμβάντων από ηχητικές πηγές γεννητριών, αντλιών και συμπιεστών, τα οποία συνιστούν πολύ βασικές κατηγορίες μηχανών. Όπως είναι αναμενόμενο το μοντέλο που επιχειρείται να αναπτυχθεί μπορεί στη συνέχεια να εμπλουτιστεί με νέες κατηγορίες σημάτων από άλλα (δευτερεύοντα) μηχανήματα (ανεμιστήρες, ταινιοδρόμους, γερανογέφυρες, πρέσες), όπως επίσης και να επεκταθεί σε ιεραρχικές δομές των παρόντων ταξινομήσεων (για παράδειγμα

εφόσον προσδιοριστεί σε πρώτο επίπεδο ο ήχος από μια γεννήτρια, στη συνέχεια να ανιχνευθεί η ορθή λειτουργία της).

2. Υλοποίηση

Η μεθοδολογία υλοποίησης που ακολουθήθηκε, περιελάμβανε αρχικά τη συλλογή των ηχητικών δεδομένων καθώς και τις βασικές διαδικασίες προεπεξεργασίας του ηχητικού περιεχομένου. Προτιμήθηκε η συλλογή των δεδομένων να γίνει από διαδικτυακές βάσεις δεδομένων, στις οποίες μπορούν να ανευρεθούν ετερόκλητα ηχητικά σήματα σε σχέση με το κάθε είδος/ κατηγορία της μηχανής. Η έρευνα που διεξήχθη επικεντρώθηκε σε τρεις βασικές κατηγορίες μηχανημάτων, και πιο συγκεκριμένα: γεννήτριες, συμπιεστές και αντλίες (οι οποίες συναντάται στους περισσότερους βιομηχανικούς χώρους). Λαμβάνοντας υπόψη, τη ποικιλότητα στην κωδικοποίηση των ηχητικών αρχείων που υπάρχουν στο διαδίκτυο (επεκτάσεις *.mp3, *.aif, *.wav, *.flac), συγκεντρώθηκε ηχητικό περιεχόμενο σε διαφοροποιημένες διαμορφώσεις, όπως επιλέγει ο κάθε χρήστης ή ιστοσελίδα (συνήθως σε συμπιεσμένη μορφή). Επιπλέον, η διάρκεια των επιλεγμένων ηχητικών σημάτων ποικίλει, εφόσον ο χρόνος λειτουργίας του κάθε μηχανήματος διαφέρει σε κάθε περίπτωση, γεγονός που έπρεπε να ληφθεί υπόψη στο επόμενο στάδιο της προεπεξεργασίας. Συνολικά, συγκεντρώθηκαν 22 αρχεία, από τα οποία, πέντε αφορούσαν ηχητικό περιεχόμενο συμπιεστών, εννέα γεννητριών και οχτώ αντλιών. Μελετώντας αντίστοιχες εφαρμογές και ερευνητικές εργασίες στη βιβλιογραφία σε σχέση με πειράματα μηχανικής εκπαίδευσης, επιλέχθηκε να μετατραπεί το σύνολο των αρχείων ήχου σε μια «ασυμπίεστη» μορφή κωδικοποίησης και πιο συγκεκριμένα, προτιμήθηκε ο μετασχηματισμός στην παλμοκωδική διαμόρφωση Pulse Code Modulation – PCM (*.wav, 44100 Hz, 16 bit), μια από τις πιο απλές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την παραγωγή και επεξεργασία ψηφιακού ηχητικού περιεχομένου. Αναλυτικότερα το στάδιο της προεπεξεργασίας περιγράφεται στο [10]. Επειδή, ο τελικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός γενικευμένου μοντέλου ταξινόμησης των επιλεγμένων κατηγοριών ηλεκτρικών μηχανών, έπρεπε να απαλειφθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της λειτουργίας της κάθε μηχανής, όπως για παράδειγμα η εκκίνηση/στάση κάθε μηχανής. Κατά συνέπεια, τα πειράματα που διεξήχθησαν αφορούν στη διάκριση των ηχητικών σημάτων κανονικής λειτουργίας, τα οποία απαιτούν την πρότερη αποκοπή των ηχητικών δεδομένων που αφορούν «μεταβατικές» καταστάσεις, έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των ηχητικών συμβάντων σε σταθερές/ ομαλές συνθήκες (steady state). Τελικά, μετά τις απαραίτητες αφαιρέσεις ηχητικών δεδομένων, το ηχητικό δείγμα κάθε κατηγορίας είχε διάρκεια 173 δευτερόλεπτα.

Έπειτα, τα διαμορφωμένα ηχητικά αρχεία κατατημήθηκαν σε μικρότερα δείγματα (audio frames), με διαφοροποιημένα μήκη παραθύρων κατάτμησης (1000ms, 500ms, 250ms, 125ms). Η κατάτμηση πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα, με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας ήχων, Adobe Audition, σε ορθογώνια παράθυρα. Σε καθένα από τα μικρότερα αυτά δείγματα αποδόθηκε η αντίστοιχη ετικέτα (label) σε σχέση με την κατηγορία μηχανών, από την οποία προέρχονται (G, C ή P), στο πλαίσιο της διαδικασίας επισημείωσης (annotation) που ακολουθήθηκε με χειροκίνητο τρόπο, διαμορφώνοντας έτσι το σχήμα ταξινόμησης CGP. Κατά αυτό

τον τρόπο προέκυψε ο πληθυσμός/ κατανομή των δειγμάτων, όπως περιγράφεται στον παρακάτω Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Κατανομή Δειγμάτων

Παράθυρο Κατάτμησης	C	G	P	Άθροισμα
1000ms	173	173	173	519
500ms	346	346	346	1038
250ms	692	692	692	2076
125ms	1384	1384	1384	4152

Για κάθε ηχητική μονάδα αρχικά προσδιορίστηκε ένας μεγάλος αριθμός ηχητικών ιδιοτήτων στο πεδίο του χρόνου (time-domain features), στο πεδίο της συχνότητας (frequency-domain features) και στο σαφματικό πεδίο (cepstral-domain features). Πιο συγκεκριμένα, το αρχικό διάνυσμα περιελάμβανε 56 ηχητικές ιδιότητες, οι οποίες περιγράφονται διεξοδικά στο [10]. Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο MIRToolbox (Music Information Retrieval Toolbox), το οποίο λειτουργεί στο πρόγραμμα Matlab R2012b [11], [12]. Δεδομένου του μεγάλου μεγέθους του διανύσματος ηχητικών ιδιοτήτων που εξήχθησαν, πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων μηχανικής εκμάθησης, προηγήθηκε μια διαδικασία αξιολόγησης των χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα, οι ηχητικές παράμετροι κατατάχθηκαν κατά φθίνουσα σειρά με τη χρησιμοποίηση του εξειδικευμένου αλγορίθμου αξιολόγησης InfoGain Attribute Evaluation, στο περιβάλλον του λογισμικού WEKA. Στη συνέχεια, προέκυψε η φθίνουσα κατάταξη του παρακάτω Πίνακα 2.2, στον οποίο για λόγους συντομίας παρουσιάζονται μόνο τα πρώτα 40 χαρακτηριστικά.

Πίνακας 2.2 Πίνακας κατάταξης εξαγόμενων χαρακτηριστικών

Κατάταξη των Ηχητικών Χαρακτηριστικών							
1	sp_flatness	11	Npeaks_temporal	21	brightness_3000	31	mfcc5
2	rolloff_0.9	12	sp_skewness	22	brightness_8000	32	mfcc6
3	sp_centroid	13	sp_spread	23	brightness_4000	33	mfcc1
4	rolloff_0.99	14	Npeaks_spectral	24	brightness_2000	34	mfcc2
5	entropy	15	Rms	25	mfcc3	35	rhythm_clarity
6	rolloff_0.8	16	sp_irregularity	26	mfcc4	36	attackslope_avr
7	zerocross	17	Nonsets	27	brightness_500	37	attackslope_std
8	rolloff_0.5	18	attacktime_avr	28	mfcc8	38	mfcc12
9	rolloff_0.2	19	attacktime_std	29	brightness_1500	39	mfcc11
10	sp_kurtosis	20	Lowenergy	30	brightness_1000	40	mfcc9

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε ο πίνακας ετεροσυσχετίσεων των ιδιοτήτων εισόδου, από τον οποίο προέκυψε η πλήρης ανεξαρτησία των είκοσι πρώτων χαρακτηριστικών του παραπάνω Πίνακα 2.2, τα οποία και επιλέχθηκαν για τα μετέπειτα πειράματα μηχανικής μάθησης.

Στο τελικό βήμα της διαδικασίας, εφαρμόστηκαν ποικίλοι αλγόριθμοι ταξινόμησης. Ως κύρια μέθοδος αναγνώρισης προτύπων χρησιμοποιήθηκε η εκπαίδευση μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks – ANN). Λαμβάνοντας υπόψη αντίστοιχες εφαρμογές και ερευνητικές εργασίες στη βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν τα πολυεπίπεδα συστήματα συνδεδεμένων κόμβων (Multilayer Perceptrons), εφαρμόζοντας τη συνηθισμένη διαδικασία εκπαίδευσης μέσω οπισθοδιάδοσης (back-propagation), εξαιτίας της πολύ καλής επίδοσης και προσαρμοστικότητας σε προβλήματα διαχωρισμού ηχητικών δεδομένων [13].

Λαμβάνοντας υπόψη όμως, πως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται κυρίως σε προβλήματα διαχωρισμού σημάτων ομιλίας, μουσικής κτλ, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον τεχνικές ταξινόμησης, δεδομένου ότι απαιτείται να διαχειριστούν βιομηχανικούς ήχους, οι οποίοι φέρουν βασικές ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα ηχητικά δεδομένα. Επιπρόσθετα, η σύγκριση των μοντέλων θα αναδείξει την πλέον αποδοτική μέθοδο αναγνώρισης προτύπων για τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί. Πιο συγκεκριμένα, διεξήχθησαν ποικίλα πειράματα με ένα πλήθος μη γραμμικών αλγοριθμικών τεχνικών, από τις οποίες όμως διατηρήθηκαν αυτές που συνεισέφεραν τα πιο «ικανοποιητικά» αποτελέσματα. Ειδικότερα, στα παρακάτω πειράματα εφαρμόστηκαν επιπρόσθετα η λογιστική παλινδρόμηση (Log.Reg.) και τα δέντρα αποφάσεων μέσω του αλγόριθμου J48 (J48 Tree). Εκτός όμως από τα μη γραμμικά μοντέλα, επιλέχθηκε να παρουσιαστεί και η γραμμική μέθοδος παλινδρόμησης (Linear Reg.), κυρίως για να συγκριθεί με τις αποδόσεις των υπόλοιπων τεχνικών.

Με βάση τα δεδομένα ελέγχου προσδιορίζονται τα συνολικά ποσοστά κατηγοριοποίησης για κάθε αλγοριθμική μέθοδο (σε κάθε χρονικό παράθυρο), μέσω της μήτρας σύγχυσης που προκύπτει στο τέλος κάθε πειραματικής διαδικασίας. Παράλληλα όμως, υπολογίζονται και οι μερικές (ανά κλάση) αποδόσεις ταξινόμησης, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής ανάλυση/ σύγκριση σε σχέση με την επίδοση κάθε κατηγορίας (γεννήτριες, συμπίεστες, αντλίες). Στα πειράματα που διεξήχθησαν επιλέχθηκε η μέθοδος εκπαίδευσης μέσω αναδίπλωσης του συνόλου δειγμάτων εισόδου (k-fold validation), με αριθμό αναδιπλώσεων $k=10$.

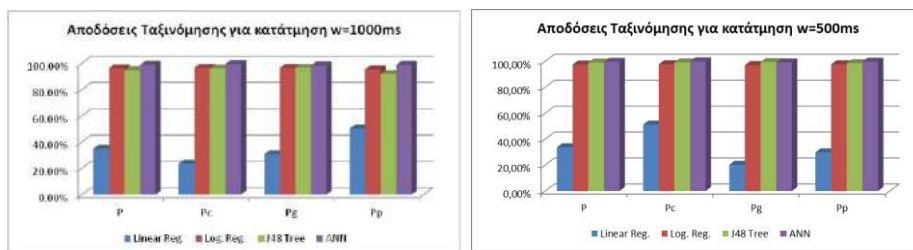
Οι αλγόριθμοι που επιλέχθηκαν, εφαρμόστηκαν για σύνολο 21 ηχητικών ιδιοτήτων για καθένα από τα τέσσερα χρονικά παράθυρα (1000ms, 500ms, 250ms και 125ms), παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Η συνολική απόδοση κατηγοριοποίησης P προσδιορίζεται από την αντίστοιχη μήτρα σύγχυσης, ως ο λόγος του αριθμού των δεδομένων που ταξινομήθηκαν ορθά προς τον συνολικό αριθμό των δειγμάτων εισόδου. Επιπρόσθετα, οι μερικές αποδόσεις ταξινόμησης P_x ($x=C, G, P$) υπολογίζονται με βάση την αναλογία του δεδομένων που κατηγοριοποιήθηκαν ορθά στην εκάστοτε κλάση, ως προς τον αριθμό των δειγμάτων που περιλαμβάνει η κλάση αυτή σύμφωνα με την επισημειωμένη βάση αληθείας, όπως έχει περιγραφεί στον Πίνακα Κατανομής 2.1.

Αρχίζοντας από το παράθυρο $w=1000ms$, παρατηρήθηκε μέγιστη συνολική απόδοση 98.84% μέσω υλοποίησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ενώ η συγκριτική υπεροχή διατηρήθηκε και στις μερικές αποδόσεις των κατηγοριών $C, G,$

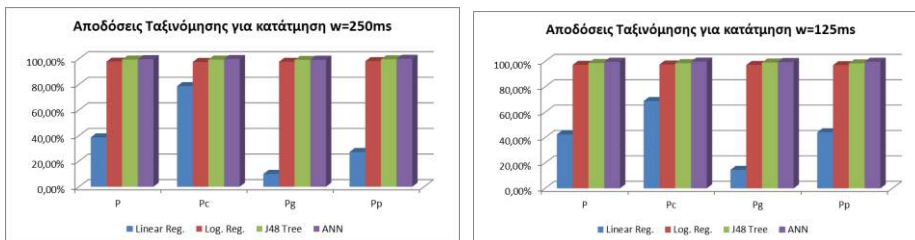
P (99.42%, 98.27%, 98.84%). Στη συνέχεια ακολουθούν οι αποδόσεις της λογιστικής παλινδρόμησης, ακολουθούμενες από τις αντίστοιχες των δένδρων αποφάσεων. Τέλος, πολύ χαμηλά προέκυψαν τα ποσοστά κατηγοριοποίησης μέσω της γραμμικής παλινδρόμησης, καθώς δεν ξεπερνούν συνήθως το 40%.

Για το παράθυρο κατάτμησης $w=500ms$, οι τοπολογίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων σημείωσαν εκ νέου τη μέγιστη συνολική απόδοση (99.61%), καθώς και τις μερικές αποδόσεις των κατηγοριών C και P (100% και 99.71% αντίστοιχα). Όσον αφορά όμως την κλάση G το μεγαλύτερο ποσοστό ταξινόμησης (99.42%) κατέγραψε η μέθοδος δένδρων αποφάσεων, η οποία ξεπερνά τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης για το συγκεκριμένο παράθυρο. Η γραμμική παλινδρόμηση σημείωσε πάλι πολύ χαμηλές αποδόσεις τόσο σε συνολικό επίπεδο όσο και ανά κλάση (περίπου 30% μεσοσταθμικά).



Σχήμα 2.3 Αποδόσεις Ταξινόμησης για κατάτμηση $w=1000ms$ & $w=500ms$

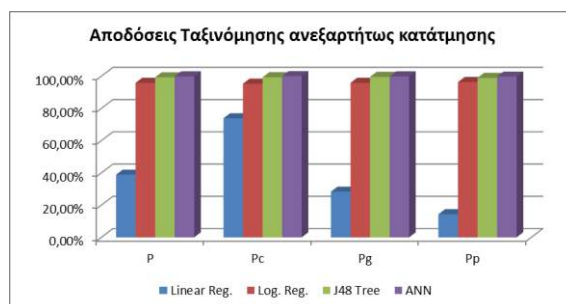
Στα παράθυρα κατάτμησης 250ms και 125ms τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα διατηρούν το συγκριτικό πλεονέκτημα στις συνολικές και μερικές αποδόσεις, ακολουθούμενα από τα δένδρα αποφάσεων και τη λογιστική παλινδρόμηση, ενώ η γραμμική παλινδρόμηση εξακολουθεί να προσφέρει πολύ χαμηλές αποδόσεις.



Σχήμα 2.2 Αποδόσεις Ταξινόμησης για κατάτμηση $w=250ms$ & $w=125ms$

Για να διερευνηθεί περαιτέρω η ανεξαρτησία της χρονικής διάρκειας κατάτμησης σε σχέση με τις καταγραφόμενες αποδόσεις ταξινόμησης, πραγματοποιήθηκε ένα επιπλέον πείραμα, στο οποίο ως βάση αληθείας χρησιμοποιήθηκαν όλα τα δείγματα κάθε κλάσης ανεξαρτήτως της διάρκειας τους (1000ms, 500ms, 250ms, 125ms). Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε κλάση είχαν επισημειωθεί 173 δείγματα διάρκειας 1000ms, 346 δείγματα διάρκειας 500ms, 692 δείγματα διάρκειας 250ms και 1384 δείγματα διάρκειας 125ms, άρα στο επιπρόσθετο πείραμα κάθε κατηγορία C, G, P περιελάμβανε 2595 δείγματα συνολικά. Οι συνολικές και μερικές αποδόσεις που σημειώθηκαν με κάθε αλγοριθμική μέθοδο, απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα. Όπως προκύπτει, οι

αποδόσεις παραμένουν ιδιαίτερα υψηλές (99.87% για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα), γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της ανεξαρτησίας του μήκους παραθύρου από τα ποσοστά κατηγοριοποίησης. Παράλληλα, ιδιαίτερα χαμηλές παρέμειναν οι αποδόσεις της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης, παρά το αυξημένο πλήθος δεδομένων εισόδου, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αναγνώριση ηχητικών προτύπων μοντελοποιείται με νευρωνικά δίκτυα και περαιτέρω έλεγχος για τη μη γραμμικότητά τους θα πρέπει να γίνει με χρήση και άλλων εργαλείων μη γραμμικής δυναμικής όπως με τη Θεωρία τους Χάους.



Σχήμα 2.3 Αποδόσεις Ταξινόμησης ανεξαρτήτως κατάτμησης

3. Συμπεράσματα

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, στις συνολικές αλλά και στις μερικές αποδόσεις, αποδεικνύεται πως η κατηγοριοποίηση βιομηχανικών ήχων μέσω μοντέλων μη γραμμικής δυναμικής είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη δόμηση ενός γενικευμένου μοντέλου ταξινόμησης, ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύονται δυνατοίτες εμπλουτισμού για περαιτέρω ερευνητικές εργασίες.

Ειδικότερα, την υψηλότερη απόδοση στη διάκριση των κλάσεων σημείωσαν οι τοπολογίες των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, σε κάθε μήκος παραθύρου, ενώ ακολουθήσαν, σχεδόν ισότιμα σε απόδοση, τα δένδρα απόφασης και η λογαριθμική παλινδρόμηση.

Επιπρόσθετα, οι πειραματικές διαδικασίες απέδειξαν ότι οι μη γραμμικές μέθοδοι εκπαίδευσης, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα δένδρα αποφάσεων και η λογαριθμική παλινδρόμηση, είναι ικανές να διαχωρίσουν τα ηχητικά σήματα που λάβαμε ως δεδομένα. Αντίθετα, μέθοδοι όπως η γραμμική παλινδρόμηση, απέδωσαν πολύ χαμηλά ποσοστά σε όλα τα εφαρμοζόμενα παράθυρα κατάτμησης, αναδεικνύοντας τη συγκεκριμένη μέθοδο ως ακατάλληλη για την κατηγοριοποίηση των ηχητικών δεδομένων που προκύπτουν από ηλεκτρικές μηχανές.

Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε η ανεξαρτησία του μήκους του παραθύρου κατάτμησης, ενώ παράλληλα, η εξαγωγή και η αξιολόγηση των ηχητικών χαρακτηριστικών ισχυροποίησε την καταλληλότητα του διανύσματος εισόδου.

Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε πως τόσο οι συνολικές όσο και οι μερικές αποδόσεις κατηγοριοποίησης, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των αλγορίθμων στα διάφορα παράθυρα κατάτμησης, υποδηλώνουν την ιδιαιτερότητα των ηχητικών χαρακτηριστικών των ήχων των γεννητριών, των αντλιών και των συμπιεστών αναφορές.

4. Αναφορές

- [1] G. Bontempi, “Handbook Statistical foundations of machine learning”, Universite Libre de Bruxelles, 2013.
- [2] P. Aigrain, H. Zhang, D. Petkovic, “Content-based representation and retrieval of visual media: A state-of-the-art review,” *Journal of Multimedia Tools and Applications*, Vol. 3, pp. 179–202, 1996
- [3] W. Niblack, X. Zhu, J.L. Hafner, T. Breuel, D.B. Panceleon, D. Petkovic, M.D. Flickner, E. Upfal, S.I. Nin, S. Sull, B.E. Dom, B.-L. Yeo, S. Srinivansan, D. Zivkovic and M. Penner, “Updates to the QBIC system,” in *Proceedings of Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Databases VI (SPIE Proceedings Vol. 3312)*, 28–30 Jan., San Jose, California, pp. 150–161, 1998.
- [4] E. Vincent, N. Bertin, R. Gribonval, F. Bimbot, “From blind to guided audio source separation: How models and side information can improve the separation of sound”, *IEEE Signal Processing Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 31 (3), pp.107-115, 2014.
- [5] M. Davy, S.J. Godsill, “Audio information retrieval: A bibliographical study”, Cambridge University Engineering Department, Technical Report CUED/F-INFENG/TR.429, 2002.
- [6] Dr. M.A.A. Rasheed, “ Adoption of Data Mining Technique to find the Condition of an Automobile Machine”, Vol.2, No 1, April 2014.
- [7] G. Amooee, B. Minaei-Bidgoli, M. Bagheri-Dehnavi, “A Comparison Between Data Mining Prediction Algorithms for Fault Detection (Case study: Ahanpishegan co.)”, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 6, No 3, November 2011.
- [8] S. Bhattacharyya, D. Sen, S. Adhvaryu, C. Mukherjee, “Induction Motor Fault Diagnosis by Motor Current Signature Analysis and Neural Network Techniques”, *Journal of Advanced Computing and Communication Technologies (ISSN: 2347 - 2804) Volume No. 3 Issue No.1*, February 2015.
- [9] Z. Liu, Y. Wang, T. Chen, “Audio Feature Extraction and Analysis for Scene Segmentation and Classification”, *Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology*, October 1998, Volume 20, Issue 1, pp. 61-79.
- [10] M. Kalaitzi, “Semantic Classification of Industrial Sounds through Non-Linear Techniques”, unpublished Master Thesis (in Greek), Eastern Macedonia and Thrace Institute of Technology, 2015.
- [11] O. Lartillot, P. Toiviainen, “Mir in matlab (ii): A toolbox for musical feature extraction from audio. In *Proceedings of the 8th International Conference on Music Information Retrieval*, Vienna, Austria, Sept. 23-27, 2007.
- [12] <http://www.mathworks.com/help/index.html>.
- [13] Moody J. E., Hanson S. J., Lippmann R. P., “The effective number of parameters: an analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 4, pp. 847–854, 1992.

Novel Binaural and Transaural Rendering within the Browser

Christos Tsakostas
Dipl. Electrical & Computer Engineer / Athens, GR
christos.tsakostas@aria3d.com

ABSTRACT

Increasingly more users around the globe use the web browser on a daily basis, in mobile and desktop devices. Recent advances in web technologies allow playback and real-time streaming of audio-visual content within the browser and, in parallel, they allow advanced sound manipulation with the Web Audio API. The work presented here explores the possibilities of sound spatialization, exclusively, with the processing power of the browser.

Καινοτόμα Αμφιωτική και Περιωτική Απόδοση στο Πρόγραμμα Φυλλομέτρησης Διαδικτύου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ολοένα και περισσότεροι χρήστες παγκοσμίως χρησιμοποιούν καθημερινά την εφαρμογή φυλλομέτρησης διαδικτύου, σε συσκευές κινητής τηλεφωνίας και υπολογιστές γραφείου. Οι τελευταίες εξελίξεις στις τεχνολογίες ιστού, επιτρέπουν την αναπαραγωγή και την σε πραγματικό χρόνο ροή οπτικοακουστικού υλικού εντός του φυλλομετρητή διαδικτύου και, παράλληλα, επιτρέπουν προηγμένες μεθόδους διαχείρισης του ήχου δια της Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών Ήχου στον Ιστό. Η εργασία που παρουσιάζεται εδώ, διερευνά τις δυνατότητες χωροθέτησης του ήχου, αποκλειστικά, με την επεξεργαστική ισχύ του φυλλομετρητή διαδικτύου.

1. Introduction

The explosion of technology in recent years has drastically affected the way audiovisual media content is stored, streamed, consumed and experienced. No less than ten years ago, it would be hard to imagine that real-time streaming of audiovisual content would be delivered to the devices of millions of users worldwide on a daily basis.

In this new era where web applications are a reality, the browser has certainly become one of the most valuable applications for end-users, for both mobile and desktop devices. With continuously increasing internet connection speeds and device computational power, the web technologies are evolving accordingly. The work presented here explores the possibilities of sound spatialization within the browser. Both binaural rendering via headphones and transaural rendering over two

speakers are considered. The processing is constrained to be: (a) in real-time and (b) only with the processing power of the browser. As far as the audiovisual content is concerned, both local and remote files (e.g. mp3, mp4) and online real-time streaming (e.g. online radio, video, etc.) are considered for spatialization.

2. Spatial Audio

The ultimate goal of Spatial Audio technologies is *Authenticity*; to maximize the immersion of a listener by reproducing the original auditory scene with the highest possible accuracy.

There are various approaches and ongoing research in the field as many industries have special interest in Spatial Audio such as Virtual Reality, Games, Movies, Teleconferences, Audiophiles, i.a.

This work is focused and based on *Binaural Technology* (a.k.a. *Binaural Technique*) and Spatial Audio delivery via headphones or a pair of speakers.

2.1 Binaural Technology

The principle of Binaural Technology has been known for many years [1]. Miniature microphones are placed at the entrances of a human's or dummy head's ear canals. At this point there are two alternatives: (a) either the whole auditory scene is recorded (*Binaural Recording*) or (b) the impulse responses are calculated (at each ear) for a specific sound source location. If (a) the recorded signals or (b) the convolved impulse responses with an anechoic signal (*Binaural Synthesis*) are fed to listener's ears via headphones, then the original auditory scene is perceptually re-created.

These impulse responses, which always come in pairs for the left and right ears, are called *Head Related Impulse Responses* (HRIRs) and their Fourier transformation is called *Head Related Transfer Functions* (HRTFs). The term *HRTF* is most commonly used.

2.2 Transaural and Crosstalk Cancellation

For the proper playback of binaural signals over two speakers, the left loudspeaker should emit sound only to the left ear and the right loudspeaker only to the right ear. In practice, the speakers emit undesired sounds to the opposite ears as well. This phenomenon is called *Crosstalk* and the process of eliminating the undesired signals is called *Crosstalk Cancellation* (XTC). Systems implementing this technique for binaural inputs are called *Transaural*.

XTC can also be successfully applied to regular stereo since it elicits and reveals the inherent ITDs and ILDs of the stereo recording and mixing.

Transaural or XTC rendering extends the sound field beyond the separation of the loudspeakers and widens remarkably the stage -reaching up to 150 degrees or more- depending on the recording.

2.3 Spatially Oriented Format for Acoustics (SOFA)

In 2013 a new data format for storing and exchanging HRTFs was proposed, called Spatially Oriented Format for Acoustics (SOFA) [2], [3]. SOFA is a file format for storing spatially oriented acoustic data like HRTFs and binaural or directional room impulse responses (BRIRs, DRIRs). SOFA has been standardized by the Audio Engineering Society (AES) as AES69-2015. Main HRTF databases, which have been measured and are offered by many research institutes around the globe, are already available under the SOFA format.

SOFA is a novel approach to the exchange of data between researchers and users, but there are severe issues when it comes to using it in real-time web applications. It is rather hard to decode in JavaScript, leading to increased computational effort. For some measurements the size is prohibitive as it can reach up to GBs. There are practical cases where the information may be redundant, such as high arithmetic precision or too many measured positions, thus increasing the size unnecessarily. Finally, no way is provided to easily handle the requests for unmeasured positions.

3. Web Audio API

In October 2014, the World Wide Web Consortium (W3C) released HTML5 as a stable W3C Recommendation, an effort than begun back into 2011 [4]. Along with HTML5, W3C is developing a new application programming interface (API), called the *Web Audio API* (WAA). The specification of WAA has currently (Sep. 2016) been published by the Audio Working Group as a Working Draft. The WAA specification describes a high-level JavaScript API for processing and synthesizing audio in web applications. The primary paradigm is of an audio routing graph where a number of *AudioNode* objects are connected together to define the overall audio rendering [4]. A gentle introductions to Web Audio API is given in [5].

3.1 AudioContext

The heart of WAA is the *BaseAudioContext* interface. Two interfaces extend the base: (a) the *AudioContext*, which is used for real-time rendering and (b) the *OfflineAudioContext*, which is used for offline rendering.

The *AudioContext* supplies all the required methods to create and connect *AudioNodes* forming an *Audio Graph*. Common Audio Graphs consist of *Sources*, *Processors* and *Sinks*.

A pragmatic audio graph should have at least one sound source connected to a sink. Depending on the processing requirements, additional processor nodes may be inserted in between.

In most of the cases only one *AudioContext* should be used per document.

3.2 Sources

Sources can be classified in two major categories: (a) *Synthetic* and (b) *Audiovisual Media Content*. *Audiovisual Media Content* can be further classified to: (i) *Local Media Files* at the device (i.e. mp3, mp4, etc.), (ii) *Remote Media Files* served from a Web / Ftp Server, (iii) *Remote Media Streams* (i.e. SoundCloud,

Netflix, YouTube, Radio, etc.) and (iv) *Local Media Streams* (i.e. WebCamera, Microphone, etc.)

Audiovisual Media Content sources are initially decoded with HTML5 APIs / Tags (*FileApi*, *XHR*, *audio & video tags*) before they are fed to WAA.

3.3 Processors

Processors carry out the actual audio transformations. They can be classified in the following categories: (a) *Basic Operations* (*GainNode*, *DelayNode*, *StereoPannerNode*), (b) *FIR & IIR Filters* (*ConvolverNode*, *BiquadFilterNode*, *IIRFilterNode*), (c) *Effects* (*WaveShaperNode*), (d) *Channel Management* (*ChannelSplitterNode*, *ChannelMergerNode*), (e) *Spatialization* (*PannerNode*, *AudioListener*), (f) *Post-Processing* (*DynamicsCompressorNode*) and (g) *Custom Processing* (*ScriptProcessorNode*, *AudioWorkletNode*).

3.4 Sinks

There are three types of Sinks: (a) the *AudioDestinationNode*, which is routed to a real-time output device and renders audio directed to the user, (b) the *MediaStreamAudioDestinationNode*, which is an audio destination representing a *MediaStream* that can, for example, be sent to a remote peer and (c) the *AnalyserNode*, which represents a node able to provide real-time frequency and time-domain analysis information, mostly, for visualizations and not for audio processing, as the audio stream will be passed un-processed from input to output.

3.5 About WAA's Spatial Audio

WAA supports Spatial Audio with the *PannerNode* interface. *PannerNode* supports spatialization via "equalpower" or "HRTF" modes.

For the "HRTF" mode, WAA Spatial Audio implementations have some major limitations, being: (a) There is no way to choose specific HRTFs, (b) it is unknown what HRTFs are supported by each browser, (c) there is no way to support custom HRTFs or even more complex filters, such as Binaural Room IRs and (d) Spatial Audio is supported only for headphones and not over Speakers (No Crosstalk Cancellation). A more analytical insight of the limitations is given by Carpentier [6]. It seems that WAA's Spatial Audio is mostly targeted to games rather than advanced audio applications.

3.6 About Custom Processing in WAA

In certain cases, the default *AudioNodes* provided by WAA are not adequate for the required audio processing, e.g. clipping detection is not directly provided by the API.

For such cases, WAA offers the *ScriptProcessorNode*, which can generate, process, or analyze audio directly using JavaScript. *ScriptProcessorNode* though, is already deprecated and replaced by the *AudioWorkletNode*, which is not yet implemented in major browsers. The major drawback with *ScriptProcessorNode* is that it runs on the main UI thread, introducing audio glitches and latency for

complex audio operations. Consequently, alternative approaches should be thoroughly examined and possibly followed, when custom processing is a necessity. A proposal is presented here in section 4.2 of this paper.

4. Spatial Audio Web Media Player

During this work a web media player was developed, rendering *Custom* Spatial Audio with WAA bypassing the default limited spatialization of WAA. The player's implementation approach was bounded by the following requirements: (a) Real-time and responsive system, (b) utilize -exclusively- the processing power of the browser with no extra software installation, (c) focused on Regular Stereo enhancement, (d) render Spatial Audio via Headphones and (e) render Spatial Audio over a pair of Speakers.

For real-time binaural and transaural rendering under the above prerequisites, the challenges are numerous. While processing audio in JavaScript, it is extremely challenging to get reliable glitch-free audio, while achieving a reasonably low-latency especially under heavy processor load [4]. Because of the above limitations, alternative and/or complementary solutions are proposed.

Putting it all together, in order to meet the above requirements, the following technical issues must be resolved: (a) advanced audio operations should not be limited by the poor performance of JavaScript, (b) usage of *ScriptProcessorNode* should be minimized, if possible completely avoided, (c) the size and computational effort related to HRTFs should be reduced and (d) last but not least, both the architectural structure and the user experience should be characterized by simplicity.

4.1 Performance

Emscripten [7] is set of tools, which converts C++ code to highly optimized JavaScript. As a first step the C++ code is converted to LLVM [8]. The core of LLVM is the intermediate representation (IR), a low-level programming language similar to assembly. The intermediate representation is then converted to asm.js [9]. Ams.js is an extraordinarily optimizable, low-level subset of JavaScript. The produced JavaScript code is executed around 2X slower than native, or less, being comparable to Java and C# and significantly faster than usual Javascript code written by a human.

4.2 Custom Processing

For convergent systems it is possible to bypass the necessity of custom processing, by substituting it with convolution, which is offered by WAA and is highly efficient. The idea is to (a) implement the heavy calculation in C++, (b) feed the implementation with a delta impulse, (c) capture the output impulse response and (d) use it with a *ConvolverNode*.

4.3 HRTF

For real-time web applications, HRTFs should be optimized for both size (to minimize network latencies and memory footprint) and computational effort (to maximize response time and minimize energy consumption).

Size can be optimized by (a) storing impulse responses in 16-bit numbers requiring only 2 bytes, instead of floating point numbers requiring 4 bytes, (b) by removal of the positions that will never be used (e.g. in HRTF-based crosstalk cancellation only a few positions are required), (c) use only the positions of the left or right hemisphere and flip the measured impulse responses for the symmetric positions.

Computational effort can be saved for the cases of (a) resampling and (b) requesting unmeasured positions.

Instead of resampling in real-time, HRTFs can be resampled offline and loaded according to WAA's sample rate (usually 44.1 KHz or 48 KHz).

In interactive applications, any position of a sound source can be requested. If a position is not measured, then there are two basic solutions: (i) either interpolate the IRs of the neighboring positions or (ii) use the IRs of the closest measured position. The latter approach is followed here.

In this work a custom HRTF file format was developed, capable of solving the size and computation issues described earlier. The principal idea behind the format is to align the measured HRTFs in a consecutive memory block tracked by an index (1... N). A key-value map correlates pairs of azimuths and elevations (keys) to the corresponding measured indices (values). The pairs of azimuths and elevations cover a full sphere surrounding a listener, with a resolution on one degree.

4.4 Spatial Audio for Headphones

The player supports Spatial Audio for Headphones (*Headphones-Based Auralization*). Headphones Spatialization is primarily based on convolution with anechoic HRTFs and *Binaural Room Impulse Responses* (BRIRs). Listening to the result of convolution with measured BRIRs is also called *Binaural Room Scanning* (BRS) *Auralization*.

Concerning the placement of the virtual sound sources, connected with the stereo input, multiple topologies are allowed leading to various levels of externalization. There is ongoing work focused on identifying the exact topologies, that maximize the externalization for regular stereo inputs.

Regarding performance, studies inducted so far have used up to six virtual sound sources, which were easily handled by a modern laptop.

4.5 Spatial Audio for Speakers

The player also supports Spatial Audio for a pair of Speakers with XTC. Two methods are currently available: (a) Recursive Ambiophonic Crosstalk Elimination (R.A.C.E.) as described by Glasgal & Miller [10] and (b) HRTF-Based with Frequency Dependent Regularization as described by Kirkeby et al. [11]. For both methods, the XTC filter coefficients are calculated in real time within the browser.

Other variations and methods are also being currently investigated.

4.6 Architecture

The application is decomposed into a clear layered architecture (Fig. 1), supported by (a) a Single Page Application (SPA) (b) re-usable web UI components, (c) plugin-based web audio processing, (d) separate Spatial Audio signal processing library in C++ and (e) backend-server managing the sharing of resources. The system is additionally supported by the required databases and offline tools (mostly for HRTF conversions). The UI layout and components follow Google's material design specification [12].

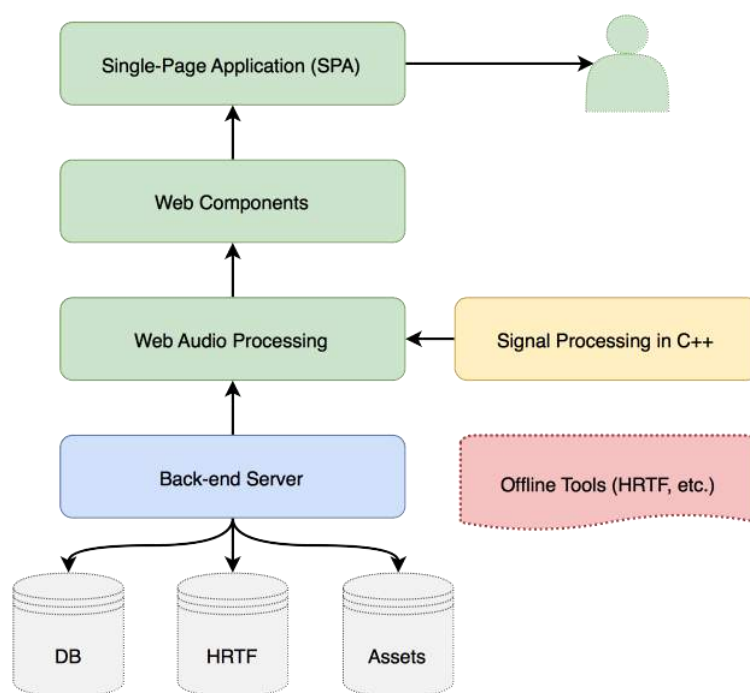


Figure 1: Architectural overview of the Spatial Audio Web Media Player.

5. Conclusions

Despite the aforementioned technical difficulties, it is actually feasible to render binaural and transaural or XTC audio within the browser and a novel spatial audio web media player was implemented supporting both audio and video. Technical solutions were proposed for performance increase, saving of computational effort and minimization of network latency and memory footprint.

Ongoing work is focused on the following directions: (a) further optimization of the performance & minimization of the computational effort, (b) wider and cleaner stages for speakers, while maintaining the original audio quality, (c) improved headphones externalization by experimenting with various topologies and (d)

extension of the core engine, in order to be usable in other applications and industries, such as Virtual Reality, Games, Teleconferences, etc.

Future plans also include real-time Binaural Mixing and Space Simulation with *Cross-Native-Web* applications sharing one codebase, based on previous work of the author [13], [14], [15].

6. Acknowledgments

The author would like to thank Dr.-Ing. Christian Hoene, founder and director of Symonics GmbH, for his valuable and helpful comments on this text.

7. References

- [1] Blauert, J., Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization, 2nd, enlarged ed. MIT Press, Cambridge MA. (1997)
- [2] AES69-2015: AES standard for file exchange - Spatial acoustic data file format, <http://www.aes.org/publications/standards/search.cfm?docID=99> (2013)
- [3] SOFA Conventions. <http://sofaconventions.org>
- [4] Web Audio Api, Specification <https://webaudio.github.io/web-audio-api/>
- [5] Web Audio API, Boris Smus, <http://chimera.labs.oreilly.com/books/1234000001552>
- [6] Thibaut Carpentier, Binaural synthesis with the Web Audio API, 1st Web Audio Conference (2015)
- [7] EMSRIPTEN, <https://kripken.github.io/emscripten-site/index.html>
- [8] LLVM, <http://www.llvm.org/>
- [9] ASM.JS, <http://asmjs.org/>
- [10] Ralph Glasgal and Robin Miller, True-To-Life Sound Reproduction Using Recursive Ambiophonic Crosstalk Elimination, http://www.ambiophonics.org/Tutorials/RGRM-RACE_rev.html
- [11] Kirkeby, Ole; Rubak, Per; Nelson, Philip A.; Farina, Angelo, Design of Cross-Talk Cancellation Networks by Using Fast Deconvolution, AES Convention:106 (May 1999)
- [12] Google Material Design Specification: <https://material.google.com/#>
- [13] Tsakostas, C., Floros, A. Real-time Spatial Representation of Moving Sound Sources. AES Convention: 123 (October 2007), Paper Number: 7279
- [14] Tsakostas, C., Floros, A. Optimized Binaural Modeling for Immersive Audio Applications. AES Convention: 122 (May 2007), Paper Number: 7100
- [15] Tsakostas, C., Floros, A., Deliyiannis, Y. Real-time Spatial Mixing Using Binaural Processing. Proceedings SMC'07, 4th Sound and Music Computing Conference

Συνεδρία Α4 : Ηχοτοπία (II)

Προς τη δημιουργία μιας εργαλειοθήκης υψηλής / χαμηλής τεχνολογίας για την έρευνα του ήχο-οσμo-τοπίου.

K. Chourmouziadou
Architect Engineer, MArch, PhD,
Teach. Associate, Hel. Open University,
5 Omirou str., Thessaloniki, Greece
k.chourmouziadou@windowslive.com

K. Sakantamis
Architect Eng., Assistant Professor,
School of Architecture, A.U.Th
5 Ag. Theodoras str., Thessaloniki,
Greece k.sakantamis@live.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έρευνα «Περπατώντας στην πόλη της Θεσσαλονίκης» επικεντρώνεται στον τρόπο κατά τον οποίο η αντίληψη του αστικού τοπίου της Θεσσαλονίκης διαμορφώνεται κυρίως μέσω της ακοής, της όρασης και της όσφρησης.

Το άρθρο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας σειράς εργαλείων για την καταγραφή ηχο-οσμο-περιπάτων με χρήση υψηλής και χαμηλής τεχνολογίας αναλογικών και ψηφιακών μέσων (επεκτάσεις για το βίντεο - σύλληψη ήχου και μετρήσεις στάθμη ηχητικής πίεσης), τα οποία ο ερευνητής χρησιμοποιεί κατά τη διαδικασία της τεκμηρίωσης, μετατρέποντας τον σε κυβερνο-οργανισμό – cyborg. Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης, η έρευνα επεκτείνεται για τις δυνατότητες που προσφέρουν νέα ψηφιακά μέσα / τεχνολογίες για την αναπαραγωγή της εμπειρίας του περιπάτου. Το παρόν έγγραφο επικεντρώνεται τελικά στην καινοτομία που προσφέρουν οι ΤΠΕ σε ανάλογες προσεγγίσεις διερεύνησης του αστικού τοπίου, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στα πλαίσια της συμμετοχικών διαδικασιών στον αστικό σχεδιασμό

Towards a Hi/Low-Tech Sound-smell-walk Toolkit

ABSTRACT

The on-going research project: "Walking in the city of Thessaloniki", focuses on how the perception of Thessaloniki's cityscape is mostly shaped through hearing, vision and smell.

This paper focuses on the development of a sensewalk toolkit with hi/low-tech, analogue and digital media that researchers utilise during the process of documentation (extensions for video - audio capture and sound pressure level measurements), ultimately becoming a cyborg. In the process of analysis, the research expands on the possibilities that new digital media/technologies offer for reproduction of the experience. This paper ultimately focuses on the innovative role

Εισαγωγή

Το άρθρο εστιάζει στην ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ / ICT) και στο ρόλο που αυτή μπορεί να έχει στην ανάπτυξη εργαλείων και μεθοδολογιών για την έρευνα των διαστάσεων του ήχου και της οσμής στην αντίληψη του τοπίου. Η ενασχόληση των συγγραφέων με το θέμα έχει ως αφετηρία το εν εξελίξει ερευνητικό πρόγραμμα: «*Περπατώντας στην πόλη της Θεσσαλονίκης*», μέρος του οποίου έχει ήδη παρουσιαστεί στο πλαίσιο του συνεδρίου «*Ακουστική 2014*» [1]. Η έρευνα εκπονείται υπό την αιγίδα του Τμήματος Αρχιτεκτόνων της Π.Σ., του ΑΠΘ, με τη συνεργασία του ArchSix – Architecture Studio και του Πανελληνίου Συνδέσμου Τυφλών. Η έρευνα επικεντρώνεται στον τρόπο κατά τον οποίο η αντίληψη του αστικού τοπίου της Θεσσαλονίκης διαμορφώνεται κυρίως μέσω της ακοής, της όρασης και της όσφρησης.

Η έρευνα επεκτείνεται σε προηγούμενες εργασίες των συγγραφέων, ως μέρος της διεθνούς δράσης *COST TUD Action TD0804: Soundscape of European Cities and Landscapes*. Η μεθοδολογία της έρευνας αποτελείται από ηχο-οσμο-περιπάτους και επιτόπιες μετρήσεις και καταγραφές. Η αντίληψη των οσμών και των ήχων, στο αστικό περιβάλλον, παρακολουθείται μέσω ενός ερωτηματολογίου που συνδυάζει: i) το *Swedish Soundscape Quality Protocole*, προσαρμοσμένο στην ελληνική γλώσσα και ii) χάρτη οσμοπεριπάτου, με αποτέλεσμα το συνδυασμό ήχο-περιπάτου και οσμο-περιπάτου. Η έρευνα διεξάγεται τόσο μέσω περιπάτων με ομάδες εθελοντών όσο και μέσω ατομικών συνεντεύξεων-περιηγήσεων με τη συμμετοχή ατόμων με μειωμένη οπτική αντίληψη.

Κύριος στόχος της έρευνας είναι η συνδυαστική μελέτη της εμπειρίας του αστικού τοπίου της Θεσσαλονίκης εστιάζοντας στις αισθήσεις τις όρασης, της ακοής και της όσφρησης, ως μέρη της συνολικής εμπειρίας της πόλης. Επεκτείνοντας αντίστοιχες φαινομενολογικές προσεγγίσεις στην εξέταση του χώρου και της πόλης, η έρευνα εστιάζει στην εμπειρία και κυρίως στην προτίμηση ή δυσαρέσκεια του κοινού για συγκεκριμένα περιβάλλοντα όπως και στην ποιότητα συγκεκριμένων τοπίων που αποτιμώνται συνολικά με θετικό τρόπο.

1. Η προσέγγιση του ηχο-οσμο-τοπίου ως μέρος συμμετοχικών διαδικασιών στον αστικό σχεδιασμό

Η μεθοδολογία των ηχο-οσμο-περιπάτων εντάσσει το υποκείμενο στο πραγματικό περιβάλλον και ως εκ τούτου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτρέψει τη μοναδιαία απάντηση σε σχέση με συγκεκριμένα ερωτήματα όπως η επιρροή της όρασης στην ακοή – και αντίθετα [2]. Η πειραματική συνδυαστική διερεύνηση των παραμέτρων της ακουστικής, οσφρητικής και οπτικής αντίληψης έχει ως άνωτερο στόχο την ανάπτυξη μεθοδολογιών για τη συνολική αποτίμηση της εμπειρίας της πόλης, ως μέρος μιας συνολικότερης στρατηγικής για την εκκίνηση συμμετοχικών διαδικασιών για τον ανασχεδιασμό της [3]. Εν αντιθέσει με προσεγγίσεις

συμμετοχικού σχεδιασμού που διερευνούν την απόκριση του κοινού σε εναλλακτικές σχεδιαστικές προτάσεις, η προσέγγιση που ηχοτοπίου – οσμοτοπίου επιτρέπει τον εντοπισμό προβλημάτων και τη συνδιαμόρφωση στόχων προς την επίλυσή τους, μέσω μιας προσέγγισης θεμελιωμένης θεωρίας (grounded theory) στον αρχιτεκτονικό και αστικό σχεδιασμό [4].

Η ιδιαίτερη αξία αυτής της «αισθητικής» προσέγγισης στον συμμετοχικό αστικό σχεδιασμό έγκειται και στο γεγονός της, επί του παρόντος, μεγάλης απήχησης της ως προσέγγισης στην ανάδειξη των ιδιαίτερων εμπειριών που μια πόλη έχει να προσφέρει – ιστορικοί, φωτογραφικοί, περίπατοι – δρόμοι γεύσεων, κλπ. Η παρούσα έρευνα έχει βραβευθεί με 1^ο βραβείο στον διαγωνισμό ιδεών που διοργάνωσε του μουσείο ΝΟΗΣΙΣ «Μαθαίνω από την πόλη μου», (Grundvíg, “The city is my learning space” <http://www.thecityismylearningspace.eu/>). για την πρόταση: “Thessaloniki sensescapes”, η οποία πρότεινε την υπό διερεύνηση ηχοοσμό-διαδρομή ως μέσο εναλλακτικής ανάγνωσης της πόλης για το ευρύ κοινό, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες μάθησης που προσφέρει τόσο στους συμμετέχοντες (εθελοντές) όσο και στους επιστήμονες η εκπονούμενη έρευνα (http://www.thecityismylearningspace.eu/wp-content/uploads/2015/01/photo-Idea-contest_NOESIS.pdf).

2. Τόποι, σύγχρονα τοπία και τεχνολογία

Η τεχνολογία αποτελεί πλέον ένα σχεδόν αναπόσπαστο τμήμα της καθημερινότητάς μας αλλά και της ίδιας της εμπειρίας του αστικού τοπίου. Στη συνήθη πλέον πρακτική της δημιουργίας ενός προσωπικού ηχοτοπίου μέσω ακουστικών / ακρόασης μουσικής ή πληροφοριών διαδρομής, ήρθαν πρόσφατα να προστεθούν η τεχνολογία καθαρής φωνής, ευρέως διαδεδομένη πλέον στην κινητή τηλεφωνία, (<https://www.cosmote.gr/mobile/cosmoportal/page/T37/section/HD-Voice>) και η λιγότερο διαδεδομένη (αλλά σταδιακά ευρύτερα διαθέσιμη / σε χαμηλές τιμές) αντίστοιχη τεχνολογία ακύρωσης θορύβου μέσω αντίστοιχων ακουστικών (<http://www.pcmag.com/article2/0,2817,2115378,00.asp>). Η διαπλοκή αναλογικού και του ψηφιακού κόσμου μέσω φορητών συσκευών, η διάδοση των ευρυζωνικών δικτύων (wifi-4G), ακόμα και οι επεκτάσεις της ίδιας της οπτικής αντίληψης μέσω drones ή selfie-sticks δημιουργεί νέες εμπειρίες και νέους τρόπους αποτύπωσής τους – επιτρέποντας πρωτοφανή έλεγχο του περιβάλλοντος και της ψηφιακής αναπαραγωγής του μέσω της τεχνολογίας.

Η συν-διαμόρφωση και ο πολλαπλασιασμός της εμπειρίας του τοπίου δημιουργείται μέσω των πολλαπλών καταγραφών και αναπαραγωγών του που με τη σειρά τους συγκροτούν διακριτό τόπο στον ψηφιακό κόσμο, που δημιουργεί προσδοκίες και προσφέρεται προς «κατανάλωση» σε μία “transmedia” πραγματικότητα (<http://flix.gr/articles/transmedia-o-misel-regiak-milhse-sto-ifa-gia-th-ne.html>). Όπως υποστηρίζει ο Zygmunt Bauman, ο σύγχρονος κόσμος χαρακτηρίζεται από μία “ρευστή νεωτερικότητα” ή “liquid modernity” [5], όπου η βιωμένη εμπειρία συγκροτείται ταυτόχρονα τόσο στον «πραγματικό» όσο και στον ψηφιακό κόσμο – στην πράξη επιβεβαιώνεται η έρευνα πρωτοπόρων μελετητών της διάδρασης πραγματικού και ψηφιακού κόσμου όπως ο Steve Mann (Καθηγητής Ηλ. Μηχ/κων και πληροφορικής, Τορόντο - aka Cyberman).

3. Αποτύπωση και αναπαραγωγή Ήχου, Οσμής και Εικόνας

Η εμπλοκή της τεχνολογίας στην έρευνα του ηχοτοπίου είναι δεδομένη. Η δυνατότητα καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου ήταν θεμελιώδης για την ανάπτυξη της προσέγγισης. Τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας στοχεύουν στην πληρέστερη τεκμηρίωση – τριγωνοποίηση [6] - των συνθηκών υπό τις οποίες διεξάγονται οι περιπάτοι. Κύριος στόχος της επιλογής εργαλείων αντικειμενικής καταγραφής ήταν αυτά να μπορούν να συλλάβουν την εμπειρία προσφέροντας τη δυνατότητα αναπαραγωγής της με έναν - όσο το δυνατόν - αδιαμεσολάβητο τρόπο. Πρόκληση για την έρευνα αποτελούν οι τεχνολογίες της πανοραμικής αποτύπωσης της εικόνας (φωτογραφίας – video) όσο και της «τρισδιάστατης» καταγραφής του ήχου, μέσω ευρέως διαθέσιμων εργαλείων. Επιπλέον, καίριος στόχος της έρευνας ήταν να καταλήξει στο σχεδιασμό μιας εργαλειοθήκης που θα ήταν χρηστική για μη εξειδικευμένους στην ακουστική μελετητές του δομημένου περιβάλλοντος – φοιτητές αρχιτεκτονικής / υπαλλήλους της πολεοδομίας – συνυπολογίζοντας τη διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος. Τελικός στόχος είναι η καταγραφή και ανάπτυξη δεδομένων που θα απευθύνονται τόσο σε ειδικούς ακουστικούς – όσο και σε μελετητές του δομημένου περιβάλλοντος όσο - και στο ευρύ κοινό, για λόγους ευαισθητοποίησης – περαιτέρω εμπλοκής του στα προβλήματα της πόλης.

Πέρα από την καταγραφή της εμπειρίας μέσω ερωτηματολογίων, που επιλέχθηκαν για την ευχρηστία τους από μη ειδικούς [1], η ανάγκη καταγραφής της εμπειρίας με όσο το δυνατό αδιαμεσολάβητο τρόπο οδήγησε σε έρευνα προτύπων – state of the art – τεχνολογιών αιχμής στην εξέλιξη καταγραφής και αναπαραγωγής ήχου και εικόνας. Σε αυτό το σημείο, η παρούσα έρευνα διαφοροποιείται σημαντικά από άλλες προσεγγίσεις εργαστηριακής αποτίμησης του ηχοτοπίου μέσω απλής ηχητικής καταγραφής - φωτογραφικής αποτύπωσης.

Υπόδειγμα για την έρευνα αποτελεί το έργο “Hello Again”, η δημιουργία του σκηνοθέτη Chris Milk σε συνεργασία με τον Beck – ο οποίος διασκεύασε και εκτέλεσε το “Sound and Vision” του David Bowie. Έχοντας συγκεντρώσει πολλαπλά βραβεία για την πρωτοτυπία και για την επαναστατική νέα αντιμετώπιση της καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου, η παραγωγή του Hello Again έκανε για πρώτη φορά χρήση πανοραμικών 360° καμερών, ενώ σχεδίασε - εκ νέου - το πρώτο 360° σύστημα καταγραφής αμφιωτικού ήχου (Σχήμα 3.1). Η παραπάνω καταγραφή συνδυάζεται με σύστημα πλοήγησης εντοπισμού του προσώπου του παρατηρητή – κατά την αναπαραγωγή της εμπειρίας – για μια πρώτη-του-είδους, καθηλωτική οπτικοακουστική εμπειρία.

Δυστυχώς αντίστοιχα υποδείγματα είναι σπάνια στον κόσμο των οσμών. Ο παραδοσιακός στόχος της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη χημική σύνθεση του αέρα και μπορεί να παράγει δείκτες (π.χ. AQI - δείκτης ποιότητας του αέρα) αλλά δεν μπορεί με κανένα ουσιαστικό τρόπο να μεταφέρει την αντίληψη του οσφρητικού περιβάλλοντος. Ενδεικτικό του αρχικού σταδίου στο οποίο βρίσκεται η προσέγγιση (ακόμα και σε επίπεδο φυσιολογίας) είναι το πρόσφατο άρθρο των Bushdid et al. (2014) που εκτιμά ότι οι άνθρωποι μπορούν να διακρίνουν μεταξύ έως και ενός τρισεκατομμυρίου

διαφορετικών οσφρητικών ερεθισμάτων - υπερβαίνοντας κατά πολύ προηγούμενες εκτιμήσεις [7]. Εντούτοις, η τεχνολογία ήδη διαπλέκεται με την καταγραφή και αναπαραγωγή οσφρητικών ερεθισμάτων. Η Madeleine, μια αναλογική κάμερα οσμών – καλλιτεχνικό έργο της Amy Radcliffe (<http://amyradcliffe.co.uk/Scent-ography-a-post-visual-past-time-1>) και το Ophone (odour phone), μία (όχι ιδιαίτερα φορητή) συσκευή ανταλλαγής οσφρητικών μηνυμάτων – έργο του David Edwards - θέτουν τον τόνο της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης που σταδιακά διαπλέκει «πραγματικό» και ψηφιακό κόσμο.



Σχήμα 3.1. 360° Σύστημα καταγραφής αμφιωτικού ήχου και κάμερας.

4. Πρόταση για μια High/low-tech/cost εργαλειοθήκη για την έρευνα του ήχο-οσμο-τοπίου.

Το χαμηλό σχετικό κόστος της εργαλειοθήκης είναι αναγνωρίσιμο στα επιμέρους εργαλεία: i) ένα μετρητή στάθμης ήχου τύπου 2 (IEC 651 και ANSI S1.4), 31,5 Hz έως 8 kHz (+/- 1,5 dB), ii) μια Zoom H - 4N φορητή συσκευή εγγραφής με δύο ενσωματωμένες εισόδους μικροφώνου XLR (έως και 24-bit / 96kHz), iii) Roland CS-10EM Binaural στερεοφωνικά ακουστικά με ενσωματωμένο μικρόφωνο συμπυκνωτή (που τροφοδοτείται από τη φορητή συσκευή εγγραφής) iv) μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Nikon Coolpix (12,2Mp / ταινία HD), και v) μια DIY συσκευή χειρός για σταθεροποίηση της κάμερας, ώστε να επιτρέπει την ομαλή λήψη βίντεο (<https://www.youtube.com/watch?v=y-6vq0hDFbc>).

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω υλικό, η έρευνα σχεδίασε δύο εργαλεία οπτικοακουστικής καταγραφής του τοπίου συμπληρώνοντας τις μετρήσεις ηχητικής πίεσης και τη χρήση ερωτηματολογίων (αναλογικό μέρος της έρευνας). Ο συνδυασμός της σταθεροποιημένης λήψης, σε κίνηση, με την ταυτόχρονη αμφιωτική ηχογράφιση παράγει υλικό που μπορεί να αναπαραγάγει, με αρκετή πιστότητα, την χωρική εμπειρία του ήχου επί της συγκεκριμένης διαδρομής ή σε συγκεκριμένες θέσεις της. Εντούτοις, ο γραμμικός αυτός τρόπος θέασης (POV) είναι περιοριστικός καθώς υποχρεώνει τον παρατηρητή στο καταγεγραμμένο πλάνο. Η έρευνα προσπάθησε να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς στην αναπαραγωγή της οπτικοακουστικής εμπειρίας του τοπίου σχεδιάζοντας ένα ψηφιακό ανάλογο στη μορφή ενός δια-δραστικού χάρτη που περιλαμβάνει λεπτομερείς πανοραμικές απεικονίσεις των στάσεων (οπτικές σφαίρες με τον παρατηρητή στο κέντρο) και στερεοφωνικά ηχητικά δείγματα από κάθε στάση (η παράμετρος του χρόνου), ενώ

στον χάρτη εντάσσονται και άλλες πληροφορίες – χαρτογραφικά και κλιματικά δεδομένα – γράφημα ηχητικής πίεσης. Ο ψηφιακός δια-δραστικός χάρτης επιτρέπει την στιγμιαία μετακίνηση από τοποθεσία σε τοποθεσία – όπως στο Google street view, ακυρώνοντας την μετάβαση - αλλά ενσωματώνει τον παρατηρητή μέσα σε μία τρισδιάστατη εικόνα του τοπίου, στο οποίο το βάθος πεδίου της λήψης επιτρέπει την στροφή και τη μεγέθυνση – μετακίνηση.

Η ραγδαία ανάπτυξη που συντελείται μόλις τα τελευταία 2-3 χρόνια στον τομέα της τρισδιάστατης – πανοραμικής καταγραφής – Ricoh Theta και αναπαραγωγής, Oculus Rift – Google Cardboard, ήχου και εικόνας και οι ολοένα εξελισσόμενες δυνατότητες των φορητών συσκευών στην εύκολη (και σταθεροποιημένη) αποτύπωση του ήχου, εικόνας, video – ίσως σύντομα και 360 video, θέτει το πλαίσιο για την περαιτέρω ανάπτυξη αντίστοιχων εργαλείων ή και για την κοινωνικοποίησή τους – κάνοντάς τα ευρέως διαθέσιμα μέσα από πλατφόρμες ψηφιακού συμμετοχικού σχεδιασμού. Όσον αφορά στη μελέτη του αστικού ηχοτοπίου, οι συγγραφείς προτείνουν την σύζευξη των παραπάνω εργαλείων σε πειραματικές πλατφόρμες όπως αυτή του City-Sense [8] – εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία κινητών τηλεφώνων για την καταγραφή της απόκρισης στο τοπίο, τόσο περιγραφικά όσο και επεκτείνοντάς τα με αισθητήρες μέτρησης περιβαλλοντικών δεικτών, διευρύνοντας τον πειραματισμό πάνω στην χρήση των ΤΠΕ στην υπηρεσία της έρευνας και του συμμετοχικού σχεδιασμού.

5. Αναφορές

[1] K. Sakantamis, and K. Chourmouziadou «Χρόνο-Σφαίρες: συνδυαστική μελέτη του αστικού Οσμo-Ηχο-τοπίου της Θεσσαλονίκης» στο *Πρακτικά 7^ο Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής Ακουστική 2014*, (2014).

[2] A. Preis, J. Kociński, H. Hafke-Dys and M. Wrzosek «Audio-visual interactions in environment assessment» *Science of the Total Environment* **523**, pp 191–200 (2015).

[3] J. Till, «The Negotiation of Hope», in *Architecture and Participation*, edited by P. Blundell Jones, D. Petrescu and J. Till Routledge, London, pp 25-44 (2005).

[4] A. Fiebig and B. Schulte-Fortkamp «The importance of the grounded theory with respect to soundscape evaluation» in *Joint Congress CFA/DAGA'04*, pp 349-350 (2004).

[5] Z. Bauman *Liquid Modernity* Polity Press, Cambridge (2000).

[6] B. Schulte-Fortkamp and A. Fiebig «Impact of soundscape in terms of perception» in *Soundscape and the built environment*, edited by J. Kang and B. Schulte-Fortkamp Taylor and Francis Group, pp 81-82 (2016).

[7] C. Bushdid, M. O. Magnasco, L. B. Vosshall and A. Keller «Humans Can Discriminate More than 1 Trillion Olfactory Stimuli» *Science* **343**(6177), pp 1370-1372 (2014).

[8] I. Aspuru, I. García, K. Herranz and A. Santander «City-sense: methods and tools for empowering citizens to observe acoustic comfort in outdoor public spaces» *Noise Mapping*, **3**, pp 37-48 (2016).

Κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων με χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων

Παναγιώτης Ζέρβας
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Μηχανικών Μουσικής
Τεχνολογίας & Ακουστικής Τ.Ε.
ΤΕΙ Κρήτης
pzervas@staff.teicrete.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της εφαρμογής συνελκτικών νευρωνικών δικτύων για την αυτόματη κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων. Η εκπαίδευση και αξιολόγηση των μοντέλων ταξινόμησης έγινε με την χρήση δύο βάσεων ηχογραφήσεων. Μιας ελεύθερα διαθέσιμης και μιας η οποία έχει προκύψει από ηχογραφήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε επιλεγμένα σημεία της πόλης του Ρεθύμνου. Οι ηχογραφήσεις έγιναν με τη χρήση φορητού καταγραφικού που έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί πάνω στην πλατφόρμα Raspberry Pi b+. Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου έγινε εξαγωγή του mel-φασματογραφήματος της κάθε ηχογράφησης με χρήση παραθύρου 1024 δειγμάτων, βήμα 512 δείγματα υπολογισμένο για 60 συχνοτικές ζώνες. Τα αποτελέσματα της αυτόματης κατηγοριοποίησης της προτεινόμενης υλοποίησης συγκρίνονται με αυτά μιας βασικής μεθόδου που στηρίζεται στην χρήση δένδρων απόφασης.

Urban Soundscape classification with the utilization of Convolutional Neural Networks

ABSTRACT

In this paper we cope with the task of automatic categorization of urban soundscape recordings with the utilization of convolutional neural networks. For training and evaluating the classification models two audio recording databases were employed; an open source one and a database that was developed in our laboratory with soundscape recordings of selected parts from the city of Rethymno. The recordings were carried out with a portable recorder that was designed and implemented on the platform Raspberry Pi b+. For training the convolutional neural network mel-spectrogram was calculated for each audio recording using 1024 samples window, step 512 samples for 60 frequency bands. The results obtained from the convolutional neural network were compared to those of a J48 decision tree classifier trained with the mfcc parameters extracted from the calculated mel-spectrograms.

Εισαγωγή

Η λέξη «ηχοτοπίο» επινοήθηκε από τον συνθέτη R. Murray Schafer [1] για να δώσει το περίγραμμα των ήχων που συνθέτουν την ηχητική ταυτότητα ενός τόπου. Μια αστική περιοχή διακρίνεται από ποικιλία ηχοτοπίων τα οποία κυριαρχούνται από ήχους σχετιζόμενους με την κίνηση, τις δραστηριότητες των ανθρώπων αλλά και από φυσικούς ήχους. Ωστόσο σήμερα τα αστικά περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένα από την κυκλοφοριακή κίνηση, η οποία υποβαθμίζει και επισκιάζει τα ηχοτοπία τους [2], [3].

Παρόλου που η έννοια του αστικού ηχοτοπίου είναι συνδεδεμένη με επιθετικούς προσδιορισμούς όπως ενοχλητικό, ανεπιθύμητο [4], σε πολλές περιπτώσεις έχει και θετικές επιδράσεις στον άνθρωπο. Αυτές μπορεί να λάβουν χώρα είτε με την ενίσχυση της διάθεσης ενός ατόμου, προκαλώντας μιας ευχάριστη ανάμνηση προηγούμενης εμπειρίας, είτε βοηθώντας ένα άτομο να χαλαρώσει και να ανακτήσει τις δυνάμεις του [5]. Από την άλλη μεριά είναι ευρέως αποδεκτό ότι ο θόρυβος έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής στις πόλεις. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν αυξανόμενες ενδείξεις ότι, υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης, η έκθεση στον θόρυβο περιβάλλοντος έχει σοβαρές ψυχολογικές, φυσιολογικές και κοινωνικές συνέπειες [6]. Παρά το γεγονός αυτό, οι αστικές περιοχές εξακολουθούν να χαρακτηρίζονται από σοβαρή ηχητική υποβάθμιση [3].

Ο ερευνητικός τομέας της μελέτης των ηχοτοπίων προτείνει όχι μόνο την μείωση των ανεπιθύμητων πηγών θορύβου αλλά και την διατήρηση, συντήρηση και διαφύλαξη συγκεκριμένων ήχων οι οποίοι είναι μεγάλης σημασίας για τον άνθρωπο. Προς την κατεύθυνση αυτή διάφορα κριτήρια θα πρέπει να πληρούνται κατά την λήψη αποφάσεων αναφορικά με τον σχεδιασμό του αστικού περιβάλλοντος. Είναι σημαντικό λοιπόν να αναπτυχθούν εργαλεία τα οποία θα βοηθούν τους σχεδιαστές, αρχιτέκτονες και μηχανικούς στην κατανόηση του περιεχομένου και της εξέλιξης του ηχοτοπίου μιας περιοχής [7]. Τα εργαλεία αυτά θα πρέπει στηρίζονται σε μεθόδους οι οποίες θα κάνουν χρήση των ακουστικών χαρακτηριστικών των προς μελέτη ηχοτοπίων [8] αλλά και σε μεθόδους που βασίζονται στην καταγραφή της γνώμης του πολίτη [9].

Διάφορες προσπάθειες έχουν γίνει πάνω σε αυτό τον ερευνητικό τομέα. Ενδεικτικά αναφέρουμε την εργασία των Torijia et al. [7] όπου προτείνεται η χρήση ιεραρχικής ανάλυσης συστάδων για την κατηγοριοποίηση 15 αστικών ηχοτοπίων. Στην [10], η κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων πραγματοποιείται με υποκειμενικές μεθόδους αλλά και με την χρήση νευρωνικών δικτύων. Τέλος στην [11], παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα αναγνώρισης ηχοτοπίων που προέκυψαν στα πλαίσια της πρόκλησης «*IEEE Audio and Acoustic Signal Processing Technical Committee challenge on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events (DCASE)*». Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει και να αξιολογήσει την χρήση των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (ΣΝΔ) για την αυτόματη κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων. Στην ενότητα 1 γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας και χρήσης των ΣΝΔ σε προβλήματα κατηγοριοποίησης και δίνεται πλήρης περιγραφή της αρχιτεκτονικής που υιοθετήθηκε στο πρόβλημα μας. Στην ενότητα 2 γίνεται περιγραφή των ηχητικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου. Τέλος στην ενότητα 3 περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

1. Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα

Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (ΣΝΔ) αποτελούν βιολογικά εμπνευσμένες παραλλαγές των πολυεπίπεδων δικτύων πρόσθιας τροφοδότησης (Multilayer Perceptron). Οι Hubel και Wiesel μέσα από την μελέτη του οπτικού φλοιού της γάτας [12], παρατήρησαν ότι απαρτίζεται από μια πολύπλοκη διάταξη κυττάρων τα οποία είναι ευαίσθητα σε μικρές περιοχές του οπτικού πεδίου γνωστές ως δεκτικά πεδία (receptive fields). Τα πεδία αυτά ενεργούν σαν τοπικά φίλτρα στο σήμα εισόδου και είναι ιδανικά για την εκμετάλλευση της ισχυρής χωρικής συσχέτισης που υπάρχει στην πληροφορία μιας εικόνας. Δεδομένου ότι, ο οπτικός φλοιός των ζώων είναι το πιο ισχυρό σύστημα επεξεργασίας οπτικής πληροφορίας, είναι επόμενο να θέλουμε να εξομοιώσουμε τη συμπεριφορά του. Τα ΣΝΔ έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα όπως η αναγνώριση εικόνας, ομιλίας και επεξεργασία φυσικής γλώσσας.

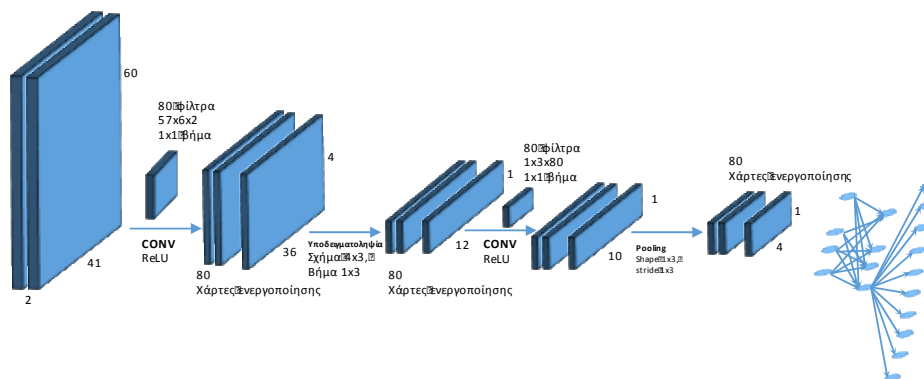
Προκειμένου να δομηθεί ένα ΣΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρεις θεμελιώδεις τύποι επιπέδων, (α) τα συνελκτικά επίπεδα (convolution layers), (β) τα επίπεδα χωρικής υποδειγματοληψίας (pooling layers) και (γ) τα πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα (fully connected layers). Ένα ΣΝΔ αποτελείται από ένα ή περισσότερα συνελκτικά επίπεδα (συνήθως μαζί με ένα επίπεδο χωρικής υποδειγματοληψίας) και η έξοδος τους καταλήγει σε ένα ή περισσότερα πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα όπως και σε ένα σύνθετο πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο. Η αρχιτεκτονική των ΣΝΔ είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να επωφελείται από την δισδιάστατη δομή των δεδομένων εισόδου (πχ εικόνα ή άλλο δισδιάστατο σήμα όπως ο ήχος). Κάθε κρυφός νευρώνας, αντί να είναι συνδεδεμένος με όλους τους νευρώνες που έρχονται από το προηγούμενο επίπεδο, περιορίζεται στην επεξεργασία ενός μικρού τμήματος του συνολικού επιπέδου εισόδου, γνωστό ως δεκτικό πεδίο. Τα βάρη του κρυφού νευρώνα δημιουργούν ένα φίλτρο το οποίο εφαρμόζεται σε όλο το πεδίο εισόδου από το οποίο προκύπτει ο χάρτης χαρακτηριστικών (feature map) ή αλλιώς χάρτης ενεργοποίησης (activation map).

Παραδοσιακά, η σιγμοειδής και η υπερβολική εφραπτομένη έχουν χρησιμοποιηθεί σαν τυπικές μη γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης σε αρχιτεκτονικές κλασσικών νευρωνικών δικτύων. Πρόσφατες υλοποιήσεις αρχιτεκτονικών βαθιάς εκπαίδευσης έχουν αντικαταστήσει αυτές τις συναρτήσεις με την ανορθωμένη γραμμική συνάρτηση (Rectified Linear Unit, (ReLU)) την οποία χρησιμοποιούμε και στην υλοποίηση των ΣΝΔ της παρούσας εργασίας.

1.2 Αρχιτεκτονική ΣΝΔ για την ταξινόμηση ηχοτοπίων

Η εκπαίδευση ενός ΣΝΔ είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων και πολλές αποφάσεις θα πρέπει να ληφθούν τόσο σχετικά με την αρχιτεκτονική του όσο και με την επιλογή των υπερ-παραμέτρων εκπαίδευσης. Δεν υφίσταται συγκεκριμένος τρόπος δόμησης των ΣΝΔ ή επιλογής των υπερ-παραμέτρων των επιπέδων προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ΣΝΔ που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με απόλυτη επιτυχία.

Λόγω του χρόνου εκπαίδευσης των ΣΝΔ δεν ήταν δυνατή η εξαντλητική αξιολόγηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών αλλά και συνδυασμών για την επιλογή υπερ-παραμέτρων. Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας η επιλογή της αρχιτεκτονικής δικτύου και υπερ-παραμέτρων έλαβε χώρα μέσα από μελέτη της βιβλιογραφίας [15] αλλά και από την διεξαγωγή περιορισμένου εύρους πειραμάτων.



ΕΙΚΟΝΑ 1: Αρχιτεκτονική συνελκτικού νευρωνικού δικτύου για την κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων

Στην εικόνα 1 απεικονίζεται η τελική αρχιτεκτονικής του ΣΝΔ αλλά και οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων του. Το ΣΝΔ αποτελείται από δύο συνελκτικά επίπεδα, δύο επίπεδα υποδειγματοληψίας και ένα πλήρες συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο οπισθοδρομικής διάδοσης δύο κρυφών επιπέδων. Τα δεδομένα εκπαίδευσης και αξιολόγησης έχουν προκύψει από τον υπολογισμό του mel-φασματογραφήματος και του δέλτα του. Αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας ήταν η διάσταση του διανύσματος εισόδου να είναι 60 γραμμές (πλήθος φίλτρων), 41 στήλες (πλήθος παραθύρων στο χρόνο) και 2 κανάλια. Τα δεδομένα αυτά υφίστανται την εφαρμογή 80 δεκτικών φίλτρων διάστασης $57 \times 6 \times 2$ με βήμα 1×1 δημιουργώντας 80 χάρτες χαρακτηριστικών διάστασης 4×36 . Στη συνέχεια μέσα από την εφαρμογή ενός επιπέδου υποδειγματοληψίας με διάσταση φίλτρων 4×3 και βήμα 1×3 προκύπτουν 80 χάρτες χαρακτηριστικών, με διάσταση 1×12 , οι οποίοι αποτελούν την είσοδο του δεύτερου συνελκτικού επιπέδου. Το δεύτερο συνελκτικό επίπεδο μέσα από την εφαρμογή 80 φίλτρων διάστασης $1 \times 3 \times 80$ και βήματος 1×1 αλλά και την εφαρμογή υποδειγματοληψίας με χαρακτηριστικά 1×3 και βήμα 1×3 προκύπτουν 80 χάρτες ενεργοποίησης με διάσταση 1×4 οι οποίες εισάγονται σαν είσοδο στο τελικό στάδιο που είναι ένα πλήρως διασυνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο.

Το πλήρως συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο απαρτίζεται από δύο κρυφά επίπεδα των 5000 νευρώνων και ένα επίπεδο εξόδου με 10 νευρώνες (έναν για κάθε κατηγορία ηχοτοπίου). Για την εκπαίδευση του ΣΝΔ χρησιμοποιήθηκε 50% dropout στο πρώτο συνελκτικό επίπεδο και 50% σε κάθε κρυφό επίπεδο του πλήρους συνδεδεμένου νευρωνικού δικτύου.

2. Περιγραφή Ηχητικών Δεδομένων

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των ΣΝΔ στην αυτόματη κατηγοριοποίηση ηχοτοπίων χρησιμοποιήθηκαν δύο βάσεις ηχητικών δεδομένων, (α) της ελεύθερα διαθέσιμης IEEE AASP [11] για κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων και (β) μιας βάσης η οποία υλοποιήθηκε στο εργαστήριό μας και απαρτίζεται από ηχογραφήσεις διαφόρων περιοχών της πόλης του Ρεθύμνου. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά αυτών.

2.1 Βάση ηχητικών δεδομένων UrbSndReth

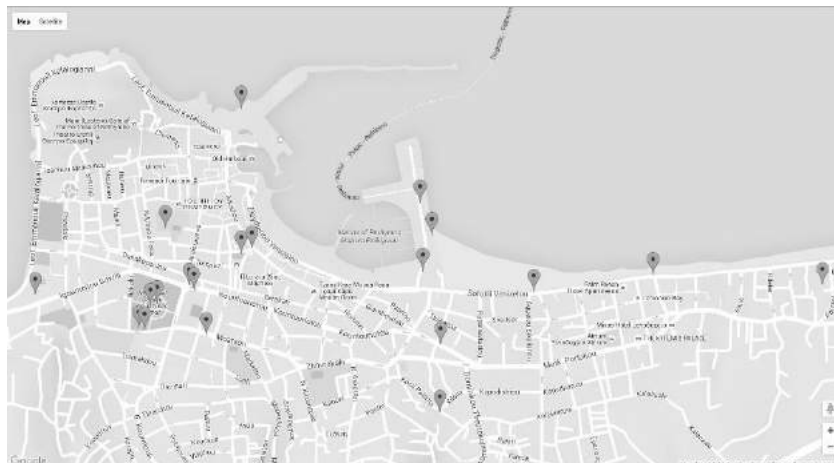
Για το πρόβλημα της καταγραφής ηχητικής πληροφορίας, σε περιβάλλον έξυπνης πόλης με χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους, υλοποιήθηκε φορητό καταγραφικό ήχου βασισμένο στον ΗΥ μεγέθους πιστωτικής κάρτας, Raspberry PI B+.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά βάσεων ηχητικών δεδομένων

Ηχητικά δεδομένα	Κατηγορίες	Πλήθος	Χαρακτηριστικά ηχογράφησης
IEEE AASP	πολυσύχναστος δρόμος, ήσυχος δρόμος, εστιατόριο, γραφείο, πάρκο, υπόγειος, σταθμός υπογείου, υπαίθρια αγορά, σουπερμάρκετ, λεωφορείο	10	Soundman binaural mic, PCM, 44100 Hz, 16 bit
UrbSndReth	λεωφορείο, υπαίθρια αγορά, ήσυχος δρόμος, σταθμός λεωφορείου, πάρκο, πλατεία, πολυσύχναστος δρόμος, πεζόδρομος, παραλιακός δρόμος, λιμάνι.	10	RPI B+, Blue snowflake USB mic Stereo 44100Hz 16 bit

Το συγκεκριμένο καταγραφικό ήχου είχε τα εξής λειτουργικά χαρακτηριστικά,

- Επεξεργαστής, 700 MHz single-core ARM1176JZF-S
- Λειτουργικό σύστημα, Raspbian
- Πυκνωτικό μικρόφωνο, Blue Snowflake USB
- Τροφοδοσία, TP-LINK TL-PB10400 10400 mAh power bank
- Αποθήκευση ηχογραφήσεων, USB storage 8 GB



ΕΙΚΟΝΑ 2: Γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων ηχογράφησης στη πόλη του Ρεθύμνου

Για να είναι δυνατή η χρήση του καταγραφικού χωρίς την χρήση οθόνης έγινε αποκατάσταση ad-hoc σύνδεσης με κινητό τηλέφωνο iPhone 4s και χρήση του πρωτοκόλλου ssh.

Σκοπός της συγκεκριμένης προσπάθειας ήταν αφενός να εξεταστεί η ποιότητα των ηχογραφήσεων από μια τέτοια υλοποίηση και αφετέρου να μελετηθεί η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα εξαγωγής μετα-πληροφορίας από ηχητικά δεδομένα, καταγραφής θορύβου κ.α. Οι ηχογραφήσεις που περιέχονται στην βάση δεδομένων πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα σημεία της πόλης του Ρεθύμνου η ακριβής γεωγραφική θέση των οποίων απεικονίζεται στην εικόνα 2. Για την διεκπεραίωση των ηχογραφήσεων μεσολάβησε διάστημα 4 μηνών. Αξίζει να σημειωθεί πως για αστικές περιοχές όπως δρόμοι, οι ηχογραφήσεις έγιναν σε διάφορες ώρες της ημέρας. Τέλος κάθε αρχείο ηχογράφησης συνοδεύεται από αρχείο κειμένου στο οποίο καταγράφεται η χρονική περίοδος εμφάνισης διαφόρων ηχητικών συμβάντων. Για την καταγραφή και διαχείριση αυτής της πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PRAAT.

3. Πειραματικής διαδικασίας

Η δυνατότητα κατηγοριοποίησης αστικών ηχοτοπίων με την χρήση ΣΝΔ αξιολογείται ως προς αυτή των δένδρων απόφασης και συγκεκριμένα της μεθόδου C4.5 [13].

3.1 Εξαγωγή ακουστικών χαρακτηριστικών

Για την εκπαίδευση των ταξινομητών έγινε επεξεργασία των ηχητικών δεδομένων και εξαγωγή παραμέτρων με χρήση του πακέτου Librosa [14]. Το σύνολο χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των ΣΝΔ αποτελείται από το mel-φασματογράφημα κάθε ηχογράφησης και του δέλτα της. Για τον υπολογισμό αυτού εφαρμόσθηκε παράθυρο 1024 δειγμάτων, βήμα 512 και 60 συχνότητες mel. Για τα δένδρα απόφασης χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι mfcc και δέλτα-mfcc όπως αυτοί προέκυψαν από το ίδιο mel-φασματογράφημα που χρησιμοποιήθηκε στα ΣΝΔ.

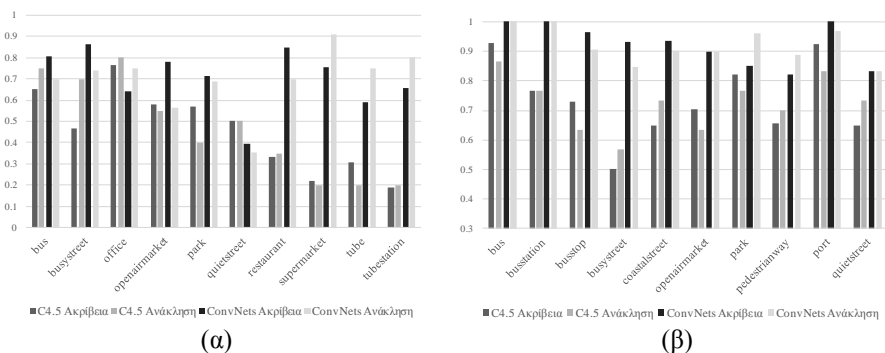
3.2 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των μεθόδων κατηγοριοποίησης έγινε χρήση της διασταυρωμένης επικύρωσης 5 επαναλήψεων. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τη τιμή της συνολικής ακρίβειας (total accuracy) για καθένα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Είναι φανερό, ότι σε όλες τις περιπτώσεις, η χρήση των ΣΝΔ είναι αποτελεσματικότερη από αυτή των δένδρων απόφασης για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, οι ταξινομητές που προέκυψαν από την εκπαίδευση των ΣΝΔ εμφάνισαν αυξημένη απόδοση κατά 23.5% για τα AASP δεδομένα και κατά 19.66% για τα δεδομένα UrbSndReth.

Πίνακας 3.1 Συνολική ακρίβεια μοντέλων κατηγοριοποίησης

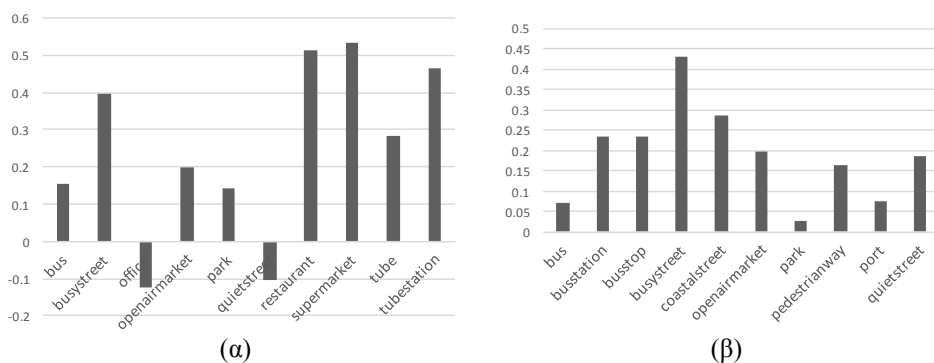
Δεδομένα	C4.5	CONVNET
IEEE AASP	46.5	70
UrbSndReth	72.34	92

Στην εικόνα 3 (α) και (β) απεικονίζονται οι τιμές της ακρίβειας και ανάκλησης για καθεμία από τις κατηγορίες των συνόλων εκπαίδευσης στα πειράματα που έλαβαν χώρα.



ΕΙΚΟΝΑ 3: Ανάκληση και ακρίβεια για τα δεδομένα (α) AASP και (β) UrbSndReth

Τα ΣΝΔ απόδωσαν καλύτερα στην κατηγοριοποίηση όλων των κατηγοριών, εκτός των office και quietstreet του συνόλου AASP. Η εφαρμογή των ΣΝΔ έδειξε βελτίωση στον διαχωρισμό ακόμα και κατηγοριών όπου τα δένδρα απόφασης παρουσίασαν μεγάλη δυσκολία όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των κατηγοριών busystreet, restaurant, supermarket της AASP. Στην εικόνα 4 (α) και (β) παρουσιάζεται η μεταβολή της ακρίβειας για κάθε κατηγορία των συνόλων εκπαίδευσης μεταξύ των ΣΝΔ και των δένδρων απόφασης.



ΕΙΚΟΝΑ 4: Μεταβολή ακρίβειας κατηγοριοποίησης μεταξύ ΣΝΔ και δένδρων απόφασης για το σύνολο (α) AASP και (β) UrbSndReth.

4. Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση της χρήσης ΣΝΔ για την αυτόματη κατηγοριοποίηση αστικών ηχοτοπίων. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν δύο βάσεις ηχογραφήσεων αστικών ηχοτοπίων. Η απόδοση των ΣΝΔ συγκρίθηκε με αυτή των C4.5 δένδρων απόφασης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αποτελούν μια αρκετά καλή λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Μέσα από τα πειράματα που διεξάχθηκαν έδειξαν ότι

ξεπερνούν την απόδοση μοντέλων τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες προσπάθειες.

Σε επόμενα βήματα της έρευνας μας θα γίνει περαιτέρω μελέτη σχετικά με το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής υπερ-παραμέτρων ΣΝΔ. Επίσης θα γίνει ποιοτική και στατιστική μελέτη του περιεχομένου της βάσης ηχητικών δεδομένων UrbSndReth όπως και ο περαιτέρω εμπλουτισμός της με ηχογραφήσεις.

5. Αναφορές

[1] R. M. Schafer, «The New Soundscape: A Handbook for the Modern Music Teacher», *Berandol Music Limited*, 65 (1969)

[2] I. C. G. Montalvao, S. R. Bertoli, P. H. T. Zannin. «Influence of urban shapes on environmental noise: a case study in Aracaju-Brazil», », *Science of The Total Environment*, **412-413**, pp 66–76 (2011).

[3] A. J. Torija, D. P. Ruiz, V. Alba-Fernandez, A. Ramos-Ridao, «Noticed sound events management as a tool for inclusion in the action plans against noise in medium-sized cities», *Landscape and Urban Planning*, **104**, pp 148–56, (2012)

[4] P. Jennings, R. Cain, «A framework for improving urban soundscapes», *Applied Acoustics*, **74**, pp. 293-299 (2013)

[5] S. R. Payne, «The production of a perceived restorativeness soundscape scale», *Applied Acoustics*, **74**, pp. 255-263 (2013)

[6] H. E. Laszlo, E. S. McRobie, S. A. Stansfeld, A. L. Hansell, «Annoyance and other reaction measures to changes in noise exposure - a review», *Science Total Environment*, **435-436**, pp. 551–62 (2012)

[7] A. J. Torija, D. P. Ruiz,, A. F. Ramos-Ridao, «Application of a methodology for categorizing and differentiating urban soundscapes using acoustical descriptors and semantic-differential attributes». *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, pp 791-802 (2013)

[8] M. Rychtáriková, G. Vermeir, «Soundscape categorization on the basis of objective acoustical parameters», *Applied Acoustics*, **74**, pp 240-247, (2013)

[9] D. Dubois, C. Guastavino, M. Raimbault, «A cognitive approach to soundscapes: using verbal data to access auditory categories», *Acta Acustica united with Acustica*, **92**, pp 865–874 (2006)

[10] J. Y. Jeon, J. Y. Hong, «Classification of urban park soundscapes through perceptions of the acoustical environments, *Landscape and Urban Planning*», *Landscape and urban planning*, **141**, pp 100-111, (2015)

[11] D. Stowell, D. Giannoulis, E. Benetos, M. Lagrange, M. D. Plumbley, «Detection and Classification of Audio Scenes and Events», *IEEE Transactions on Multimedia*, **17(10)**, pp 1733-1746 (2015)

[12] D. Hubel, T. Wiesel, «Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex», *J Physiol*, **195(1)**, pp 215–243 (1968)

[13] J. Salamon, C. Jacoby, J. P. Bello. 2014. «A Dataset and Taxonomy for Urban Sound Research», 22nd ACM Int. conf on Multimedia, pp 1041-1044 (2014).

[14] McFee B., et al.. «librosa: 0.4.1», Zenodo. 10.5281/zenodo.32193, (2015)

[15] Piczak J., «Environmental sound classification with convolutional neural networks», in 25th Intl Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), pp. 1-6, (2015).

Δημιουργία βάσης δεδομένων ηχητικών καταγραφών και αφηγήσεων πολιτισμικού περιεχομένου στην περιοχή της Θράκης

Γεώργιος Σαλακίδης
Αναπληρωτής
Καθηγητής
Τμήμα Γλώσσας,
Φιλολογίας &
Πολιτισμού
Παρευξείνιων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
gسالakid@bscc.duth.gr

Ευαγγελία Θωμαδάκη
Αναπληρώτρια
Καθηγήτρια
Τμήμα Γλώσσας,
Φιλολογίας & Πολιτισμού
Παρευξείνιων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
ethomada@bscc.duth.gr

Χριστίνα Μάρκου
Επίκουρη Καθηγήτρια
Τμήμα Γλώσσας,
Φιλολογίας & Πολιτισμού
Παρευξείνιων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
cmarkou@bscc.duth.gr

Θεόδωρος Κοντογιώργης
Φοιτητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
ece7812@upnet.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η καταγραφή της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για τη διατήρηση, τη συστηματική μελέτη, τη διάδοση και τη διαίωσή της. Τα πολιτιστικά στοιχεία που καταγράφονται περιλαμβάνουν γραπτά κείμενα, προφορικές μαρτυρίες, εικόνες και οπτικοακουστικά ντοκουμέντα. Η καταγραφή της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι μια διαρκής διαδικασία και αυτονόητα εμπλουτίζεται με κάθε νέα καταγραφή υλικού επιτρέποντας την παρακολούθηση της εξέλιξης και της διαμόρφωσης παλαιών εθίμων, μύθων και συνηθειών και τη μελέτη νέων επιρροών.

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε πολιτιστικά στοιχεία που αντλούνται από την προφορική παράδοση της περιοχής της Θράκης. Με δεδομένη την ιστορική πορεία της περιοχής σε συσχέτισμό με την εξέλιξη του ελληνικού πολιτισμού από την αρχαιότητα ήδη και το ρόλο της ως περάσματος προς τη Βαλκανική, η Θράκη αποτελεί σήμερα, έναν χώρο στον οποίο συμβιώνουν κοινότητες με διαφορετικά γλωσσικά, θρησκευτικά και πολιτισμικά χαρακτηριστικά, που συγκροτούν ένα ενδιαφέρον μωσαϊκό ταυτοτήτων. Η κομβική γεωγραφική θέση της περιοχής και το γεωγραφικό της ανάγλυφο, ευνοούν μία ιδιαίτερη πολιτισμική κινητικότητα.

Στα πλαίσια της προαναφερθείσας έρευνας δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται μία βάση δεδομένων που περιλαμβάνει καταγραφές λόγου από τις τρεις βασικές γλωσσικές κοινότητες που κατοικούν σήμερα στην περιοχή της Θράκης, τους ελληνόφωνους, τους σλαβόφωνους Πομάκους και τους τουρκόφωνους. Στις καταγραφές περιλαμβάνονται ηχητικά δείγματα από μια ποικιλία κειμενικών ειδών πολιτισμικά φορτισμένα: διάφορα είδη τραγουδιών, δείγματα παραμυθιών,

παροιμιών, ευχών, περιγραφές τοπικών συνταγών μαγειρικής και άλλων ανάλογων στοιχείων της προφορικής παράδοσης που συνιστούν πτυχές της ζωντανής καθημερινότητας στη ζωή των κατοίκων της περιοχής.

Οι συγκεκριμένες καταγραφές εξετάζονται και παρουσιάζονται σχολιασμένες από τη φιλολογική, γλωσσική και ιστορική πλευρά ως προς το περιεχόμενό τους και συγκρίνονται μεταξύ τους, ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ομοιότητες.

Στα ντοκουμέντα που αποτελούν τραγούδια, ή μουσικά κομμάτια, γίνεται εξαγωγή παραμέτρων όπως η μεταβολή της τονικότητας (*pitch over time*) ώστε να διαπιστωθεί η ύπαρξη όμοιων μουσικών δρόμων (κλίμακες της ανατολικής μουσικής), καθώς επίσης και ρυθμική ανάλυση (*tempo*) για την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ομοιότητα των τραγουδιών των κοινοτήτων που ζουν και δραστηριοποιούνται στην περιοχή.

A database of narrations and songs recordings with cultural interest from the area of Thrace.

ABSTRACT

The records of cultural heritage provide important evidence of past and current traditions and customs for each society. The work presents such records for the oral traditions of the region of Thrace, in northern Greece. This region, from ancient times had a significant role for the evolution of Greek civilisation, being a passage to the Balkans. Today, due to this unique geographical location, it is a region where communities with different cultural, religion and linguistic traditions are coexisting, providing a background of intercultural society. Hence, this work describes cultural records for the Greek speaking, the Turkish speaking and the Slav-speaking (Pomak) local communities. The records contain audio recordings from a range of cultural activities: songs, fairy tales, proverbs, greetings, local cooking recipes and other artefacts of their oral tradition which are still part of the everyday life of each community.

These records are analysed and examined from the linguistic, literate and historic perspective with the view of providing comparisons and similarities. For the songs and music records, the analysis provides tonal music and rhythmic characteristics, assessing their similarity to known modal and rhythmic classes of the traditional eastern music of the broader geographical region.

1. Εισαγωγή

Από όλες τις περιφέρειες του σημερινού ελληνικού κράτους η Θράκη παρουσιάζει την μεγαλύτερη ποικιλομορφία από πλευράς πληθυσμιακής σύνθεσης και συνακόλουθα αποτελεί ένα κατ' εξοχήν παράδειγμα περιοχής με πολυπολιτισμικά χαρακτηριστικά. Οι πολιτισμικές κοινότητες που συμβιώνουν στην περιοχή οριοθετούνται μεταξύ άλλων και γλωσσικά, και μάλιστα η γλωσσική και διαλεκτική διαφοροποίηση στην ελληνική Θράκη του 20ου και 21ου αιώνα αποτελεί προέκταση και κληρονομιά της γλωσσικής ποικιλομορφίας που χαρακτήριζε την ευρύτερη γεωγραφική περιοχή στο παρελθόν.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας (CT-audiolink), που εστιάζει στην ανάδειξη των σχέσεων μεταξύ των κοινοτήτων, συλλέχθηκε, καταγράφηκε και μελετήθηκε υλικό που ανήκει στην προφορική πολιτισμική παράδοση της ελληνόφωνης, της τουρκόφωνης και της σλαβόφωνης κοινότητας των Πομάκων.

Από το συνολικό όγκο καταγεγραμμένου ηχητικού υλικού έγινε μια επιλογή των κειμένων που απαρτίζουν το κυρίως σώμα με βάση ορισμένα κριτήρια:

- Ακουστική ποιότητα των καταγραφών.
- Αναγνωρισιμότητα του εντόπιου χαρακτήρα του υλικού
- Επίτευξη συμμετρικής αντιπροσώπευσης των διαφορετικών ειδών κειμένων των τριών κοινοτήτων ούτως ώστε το τελικό υλικό που προσφέρεται στους χρήστες και αξιολογείται από αυτούς να είναι κατά το δυνατόν ομοιοβαρές.
- Γλωσσική αυθεντικότητα των κειμένων

Τα κείμενα χωρίστηκαν σε κατηγορίες (οι περισσότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός κείμενα): παραμύθια, τραγούδια, παροιμίες, ευχές, συνταγές κτλ. Πριν από κάθε κείμενο σημειώνεται επίσης ένας ενδεικτικός τίτλος (σε πολλές περιπτώσεις τον έδωσαν οι πληροφορητές), το όνομα του πληροφορητή και ο τόπος καταγραφής. Ανάλογα με τη γλωσσική κοινότητα από την οποία προέρχονται κωδικοποιούνται ως T(τουρκόφωνη κοινότητα), E(ελληνόφωνη) και Π(πομακική). Ορισμένες κατηγορίες κειμένων δεν είχαν ακριβές αντίστοιχο στα είδη κειμένων από τις άλλες κοινότητες (π.χ. τα *mani* της τουρκόφωνης κοινότητας ή τα *κάλαντα* της ελληνόφωνης κοινότητας).

Σε αντίθεση με τα κείμενα από την τουρκόφωνη και την ελληνόφωνη κοινότητα για τη μεταγραφή των οποίων ακολουθήσαμε την πρακτική της απόδοσής τους με το αλφάβητο που χρησιμοποιείται αντίστοιχα για την τουρκική και την ελληνική γλώσσα (παρότι αρκετά από αυτά έχουν φωνητική με διαλεκτικά χαρακτηριστικά), στην περίπτωση της πομακικής επιλέξαμε να μεταγράψουμε το γλωσσικό υλικό με μια απλουστευμένη και κατάλληλα προσαρμοσμένη εκδοχή του Διεθνούς Φωνητικού Αλφαβήτου (IPA). Επειδή δεν υπάρχει επίσημη, αναγνωρισμένη ή καθιερωμένη γραφή για την προφορική αυτή γλώσσα (ή ποικιλία διαλέκτων), θεωρούμε ότι με το μέσο αυτό αποτυπώνουμε τα κείμενα αυτά γραπτά με τον πιο αποδεκτό επιστημονικά, πιο χρήσιμο και πιο ουδέτερο τρόπο.

Το γλωσσικό υλικό σχετίζεται επιπλέον με χαρακτηριστικούς χώρους και κτίσματα, που θεωρούνται άμεσα συνδεδεμένοι με την πολιτισμική και ιστορική πορεία των επιμέρους κοινοτήτων της Θράκης (ιδιαίτερα στις περιοχές Κομοτηνής και Ξάνθης).

2. Ανάλυση κειμένων

2.1 Ελληνικά

Στο γλωσσικό υλικό που αφορά την ελληνόφωνη κοινότητα περιλαμβάνονται τόσο πεζά όσο και έμμετρα/ρυθμικά κείμενα [6]. Στα πεζά κατατάσσονται τα παραμύθια, οι συνταγές, ευχές και κατάρες που εκφέρονται σε διάφορες περιστάσεις, τα αινίγματα και η περιγραφή λαϊκών αποτροπαϊκών εθίμων. Στα έμμετρα (συνολικά 18 κείμενα) περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι τραγουδιών που συνδέονται με την καθημερινή ζωή της κοινότητας και των παραδόσεών της (κάλαντα, γάμου, νανουρίσματα, ερωτικά, αποκριάς, εργατικά). Από γλωσσική άποψη τα κείμενα αυτά αναδεικνύουν όχι τόσο την ποικιλία διαλεκτικών μορφών της ελληνικής που

συναντώνται στη Θράκη, όσο την αλληλεπίδραση με τις μη ελληνόφωνες πολιτισμικές ομάδες. Από πολιτισμική άποψη τα κείμενα που επιλέχθηκαν αποτυπώνουν όψεις του νεοελληνικού λαϊκού πολιτισμού, οι οποίες είναι κοινές και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας.

2.2 Πομακικά

Το γλωσσικό υλικό που προέρχεται από την Πομακική κοινότητα επίσης περιλαμβάνει πεζά και έμμετρα κείμενα που κατατάσσονται σε κατηγορίες, όμοιες και για τις τρεις κοινότητες, με τη λογική και την επιδίωξη της ποσοτικής και ποιοτικής συμμετρίας. Πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι το πρωτογενές λαογραφικό υλικό από τα πομακοχώρια της Θράκης που δεν έχει ακόμα καταγραφεί είναι πολύ μεγάλο και εξίσου μεγάλη είναι και η σημασία της συνέχισης της καταγραφικής έρευνας [4]. Στην κατηγορία των τραγουδιών για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας (CT-audiolink) αξιοποιούνται πέντε πομακικά τραγούδια, τα οποία ταξινομούνται σε διαφορετικές κατηγορίες, σύμφωνα με τις ευρύτερα αποδεκτές ομαδοποιήσεις δημοτικών τραγουδιών: «πειράγματα» και ερωτικά τραγούδια που ανήκουν στα 'Λυρικά τραγούδια του νυχτεριού', ιστορικά (κλέφτικα, «ληστρικά»), τραγούδια άτυπων καθημερινών περιστάσεων, τραγούδια του κύκλου του χρόνου [5].

2.3 Τουρκικά

Και τα τουρκικά κείμενα που καταγράφηκαν για τις ανάγκες του έργου περιέχουν τόσο πεζά όσο και έμμετρα δείγματα της λαϊκής λογοτεχνίας της τουρκόφωνης μουσουλμανικής κοινότητας της ελληνικής Θράκης. Μια ιδέα των κειμένων αυτών μπορεί να πάρει κανείς στη σελίδα <http://www.ct-audiolink.gr/index.php/el/>. Ιδιαίτερα για τα τουρκικά τραγούδια (*τουρκιού*) μπορούμε να σημειώσουμε τα εξής: Όπως συμβαίνει παντού με τη δημόδη λογοτεχνία, οι δημιουργοί της παραμένουν ανώνυμοι, εκτός από λίγες περιπτώσεις. Σε αντίθεση με την αυλική λογοτεχνία, εδώ το μέτρο είναι συλλαβοτονικό, δεν βασίζεται δηλαδή στην εναλλαγή μακρών και βραχέων συλλαβών (προσωδία, *αρούζ*), αλλά στον αριθμό και την εναλλαγή τονισμένων και άτονων συλλαβών (*parmak hesabi, hece vezni, hece ölçüsü*). Ο στίχος μπορεί να αποτελείται από πέντε έως δεκαέξι συλλαβές, ενώ πιο συχνός είναι ο επτασύλλαβος, οκτασύλλαβος και ενδεκασύλλαβος στίχος. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα του δημοτικού τραγουδιού είναι η ρίμα (*kafiye, ayak, uyak*), η οποία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω των επιθημάτων που είναι πολύ συχνά στην τουρκική γλώσσα. Πολύ συχνή είναι επίσης η μη τέλεια ρίμα η οποία βασίζεται στη συνήχηση (*yarım kafiye, yarım ayak*). Το βασικότερο στοιχείο σ' ένα δημοτικό τραγούδι είναι η μελωδία του. Υπάρχουν μελωδίες που είναι ελεύθερες ως προς το ρυθμό (*uzun hava* για τραγούδια που ονομάζονται έτσι *usulsüz türküler*, επιτραπέζια), και άλλες που έχουν συγκεκριμένους, συχνά χορευτικούς, ρυθμούς (*kirik hava* για τα *usullü türküler*). Ο αριθμός των συλλαβών ενός στίχου προσδιορίζει και τη μελωδία που μπορεί να χρησιμοποιεί για να τραγουδηθεί αυτός ο στίχος. Έτσι οι ενδεκασύλλαβοι στίχοι προορίζονται για τον *uzun hava*, οι επτασύλλαβοι για τον *kirik hava*, ενώ οι οκτασύλλαβοι ταιριάζουν και στις δύο μελωδίες. Το ότι τα *τουρκιού* 'γράφονταν' για να τραγουδηθούν φαίνεται και από τη

χρήση λέξεων που δεν έχουν συγκεκριμένο περιεχόμενο, όπως *yar, aman, bir tanem* κ.ά., με κύριο σκοπό την έκταση του στίχου στο βαθμό που απαιτεί μια συγκεκριμένη μελωδία. Έτσι, αν σ' έναν επτασύλλαβο στίχο προσθέσουμε το *yar yar aman* γίνεται ενδεκασύλλαβος και μπορεί να τραγουδηθεί σε *uzun hava*. Όπως είναι φυσικό, η γλώσσα των δημοτικών τραγουδιών είναι η λαϊκή τουρκική, απαλλαγμένη σε μεγάλο βαθμό από περσικά και αραβικά δάνεια. Ωστόσο, ιδιαίτερα σ' εκείνα τα *τουρκιού* που γράφτηκαν σε προσωδιακό μέτρο κι επηρεάστηκαν από τα μοτίβα του περσοαραβικού κανόνα, ήταν επόμενο και η γλώσσα να γίνει πιο επιτηδευμένη και ρητορική.

2.4 Σύγκριση

Συνοπτικά η βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε εξασφάλισε μια αρκετά πλούσια εικόνα της προφορικής λαϊκής παράδοσης των τριών κοινοτήτων καθώς και μια ισορροπημένη αντιπροσώπευση διαφόρων ειδών λόγου που αναδεικνύει τις χαρακτηριστικές ιδιαιτερότητες των κοινοτήτων αυτών στην πολιτισμική τους παράδοση, αλλά και τις ιδιομορφίες των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Τυπικά παραδείγματα, που επισημάνθηκαν και στο παρόν υλικό, αποτελούν ορισμένοι κοινοί λογότυποι στο κλείσιμο ή στην εισαγωγική πρόταση των παραμυθιών, τυποποιημένες εκφράσεις που έχουν περάσει από τη γλώσσα της μιας κοινότητας στην άλλη και χρησιμεύουν ως γεμίσματα σε στίχους τραγουδιών, οικείοι χαρακτήρες (όπως ο Νασρεντίν Χότζα) σε ορισμένες κατηγορίες ιστοριών, παράλληλες συνήθειες (π.χ. το αίτημα για δώρο στα *manı* του μπαίραμιού και στα *κάλαντα*). Η συνύπαρξη των διαφορετικών κοινοτήτων στο ίδιο περιβάλλον συνέβαλε στη διάχυση και την αναχώνευση ορισμένων στοιχείων, παρ' ότι οι πολιτισμικές παραδόσεις των τριών κοινοτήτων, όπως αποτυπώνονται στα κείμενα που συλλέχθηκαν, διατηρούν το διακριτό τους χαρακτήρα.

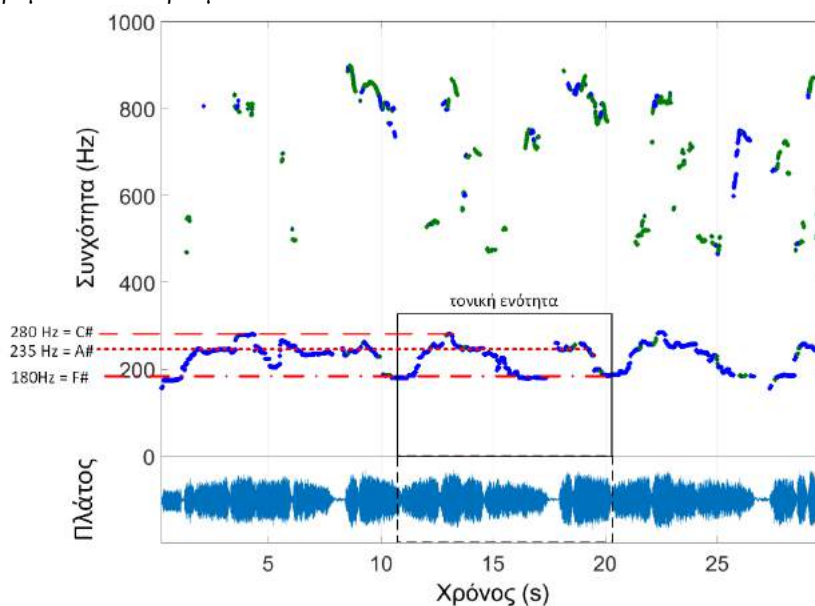
3. Μουσικολογική ανάλυση υλικού

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αναλύθηκαν όλα τα μουσικά κομμάτια της βάσης δεδομένων που είναι διαθέσιμη (24 τραγούδια). Η βάση αποτελείται κυρίως από τραγούδια χωρίς τη συνοδεία μουσικών οργάνων εκτός από την περίπτωση κάποιων Τούρκικων τραγουδιών, των οποίων η εκτέλεση συνοδεύεται από ένα σάζι. Σύμφωνα με τις μαρτυρίες των ίδιων των ανθρώπων που απέδωσαν αυτά τα τραγούδια, αυτά τραγουδιόνταν είτε χωρίς συνοδεία, είτε με τη συνοδεία γκάντας και κάποιου κρουστού (μπεντίρ, ντέφι). Μετά από προσεκτική ακρόαση κρίθηκε ικανοποιητικό να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση μόνο τα 30 πρώτα δευτερόλεπτα από κάθε δείγμα. Μέσα σε αυτό το χρόνο αναπτύσσονται ήδη πάνω από μία φορές (κατά κύριο λόγο 3 – 4 φορές) τα ρυθμικά και αρμονικά μοτίβα που αποτελούν τη δομή των τραγουδιών. Ο περιορισμός στη χρονική διάρκεια του δείγματος που αναλύθηκε επιταχύνει επιπλέον το χρόνο επεξεργασίας και ανάλυσης. Για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού MIR Toolbox [1] το οποίο εκτελείται μέσα από το περιβάλλον της Matlab [2]. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν είναι ο ρυθμός (beat) και η διακύμανση της τονικότητας στο χρόνο (pitch over time). Τέλος, έγινε εκτίμηση του μέτρου (tempo) από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα

συγκεντρώθηκαν σε πίνακα και αναλύθηκαν για να προσδιοριστούν ομοιότητες και διαφορές μεταξύ τους.

Για την τονική ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί το τροπικό μουσικό σύστημα που προέρχεται από την οθωμανική μουσική. Κάθε προσέγγιση με την αρμονία της δυτικής μουσικής είναι άτοπη αφού η λαϊκή παραδοσιακή μουσική είναι κατά βάση μονοφωνική. Το θεωρητικό μουσικό σύστημα των μακάμ έχει ως σκοπό την κωδικοποίηση μονοφωνικών συνθέσεων. Ανήκει στα τροπικά μουσικά συστήματα, κατηγοριοποίηση η οποία αναφέρεται στον τρόπο ανάπτυξης σύμφωνα με τον οποίο οι μελωδίες αναπτύσσονται στα πλαίσια συγκεκριμένων τρόπων. Οι τρόποι αυτοί, γνωστοί ως μακάμ, συγκροτούν ουσιαστικά την οργάνωση ενός συνόλου μελωδικών γνωρισμάτων και ιδιαιτεροτήτων [3].

Στο Σχ.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάλυσης ενός τραγουδιού. Το διάγραμμα εξάγεται από το MIR Toolbox, έπειτα αναγνωρίζονται οπτικά οι τονικές ενότητες, σηματοδοτούνται οι διαφορετικές συχνότητες που βρίσκονται μέσα στην ενότητα και με έναν πίνακα αντιστοιχίας αναγνωρίζεται ο φθόγγος στον οποίο αντιστοιχεί η κάθε συχνότητα. Έπειτα, αναγνωρίζεται ο μουσικός δρόμος (maqam) στον οποίο ανήκει το τραγούδι. Να σημειωθεί ότι λόγω της εκτέλεσης χωρίς συνοδεία πολλές φορές οι εκτελεστές παρουσιάζουν τονική αστάθεια, ή κάνουν μετατροπίες (αλλαγή τόνου), πράγμα που δυσκολεύει την εργασία της αναγνώρισης του δρόμου είτε του ρυθμού.



Σχήμα 1. Διαδικασία ανάλυσης των τραγουδιών.

Ο ρυθμός των τραγουδιών παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα. Τα τραγούδια και από τις τρεις γλωσσικές κοινότητες τραγουδούνται στα 180-250 bpm (ρυθμός για την αξία ογδόου). Αυτό σε μεγάλο βαθμό μπορεί να δικαιολογηθεί από το ότι τα τραγούδια έχουν μεγάλη συνάφεια με τον προφορικό λόγο και την ταχύτητα με την οποία αυτός εκφέρεται. Απόκλιση από αυτή την τάση εμφανίζει μία μικρή ομάδα τραγουδιών της ελληνικής κοινότητας (3) που εντάσσονται στα γαμήλια (130bpm).

Το μέτρο των τραγουδιών ποικίλει. Στην παραδοσιακή μουσική είναι σύνηθες να υπάρχουν ασύμμετρα μέτρα (π.χ. 7/8 , 5/8 κλπ). Τα πομακικά τραγούδια παρουσιάζουν το πιο σύνθετο μέτρο (π.χ 14/8 μοιρασμένα 3-2-2-3-2-2-2). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα συμμετρικά μέτρα (8/8 μοιρασμένα 2-2-4) εμφανίζονται σε όλες τις κοινότητες στα νανουρίσματα.

Από τα Σχ. 4 και 5 (2 και 3) τα αποτελέσματα εμφανίζουν και τη σχετική ποσόστωση της κάθε κατηγορίας ρυθμικής δομής και μουσικού δρόμου για κάθε κοινότητα. Το Σχ. 4 (2) δείχνει ότι για την ελληνική κοινότητα, οι ρυθμικές φόρμες που ακολουθούνται κατατάσσονται κυρίως σε συμμετρικά μέτρα και δεν εμφανίζονται δείγματα στην κατηγορία που δεν περιγράφεται από αυτά τα συμμετρικά ή και τα ασύμμετρα μέτρα. Για τα δείγματα από την τουρκική και πομακική κοινότητα, οι ρυθμικές φόρμες σχεδόν κατανέμονται ισομερώς σε όλες τις ρυθμικές κατηγορίες.

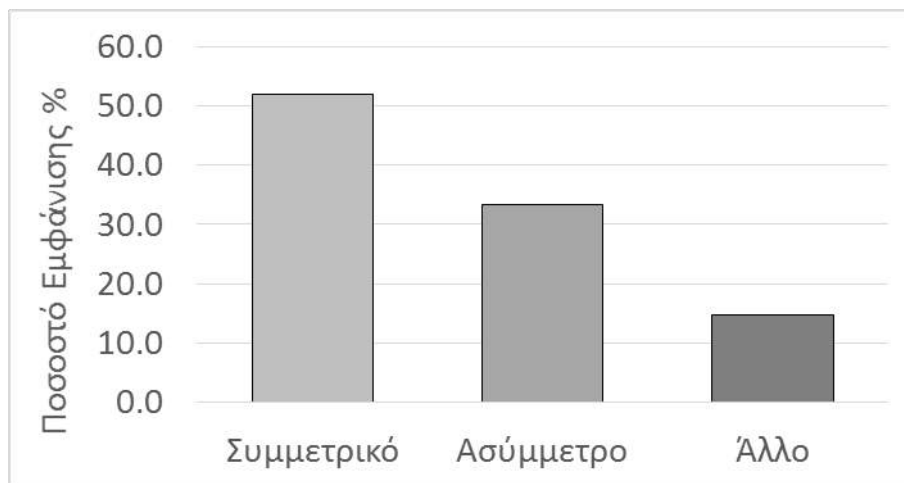
Σε σχέση με τους μουσικούς δρόμους (Σχήμα 5/3), τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δείγματα από την πομακική κοινότητα κατατάσσονται αποκλειστικά σε 2 κατηγορίες δρόμων (ουσάκ και ραστ), ενώ οι κατηγορίες Χουζάμ και Κιουρντί, περιέχουν αποκλειστικά δείγματα της τουρκικής κοινότητας. Αντίστοιχα, η κατηγορία Μινόρε, περιέχει αποκλειστικά δείγματα από την ελληνική κοινότητα.

Σε κάθε περίπτωση, τα παραπάνω συμπεράσματα πρέπει να θεωρηθούν ενδεικτικά, αφού αφορούν μόνο τα διαθέσιμα δείγματα, αναδεικνύουν αφενός κοινά στοιχεία, αλλά και μερικές διαφοροποιήσεις για τα χαρακτηριστικά της μουσικής παράδοσης της κάθε κοινότητας στη Θράκη.

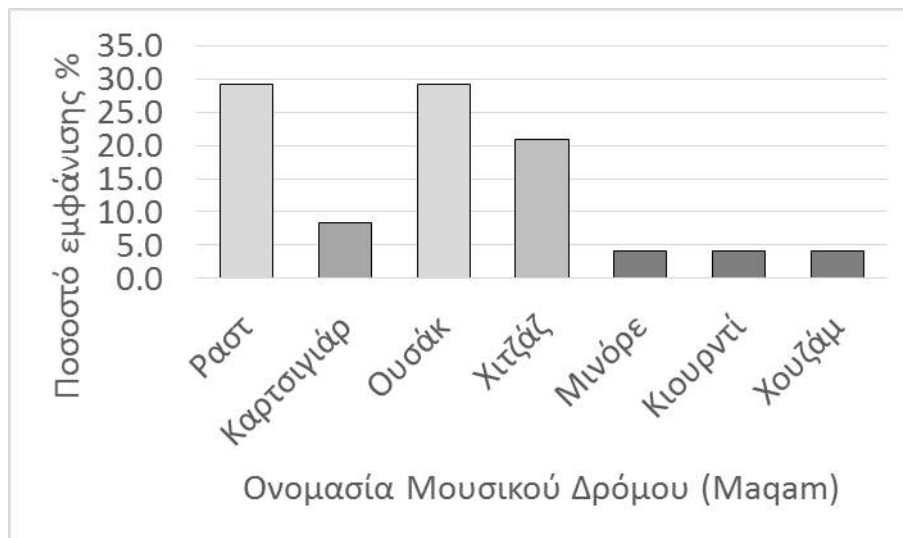
4. Ευχαριστίες

“The research leading to these results has received funding from the [EEA] Mechanism 2009-2014 under Project Contract n° [3768].

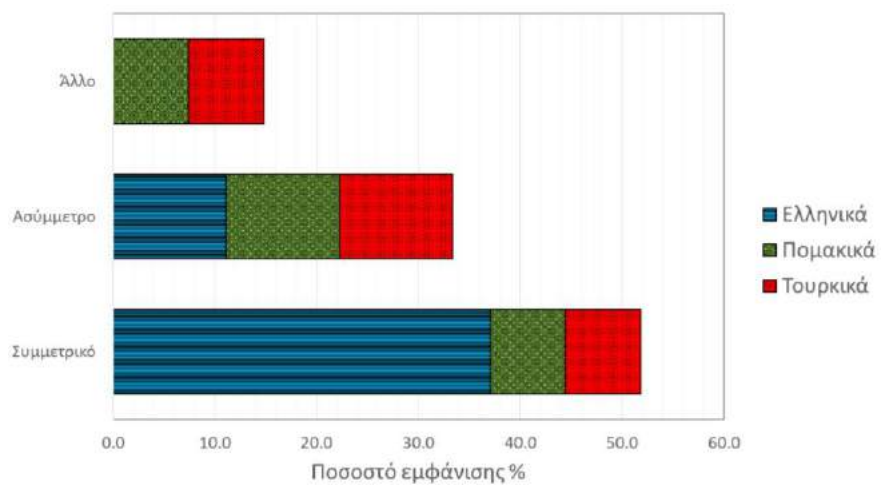
Ευχαριστούμε επίσης την κ. Ελευθερία Δαουλτζή για τη βοήθεια της στην ανάλυση των αρχείων μουσικής.



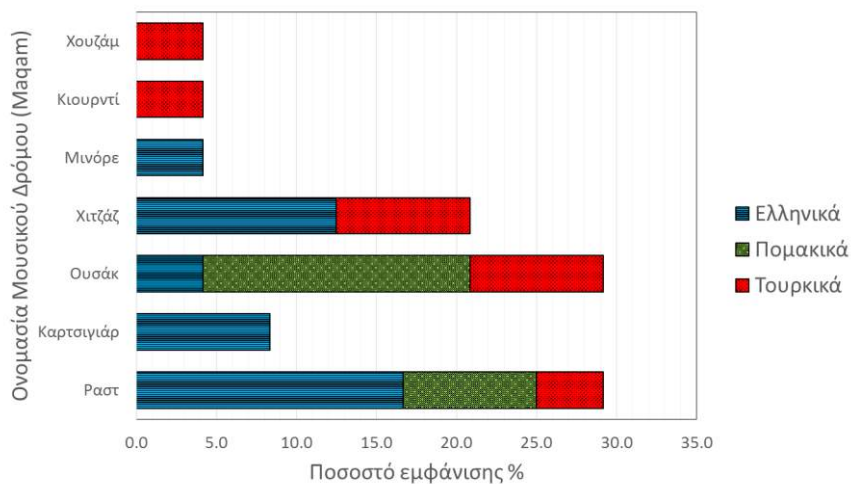
Σχήμα 2. Ποσοστό εμφάνισης μέτρου στα τραγούδια.



Σχήμα 3. Ποσοστό εμφάνισης του κάθε μουσικού δρόμου (maqam) στο σύνολο των τραγουδιών που εξετάστικαν.



Σχήμα 4. Ποσοστά εμφάνισης ρυθμών ανά κατηγορία και ανά κοινότητα.



Σχήμα 5. Τα ποσοστά κάθε μουσικού δρόμου (maqam) συνολικά και κατά κοινότητα.

5. Αναφορές

- [1] M.I.R. Toolbox - <https://www.jyu.fi>
- [2] Matlab - <http://www.mathworks.com>
- [3] «Το αστικό λαϊκό τραγούδι στην Ελλάδα του μεσοπολέμου 1922-1940», Ε. Βούλγαρης, Β.Βανταράκης, Εκδ. Fagotto books.
- [4] Κόκκας Ν. 2006. Η προφορική παράδοση των Πομάκων της Ροδόπης. Θράκη. Ιστορική και λαογραφική προσέγγιση του λαϊκού πολιτισμού της. Επιμέλεια Μ.Γ.Βαρβούνης. Αθήνα: Αλήθεια, σ.271-310.
- [5] Παπαδημητρίου Π. 2011. Ανθολογία Πομακικών τραγουδιών της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη: Αφοί Κυριακίδη.
- [6] ct-audiolink.gr

Συνεδρία Β4: Γενική, Θεωρητική & Εφαρμοσμένη ακουστική

Σήμα περίθλασης γύρω από ημι-επίπεδο ή σφήνα

Πηνελόπη Μενούνου
Επίκουρη Καθηγήτρια /
Πανεπιστήμιο Πατρών

Πέτρος Νικολάου
Υποψήφιος Διδάκτορας /
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά την περίθλαση από ημι-επίπεδο ή σφήνα στο πεδίο του χρόνου, όπως αυτή περιγράφεται μαθηματικά σε ενιαία μορφή για επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα σε προηγούμενη εργασία των συγγραφέων. Η μελέτη της λύσης δείχνει ότι το σήμα περίθλασης: (i) αλλάζει πολικότητα γύρω από το εμπόδιο, (ii) προσεγγίζει το προσπίπτον σήμα για μεγάλους χρόνους ή/και κοντά στα σύνορα σκιάς, ενώ κοντά στο μέτωπο του σήματος και μακριά από τα σύνορα σκιάς έχει χαρακτηριστικά κυλινδρικής εξάπλωσης, και (iii) μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε σε πολύ μεγάλους χρόνους η ύπαρξη του εμποδίου να μη γίνεται αισθητή. Για την περιγραφή των παραπάνω αλλαγών, προτείνεται ένα νέο αδιάστατο μέγεθος, αντίστοιχο με τον αριθμό Fresnel στο πεδίο των συχνοτήτων. Επιπλέον, παρουσιάζεται η δυνατότητα εφαρμογής της λύσης στην περίπτωση κατευθυντικών πηγών και τέλος διαπιστώνεται η καλή συμφωνία με εργαστηριακές μετρήσεις για σφαιρικά σήματα.

Time domain diffraction around half-planes and wedges

ABSTRACT

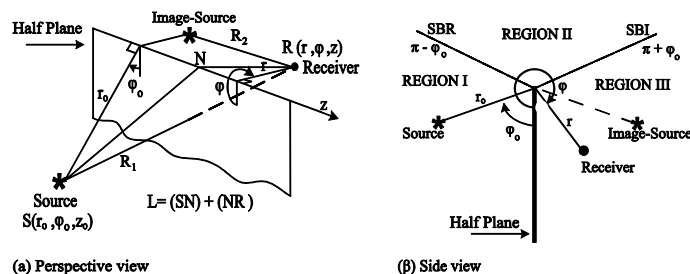
A time domain solution for diffraction around half-planes and wedges previously derived by the authors for all types of incident signals (plane, cylindrical and spherical) is investigated. It is shown that the diffracted signal: (i) changes its polarity around the barrier, (ii) resembles the incident signal at long times and/or close to the shadow boundaries, while it exhibits characteristics of cylindrical spreading close to the diffracted front and away from the shadow boundaries, and (iii) the presence of the barrier is not felt after a very long time. A new variable is introduced (that corresponds to the Fresnel number in the frequency domain) to describe the above mentioned changes. Moreover, the application of the solution for directional sound sources is investigated and its accuracy is tested via comparisons with laboratory measurements for spherical signals.

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το σήμα περίθλασης που δημιουργείται από την πρόσπτωση ενός παλμού πάνω σε ακουστικά σκληρό ημι-επίπεδο ή σφήνα ενώ η ανάλυση γίνεται εξ' ολοκλήρου στο πεδίο του χρόνου. Η γεωμετρία του ημι-επιπέδου βρίσκει πρακτικές εφαρμογές στην περίπτωση των ηχοπετασμάτων, ενώ η γεωμετρία της σφήνας ως τμήμα τριγωνοποιημένων επιφανειών πολύπλοκων γεωμετριών. Τέλος, σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές η ανάλυση είναι αναγκαία στο πεδίο του χρόνου, όπως π.χ. η περίπτωση πρόσπτωσης ενός υπερηχητικού κρότου σε κτίριο, όπου ενδιαφέρει το ακριβές σχήμα του κρότου.

Το πρόβλημα της περίθλασης έχει μελετηθεί εκτενώς στο πεδίο των συχνοτήτων. Στο πεδίο του χρόνου, αντίθετα, οι δημοσιευμένες λύσεις είναι λιγότερες. Διακρίνεται η αναλυτική λύση του Friedlander [1] για επίπεδα και κυλινδρικά κύματα, η αναλυτική λύση των Biot-Tolstoy-Medwin [2] για σφαιρικά κύματα, η οποία έχει επεκταθεί από τον Svensson et. al. [3]. Έχοντας ως αφετηρία τη δουλειά τους στο πεδίο των συχνοτήτων, οι συγγραφείς έχουν παρουσιάσει μια λύση [4] στο πεδίο του χρόνου με τη μορφή κρουστικής απόκρισης για το περιθλώμενο σήμα, η οποία σε αντίθεση με τις υπάρχουσες λύσεις, ισχύει για όλους τους τύπους προσπίπτοντος κύματος (επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά).

Η τυπική γεωμετρία για το πρόβλημα της περίθλασης γύρω από ημι-επίπεδο φαίνεται στο Σχ. 0.1. Με βάση τη γεωμετρική ακουστική το ακουστικό πεδίο γύρω από το ημι-επίπεδο μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχ. 0.1(β). Στη περιοχή I υπάρχει το προσπίπτον και το ανακλώμενο από το ημι-επίπεδο σήμα, στην περιοχή II μόνο το προσπίπτον, ενώ η περιοχή III είναι ζώνη σκιάς. Το σήμα περίθλασης υπάρχει σε όλες τις περιοχές και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Οι περιοχές αφορίζονται από τις γραμμές *SBI* ($\phi = \phi_0 + \pi$) και *SBR* ($\phi = \phi_0 - \pi$), που αποτελούν *σύνορα σκιάς* για την πρόσπτωση και την ανάκλαση αντίστοιχα.



Σχήμα 0.0 Γεωμετρία του προβλήματος της περίθλασης από ημι-επίπεδο

1. Μαθηματική περιγραφή σήματος περίθλασης

Η περίθλαση περιγράφεται μαθηματικά [4] ως απόκριση κρουστικού σήματος, επίπεδου, κυλινδρικού, ή σφαιρικού, προσπίπτοντος στο ημι-επίπεδο ως εξής:

$$P_{global,inf}^d(t, r, \phi, z) = -\frac{1}{4\pi} A_t * (I d_{global}) \tag{1.1}$$

$$I = \frac{2}{\sqrt{t^2 - t_d^2}} H(t - t_d) \quad (1.2)$$

$$d_{global} = d_{global}^i + d_{global}^r = \frac{\bar{t}_1 \Phi_1 \sqrt{t/t_d + 1}}{t - t_d + 0.5\pi \bar{t}_1 \Phi_1^2} + \frac{\bar{t}_2 \Phi_2 \sqrt{t/t_d + 1}}{t - t_d + 0.5\pi \bar{t}_2 \Phi_2^2}, \quad (1.3)$$

όπου οι διάφορες παράμετροι περιγράφονται στον Πίνακα 1.1 και στο Σχ. 0.1 και αναλύονται στην αναφορά [4] όπου επίσης παρουσιάζεται η καλή συμφωνία με τις ακριβείς αναλυτικές λύσεις Friedlander [1] και Biot-Tolstoy-Medwin [2]. Παρατηρούμε ότι το σήμα περίθλασης και για τους τρεις τύπους προσπίπτοντος σήματος μπορεί να ερμηνευτεί ως σήμα ακτινοβολίας από μία γραμμική πηγή (I) με πλάτος A_i και κατευθυντικότητα d_{global} . Η συνάρτηση d_{global} ονομάζεται *συνάρτηση κατευθυντικότητας*. Ο πρώτος όρος της d_{global} , d_{global}^i , και συνακόλουθα της κρουστικής απόκρισης, συνδέονται με το προσπίπτον σήμα, ενώ οι αντίστοιχοι δεύτεροι όροι με το σήμα που ανακλάται από την επιφάνεια του εμποδίου.

Πίνακας 1.1. Παράμετροι των Εξ. (1.1)-(1.3)

	Επίπεδο Κύμα	Κυλινδρικό	Σφαιρικό
A_i :	1	$\frac{2}{\sqrt{t^2 - (r_0/c)^2}} H\left(t - \frac{r_0}{c}\right)$	$1/\sqrt{rr_0}$
t_d :	r/c	r/c	L/c
$\bar{t}_{1,2}$:	$r\pi/2c = \bar{t}$	$rr_0\pi/c(L + R_{1,2})$	$rr_0\pi/c(L + R_{1,2})$
$\Phi_{1,2}$:	$2\sqrt{2}\pi^{-1} \cos(0.5(\phi \pm \phi_0))$		
$\Phi_{1,2}^{wedge}$:	$\pm 2\sqrt{2}\pi^{-1} [\cos((2\pi \pm \phi - \phi_0)/\gamma) \mp \cos(\pi/\gamma)] / \sin(\pi/\gamma)$		

Η παραπάνω λύση αποτελεί επέκταση προηγούμενου μοντέλου, του Μοντέλου Κατευθυντικών Πηγών (ΜΚΠ) [5] (Directive Line Source Model-DLSM), το οποίο έχει την ίδια μορφή, αλλά διαφορετική *συνάρτηση κατευθυντικότητας* d_{dlsm}

$$d_{dlsm} = d_{dlsm}^i + d_{dlsm}^r = \frac{2\sqrt{2}}{\pi\Phi_1} + \frac{2\sqrt{2}}{\pi\Phi_2}. \quad (1.4)$$

Το ΜΚΠ δεν ισχύει κοντά στα σύνορα σκιάς SBI ($\Phi_1 = 0$) και SBR ($\Phi_2 = 0$), καθώς εκεί η συνάρτηση κατευθυντικότητας d_{dlsm} απειρίζεται. Μακριά από τα σύνορα σκιάς και κοντά στο μέτωπο του παλμού, προβλέψεις βασισμένες στο ΜΚΠ βρίσκονται σε καλή συμφωνία με ακριβείς αναλυτικές λύσεις, αλλά και με εργαστηριακές μετρήσεις. Μπορεί να αποδειχθεί ότι για $t \rightarrow t_d$, όπου t_d είναι ο χρόνος άφιξης του παλμού - δηλαδή κοντά στο μέτωπο του παλμού, η γενική συνάρτηση κατευθυντικότητας d_{global} [Εξ. (1.3)] τείνει στην d_{dlsm} [Εξ. (1.4)]. Στη συνέχεια θα ονομάζουμε το χρόνο μετά την άφιξη του σήματος περίθλασης $\tau = t - t_d$ *χρόνο περίθλασης* και αξίζει να σημειώσουμε ότι η Εξ. (1.1) μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου περίθλασης τ ως εξής:

$$P_{global,irf}^d = -\frac{A_t}{4\pi} * \left(\frac{2\bar{t}_1 t_d^{-1/2} \Phi_1}{\tau^{1.5} + \tau^{0.5} (0.5\pi \bar{t}_1 \Phi_1^2)} \right) - \frac{A_t}{4\pi} * \left(\frac{2\bar{t}_2 t_d^{-1/2} \Phi_2}{\tau^{1.5} + \tau^{0.5} (0.5\pi \bar{t}_2 \Phi_2^2)} \right). \quad (1.5)$$

2. Χαρακτηριστικά του σήματος περίθλασης

Στον κεφάλαιο αυτό μέσω παραδειγμάτων σημάτων περίθλασης από απλά προσπίπτοντα σήματα (τετραγωνικούς παλμούς ή κλιμακωτές συναρτήσεις) παρουσιάζονται και αναλύονται χαρακτηριστικά του σήματος περίθλασης. Επισημαίνεται ότι, ενώ αποτελέσματα παρουσιάζονται μόνο για επίπεδα κύματα, η ανάλυση και οι παρατηρήσεις ισχύουν και για τα τρία είδη σημάτων. Η ενοποιημένη μορφή της λύσης αποτελεί εξάλλου ένα βασικό πλεονέκτημα της. Τέλος, η παρουσιαζόμενη ανάλυση που αφορά τους όρους που σχετίζονται με την πρόσπτωση ισχύει αντίστοιχα και για τους όρους που σχετίζονται με την ανάκλαση.

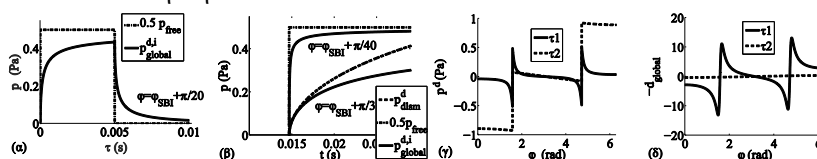
Το Σχ. 2.1(α) απεικονίζει το πρώτο όρο του παλμού περίθλασης από επίπεδο μοναδιαίο τετραγωνικό παλμό μικρής διάρκειας προσπίπτοντα στο ημι-επίπεδο. Συγκρίνοντας με τον προσπίπτοντα παλμό, παρατηρούμε ότι ο παλμός περίθλασης διαφοροποιείται κοντά στο μέτωπο του παλμού, εξαπλώνεται χρονικά και έχει διάρκεια μεγαλύτερη από τη διάρκεια του παλμού πρόσπτωσης, ασυμπτωτικά άπειρη. Χαρακτηριστικά αποκαλούμενα εφ' εξής για συντομία *χαρακτηριστικά κυλινδρικής εξάπλωσης*. Πράγματι, καθώς το ΜΚΠ είναι σε ισχύ και η συνάρτηση κατευθυντικότητας d_{dism} είναι ανεξάρτητη από το χρόνο, η χρονική εξάρτηση της περίθλασης καθορίζεται από το I [Εξ. (1.2)], το οποίο αποτελεί τη λύση Green της δυσδιάστατης κυματικής εξίσωσης και περιγράφει μαθηματικά τη διάδοση ενός κυλινδρικού παλμού.

Το Σχ. 2.1(β) δείχνει την χρονική εξάρτηση του πρώτου όρου του πεδίου περίθλασης μίας επίπεδης μοναδιαίας κλιμακωτής συνάρτησης για θέσεις δέκτη με την ίδια απόσταση ($r = 5\text{m}$) από την ακμή του ημι-επιπέδου, αλλά διαφορετικές γωνιακές θέσεις, μια κοντά ($\phi = \phi_{SBI} + \pi/40$) και μία μακριά ($\phi = \phi_{SBI} + \pi/3$) από το αντίστοιχο σύνορο σκιάς SBI . Παρατηρούμε ότι μακριά από το SBI , το σήμα προσεγγίζει τη αντίστοιχη λύση του ΜΚΠ και έχει χαρακτηριστικά κυλινδρικής εξάπλωσης, ενώ κοντά στο SBI το σήμα περίθλασης προσεγγίζει το ήμισυ του σήματος ελευθέρου πεδίου στην ίδια θέση. Αξίζει να σημειώσουμε ότι για μεγάλους χρόνους περίθλασης, το περιθλώμενο σήμα προσεγγίζει τις τιμές του σήματος ελευθέρου πεδίου, ακόμα και για γωνιακές θέσεις μακριά από το SBI . Οι μεταβάσεις αυτές περιγράφονται από τη συνάρτηση κατευθυντικότητας d_{global} .

Στο Σχ. 2.1(γ) απεικονίζεται η γωνιακή εξάρτηση του σήματος περίθλασης μιας επίπεδης μοναδιαίας κλιμακωτής συνάρτησης για δύο χρονικές στιγμές: σε πολύ μικρό και σε πολύ μεγάλο χρόνο περίθλασης τ . Παρατηρούμε ότι η πολικότητα του παλμού αναστρέφεται στα σύνορα σκιάς αλλά και στην προέκταση του ημι-επιπέδου ($\phi = \pi$). Πράγματι, όπως προκύπτει από την Εξ. (1.3), για μικρούς χρόνους περίθλασης, οι όροι της συνάρτησης κατευθυντικότητας αλλάζουν πρόσημα (ακολουθώντας τα πρόσημα των $\Phi_{1,2}$) και μηδενίζονται στα αντίστοιχα σύνορα σκιάς (π.χ. ο όρος d_{global}^1 στο SBI όπου $\Phi_1 = 0$), ενώ το άθροισμά τους μηδενίζεται και στην προέκταση του ημι-επιπέδου (όπου $\Phi_1 = \Phi_2$) [βλ. 2.1(δ)].

Από την σύγκριση των Σχ. 2.1(γ) και 2.1(δ) συμπεραίνουμε ότι η συνάρτηση κατευθυντικότητας σε μικρούς χρόνους περίθλασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την αλλαγή της πολικότητας και τη κατανομή της ακουστικής ενέργειας γύρω από το ημι-επίπεδο.

Η δεύτερη σημαντική παρατήρηση αφορά τους πολύ μεγάλους χρόνους περίθλασης [βλ. Σχ. 2.1(γ)], όπου το περιθλώμενο σήμα τείνει να πάρει σταθερές τιμές (-1,0,και 1) μέσα σε κάθε μια από τις περιοχές I, II, και III [βλ. Σχ. 0.1(β)]. Επισημαίνεται ότι, αν σε αυτές τις τιμές προστεθούν οι αντίστοιχες τιμές του προσπίπτοντος και ανακλώμενου παλμού από τη γεωμετρική ακουστική, τότε το ολικό σήμα παντού γύρω από το εμπόδιο έχει μοναδιαίο πλάτος, όπως το αρχικό σήμα. Επομένως, σε άπειρο χρόνο περίθλασης η επίδραση του ημι-επιπέδου δεν γίνεται πλέον αντιληπτή.

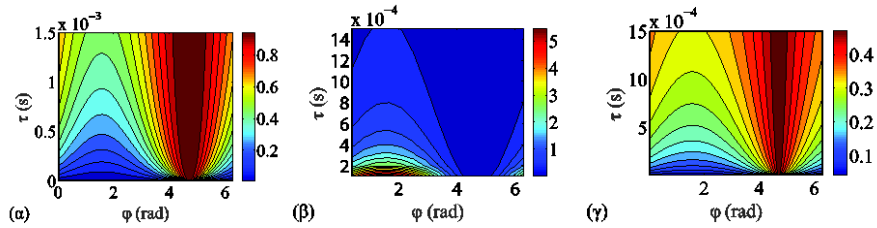


Σχήμα 0.1 Χρονική εξάρτηση του πρώτου όρου του πεδίου περίθλασης [(α)]: επίπεδου τετραγωνικού παλμού; [(β)] επίπεδης μοναδιαίας κλιμακωτής συνάρτησης; Γωνιακή εξάρτηση [(γ)]: του σήματος περίθλασης μιας επίπεδης μοναδιαίας κλιμακωτής συνάρτησης; [(δ)]: της d_{global}^i ; $\phi_0 = \pi/2$; $r = 1m$ $\tau_1 = 0.01ms$; $\tau_2 = 100ms$;

Από τα προηγούμενα παραδείγματα προκύπτει ότι η συνάρτηση κατευθυντικότητας έχει διττό ρόλο: (i) δείχνει την κατανομή της ενέργειας γύρω από το εμπόδιο και (ii) περιγράφει τη μεταβολή των χαρακτηριστικών της εξάπλωσης του σήματος. Σε σχέση με την συνάρτηση κατευθυντικότητας του ΜΚΠ (i) περιγράφει την κατανομή της ενέργειας κοντά στα σύνορα σκιάς, όπου το ΜΚΠ απειρίζεται και (ii) περιγράφει την μεταβολή του είδους της εξάπλωσης, την οποία το ΜΚΠ δεν μπορεί να προβλέψει καθώς αυτή φαίνεται να συμβαίνει ακριβώς στις περιοχές που αυτό δεν ισχύει. Το Σχ. 2.3(α) αποτυπώνει την απόκλιση των πρώτων όρων των δύο συναρτήσεων κατευθυντικότητας d_{global}^i και d_{dism}^i για όλες τις τιμές των γωνιών και των χρόνων περίθλασης. Μικρές τιμές απόκλισης καταδεικνύουν συνδυασμούς γωνιών (δηλαδή θέσης δέκτη)/χρόνου περίθλασης, όπου το περιθλώμενο σήμα μοιάζει με το κυλινδρικό σήμα που προβλέπει το ΜΚΠ και το d_{dism}^i . Μεγάλες τιμές απόκλισης δηλώνουν απομάκρυνση από αυτό. Πράγματι, όπως αναμενόταν, το ΜΚΠ ισχύει για τους αρχικούς χρόνους περίθλασης και μακριά από το σύνορα σκιάς, ενώ κοντά στο σύνορο σκιάς και για μεγάλους χρόνους περίθλασης έχουμε μετάπτωση στο είδος της εξάπλωσης.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η μορφή του παλμού καθορίζεται εν πολλοίς από την σχετική αξία μεταξύ των δύο όρων του παρονομαστή της d_{global}^i . Όταν $t \rightarrow t_d$ και το Φ_1 δεν είναι κοντά στο 0 ($0.5\pi t_1 |\Phi_1|^2 \gg \tau$), δηλαδή για μικρούς χρόνους περίθλασης και μακριά από το σύνορο σκιάς, τότε η συνάρτηση κατευθυντικότητας δεν εξαρτάται από το χρόνο περίθλασης τ , η κρουστική απόκριση είναι ανάλογη του $1/\tau^{0.5}$ [Εξ. (1.5)] και η ακουστική ενέργεια κατανέμεται ανάλογα του $1/\Phi_1$. Στον αντίποδα, αν $0.5\pi t_1 |\Phi_1|^2 \ll \tau$ (δηλαδή είτε σε μεγάλο χρόνο περίθλασης, είτε

κοντά σε σύνορο σκιάς), η χρονική εξάρτηση της συνάρτησης κατευθυντικότητας είναι ανάλογη του $1/\tau^{0.5}$, της κρουστικής απόκρισης $1/\tau^{1.5}$ και η κατευθυντικότητα είναι ανάλογη του Φ_1 . Ακριβώς πάνω στο σύνορο σκιάς, ($\Phi_1 = 0$) τόσο η συνάρτηση κατευθυντικότητας, όσο και η κρουστική απόκριση είναι μηδέν για όλα τα $\tau > 0$. Αντίστοιχα, όταν το τ τείνει στο 0 η κρουστική απόκριση τείνει στο άπειρο, (δηλαδή ανακτούμε τη συνάρτηση Dirac, που θα δώσει το προσπίπτον σήμα καθώς ο δέκτης τείνει προς το σύνορο σκιάς $\Phi_1 \rightarrow 0$).



Σχήμα 0.2 Ισοϋψείς [(α)]: της απόκλισης μεταξύ των d_{global}^i και d_{dism}^i ; [(β)]: του $N_{1,t}$; [(γ)] του σήματος περίθλασης κλιμακωτού σήματος; $\phi_0 = \pi/2$, $r = 0.1m$.

Στην συνέχεια προτείνεται ο ορισμός των εξής νέων αδιάστατων μεγεθών:

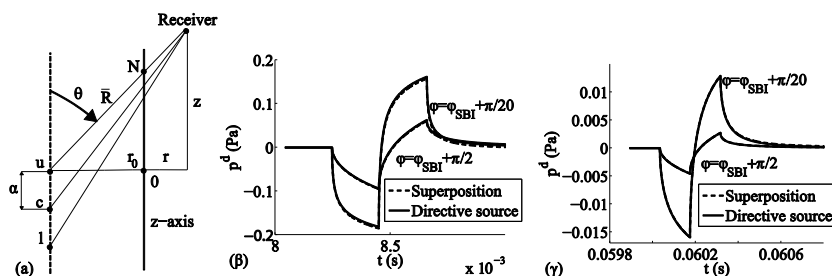
$$N_{1,t} = 0.5\pi t_1 \Phi_1^2 / \tau \quad \text{και} \quad N_{2,t} = 0.5\pi t_2 \Phi_2^2 / \tau \quad (1.6)$$

Το πρώτο αφορά το προσπίπτον σήμα και τους όρους του περιθλώμενου σήματος που συνδέονται με αυτό, ενώ το δεύτερο αφορά το ανακλώμενο σήμα. Η σημασία τους έγκειται στο ότι συσχετίζουν τις αριθμητικές τιμές των όρων του παρονομαστή στην συνάρτηση κατευθυντικότητας όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο και έτσι καθορίζουν το είδος της εξάπλωσης του περιθλώμενου σήματος. Μεγάλες τιμές του $N_{1,t}$ υποδηλώνουν κυλινδρική εξάπλωση και σύμπλευση με το ΜΚΠ. Αντίθετα, μικρές τιμές του $N_{1,t}$ υποδηλώνουν απόκλιση από το ΜΚΠ και εξάπλωση όμοια με του προσπίπτοντος σήματος. Πράγματι, το Σχ. 2.3(β) δείχνει το αριθμό $N_{1,t}$ για όλες τις τιμές των ϕ και τ και οι ισοϋψείς μοιάζουν να έχουν το ίδιο σχήμα με την απόκλιση από το ΜΚΠ [Σχ. 2.3(α)], αλλά και με τις ισοϋψείς του πρώτου όρου του σήματος περίθλασης για μοναδιαία κλιμακωτό σήμα [βλ. Σχ. 2.3(γ)]. Το $N_{1,t}$ άρα μπορεί να προβλέψει το είδος της εξάπλωσης του περιθλώμενου σήματος. Επειδή ο αριθμητής στην σχέση ορισμού $N_{1,t}$ εκφράζει την χρονική καθυστέρηση στην άφιξη του περιθλώμενου σήματος σε σχέση με την άφιξη του σήματος ελεύθερου πεδίου στην ίδια θέση, το $N_{1,t}$ είναι ο λόγος της χρονικής καθυστέρησης που προκαλεί το εμπόδιο στην άφιξη του παλμού προς το χρόνο περίθλασης. Τα μεγέθη $N_{1,t}$ και $N_{2,t}$ μπορούν να θεωρηθούν τα αντίστοιχα των αριθμών Fresnel στο πεδίο των συχνοτήτων, όπως αυτά ορίστηκαν με ενιαίο τρόπο για επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα [7], και τα οποία εκφράζουν τη διαφορά στη απόσταση που διανύει ο ήχος με και χωρίς την παρουσία του εμποδίου προς το μήκος κύματος.

3. Επέκταση σε κατευθυντικές πηγές

Βασικό πλεονέκτημα της λύσης είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε τύπο προσπίπτοντος κύματος. Παρακάτω θα δείξουμε ότι μπορεί επίσης να εφαρμοστεί και για κατευθυντικές πηγές. Η ανάλυση ξεκινάει όπως και στο πεδίο των συχνοτήτων με την υπόθεση ότι η κατευθυντικότητα του σήματος περίθλασης, καθώς και η κρουστική του απόκριση, παραμένουν ίδιες και ανεξάρτητες από την κατευθυντικότητα της πηγής. Το σήμα περίθλασης που παράγει μία κατευθυντική πηγή προκύπτει από τη συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης με τον κατευθυντικό προσπίπτοντα παλμό $f(t)$ στο σημείο N , όπου η ελάχιστη διαδρομή της περίθλασης συναντά την ακμή [βλ. Σχ. 3.1(α)]:

$$P_{global}^{directive} = f(t; \theta(N)) * P_{global,inf}^{omni-directional} \quad (1.7)$$



Σχήμα 0.3 Περίθλαση από κατευθυντικές πηγές. Γεωμετρία του προβλήματος [(α)]; Σύγκριση της επαλληλίας παλμών περίθλασης από κάθε πάντο-κατευθυντική πηγή της συστοιχίας με το σήμα περίθλασης της κατευθυντικής πηγής. Αποτελέσματα κοντά στην ακμή, $(r_0, \phi_0, z_0) = (1m, \pi/2, 0m)$, $(r, \phi, z) = (1m, \phi, 2m)$ [(β)]; Αποτελέσματα μακριά από την ακμή $(r_0, \phi_0, z_0) = (3m, \pi/2, 0m)$ $(r, \phi, z) = (14m, \phi, 10m)$ [(γ)].

Προκειμένου να εξεταστεί η ισχύς της παραπάνω υπόθεσης, θεωρούμε μια κατευθυντική πηγή, η οποία ορίζεται ως η συστοιχία τριών πάντο-κατευθυντικών σημειακών πηγών (u),(c),(l) [βλ. Σχ. 3.1(α)]. Οι πηγές απέχουν απόσταση a μεταξύ τους, ενώ η κάθε μια εκπέμπει σήμα κλιμακωτής συνάρτησης, με την κεντρική πηγή (c) να εκπέμπει κλιμακωτή συνάρτηση πλάτους 2, και τις άλλες δύο (u),(l) πλάτους -1. Εφόσον ο δέκτης βρίσκεται αρκετά μακριά από την συστοιχία (όπου οι διαδρομές των σημάτων των τριών πηγών μπορούν θεωρηθούν παράλληλες και του ίδιου μήκους \bar{R}) και για γωνίες $\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)$, το συνολικό κατευθυντικό σήμα δίνεται ως συνάρτηση της θ ,

$$f^{directive}(t; \theta) = 2H\left(t - \frac{\bar{R} + a \cos \theta}{c}\right) - H\left(t - \frac{\bar{R}}{c}\right) - H\left(t - \frac{\bar{R} + 2a \cos \theta}{c}\right). \quad (1.8)$$

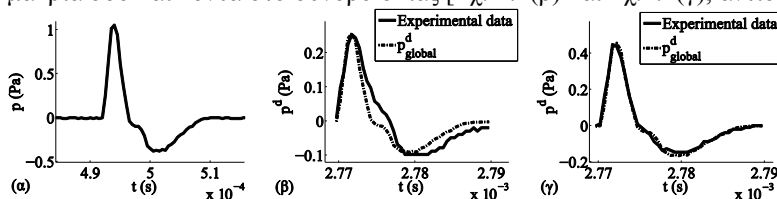
Η συστοιχία πάντο-κατευθυντικών πηγών είναι με αυτόν τον τρόπο ισοδύναμη με μία κατευθυντική πηγή η οποία βρίσκεται στη θέση της άνω πηγής (u) της συστοιχίας και έχει κατευθυντικότητα που περιγράφεται από την Εξ. (1.8). Στην συνέχεια εξετάζουμε την υπόθεση μας αριθμητικά συγκρίνοντας το σήμα περίθλασης όπως προκύπτει από την Εξ. (1.7) με αποτελέσματα που προκύπτουν από την επαλληλία των σημάτων περίθλασης που υπολογίζονται από κάθε μια πηγή της συστοιχίας ξεχωριστά. Στα Σχ. 3.1(β)-(γ) φαίνεται καλή συμφωνία για δέκτες

κοντά και μακριά από το σύνορα σκιάς, καθώς και για δέκτες κοντά και μακριά από την ακμή.

4. Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Η εγκυρότητα της λύσης ελέγχεται στη συνέχεια μέσω συγκρίσεων με μετρήσεις. Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας: (i) σπινθήρες μικρής διάρκειας μεταξύ τριών ηλεκτροδίων τροφοδοτούμενων με τάση 4000 V ως σημειακή ακουστική πηγή, (ii) λεπτό φύλλο αλουμινίου στερεωμένο πάνω σε χοντρό ξύλινο πέτασμα ως ημι-επίπεδο, και (iii) πυκνωτικό μικρόφωνο 1/4" in. Λόγω της πολύ μικρής διάρκειας του προσπίπτοντος σήματος, τα σήματα περίθλασης από την άνω ακμή του εμποδίου είναι χρονικά διαχωρισμένα από σήματα ανάκλασης/περίθλασης από γειτονικά εμπόδια. Λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη και τις μετρήσεις υπάρχουν στην αναφορά [6].

Οι προλέξεις για το σήμα περίθλασης στη ζώνη σκιάς του εμποδίου υπολογίστηκαν από τη συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης και του παραγόμενου από την πηγή σήματος, όπως αυτό μετρήθηκε απουσία του εμποδίου [βλ. Σχ. 4.1(α)]. Η καλή συμφωνία προλέξεων και μετρήσεων επιβεβαιώνεται για δέκτες τόσο μακριά όσο και κοντά στο σύνορο σκιάς [Σχ. 4.1(β) και Σχ. 4.1(γ), αντίστοιχα].



Σχήμα 0.4 Προσπίπτον παλμός $(r_0, \phi) = (0.6m, 90^\circ)$ [(α)]; Περιθλώμενος παλμός $(r, \phi) = (0.35m, \phi_{SBI} + 27^\circ)$ [(β)]; $(r, \phi) = (0.35m, \phi_{SBI} + 1^\circ)$ [(γ)].

5. Αναφορές

- [1] F. G. Friedlander *Sound Pulses* Cambridge University Press, Λονδίνο, (1958).
- [2] H. Medwin «Shadowing by finite noise barriers» *J. Acoust. Soc. Am.* **69**, pp 1060–1064 (1981).
- [3] U. P. Svensson και P. T. Calamia «Edge-Diffraction Impulse Responses Near Specular-Zone and Shadow-Zone Boundaries Acust» *Acta Acust.* **92**, pp 501–512 (2006).
- [4] P. Menounou και P. Nikolaou «Time Domain Edge Diffraction Model» in *23rd International Congress on Sound and Vibration*, Athens, Greece (2016).
- [5] P. Menounou, I. J. Busch-Vishniac και D. T. Blackstock «Directive line source model. A new model for sound diffraction by half planes and wedges» *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, pp 2973–2986 (2000).
- [6] P. Menounou και J. Ho You «Experimental study of the diffracted sound field around jagged edge noise barriers» *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, pp 2843–2854 (2004).
- [7] P. Menounou, «A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers» *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, pp 1828–1838 (2001).

Οπτικός έλεγχος ναοακουστικών κυμάτων σε ημιαγωγούς από υπερβραχείς παλμούς laser

Ευθύμιος Μπακαρέζος^{1,2,a}, Γεώργιος Τσιμπίδης^{3,b}, Ειρήνη Τζιανάκη^{1,4,c}, Στυλιανός Πετράκης^{1,d}, Παναγιώτης Λουκάκος^{3,e}, Κωνσταντίνος Κοσμίδης^{4,f}, Μιχαήλ Ταταράκης^{1,5,g}, και Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,2,h}

¹Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

²Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ευαγγ. Δασκαλάκη 1, 74133 Ρέθυμνο

³Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας Νίκου Πλαστήρα 100, Βασιλικά Βουτών, 70013 Ηράκλειο

⁴Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 45110 Ιωάννινα

⁵Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ρωμανού 3, 73133 Χανιά

^abakarezos@staff.teicrete.gr, Αναπληρωτής Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ^btsibidis@iesl.forth.gr, Ερευνητής ΙΗΔΛ/ΙΤΕ, ^ci.tzianaki@chania.teicrete.gr, Υποψήφια διδάκτορας, ^dspetrak@staff.teicrete.gr, Ειδικός επιστήμονας, ^eloukakos@iesl.forth.gr, Ερευνητής ΙΗΔΛ/ΙΤΕ, ^fkkosmid@uoi.gr, Καθηγητής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ^gm.tatarakis@chania.teicrete.gr, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ^hnpapadogiannis@staff.teicrete.gr, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλληλεπίδραση υπερβραχέων παλμών λέιζερ με την στερεά ύλη οδηγεί στην γένεση διαμηκών ναοακουστικών τάσεων μέσα στα υλικά. Για πυκνότητες ενέργειας του λέιζερ που είναι στην θερμοελαστική περιοχή τα κύματα αυτά μπορεί να έχουν συχνότητες της τάξης του GHz μέχρι και THz, η τιμή των οποίων εξαρτάται τόσο από την χρονική διάρκεια των παλμών λέιζερ όσο και από τους χαρακτηριστικούς χρόνους απόκρισης των υλικών. Αυτά τα δημιουργούμενα από λέιζερ κύματα τάσεων είναι χωρικά εντοπισμένα με μικρή χρονική διάρκεια και βρίσκουν σημαντικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα είναι στον μη-καταστρεπτικό προσδιορισμό των θερμικών και ελαστικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών με τεχνολογικό ενδιαφέρον, στον υψηλής ευκρίνειας μικροσκοπικό χαρακτηρισμό διεπιφανειών, στη μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών ναοδομημένων υλικών, και στη μελέτη βιο-υλικών. Συνεπώς υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την γένεση ναοτάσεων μεγάλης έντασης και για τον υπερταχύ έλεγχο των χαρακτηριστικών τους με κατάλληλα διαμορφωμένους παλμούς του λέιζερ διέγερσης. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν παλμοί λέιζερ με χρονοδιάρκεια ~30 fs για τη δημιουργία ακουστικών τάσεων σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα Si (100). Έγινε χρήση της τεχνικής διέγερσης-ανίχνευσης (pump-probe) για την ανίχνευση αλλαγών της ανακλαστικότητας (fs) και μελετήθηκε η επίδραση της χρονικής αναδιάρθρωσης του φασματικού περιεχομένου (chirp) των παλμών διέγερσης στις παραγόμενες παραμορφώσεις. Τα υποστρώματα του Si καλύφθηκαν από λεπτά φιλμ Ti τα οποία εξυπηρετούσαν διπλό σκοπό: (α) την αποδοτική μετατροπή της ενέργειας του παλμού του λέιζερ σε μηχανική παραμόρφωση, και (β)

την αποδοτική μεταφορά των μηχανικών παραμορφώσεων μέσα στο υπόστρωμα. Επιπρόσθετα, τα οπτικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των φιλμ του Ti είναι τέτοια που επιτρέπουν σε ένα μέρος της ακτινοβολίας των fs παλμών ανίχνευσης να διεισδύσει μέσα στο υπόστρωμα και να αλληλεπιδράσει με τις μηχανικές παραμορφώσεις που διαδίδονται μέσα σε αυτό. Τα αποτελέσματα δείχνουν την παραγωγή γιγάντιων ακουστικών παραμορφώσεων μέσα στο Si, με την μορφή ισχυρών ταλαντώσεων Brillouin, όταν η πυκνότητα ενέργειας του παλμού του λέιζερ διέγερσης είναι $\sim 10 \text{ mJ/cm}^2$ (η οποία είναι μέσα στην θερμοελαστική περιοχή του Ti). Επιπρόσθετα βρέθηκε ότι το πλάτος των ταλαντώσεων αυτών μπορεί να ελεγχθεί αλλάζοντας το chirp των fs παλμών, και ότι οι παλμοί λέιζερ με αρνητικό chirp (δηλαδή προηγείται το φασματικό κομμάτι υψηλής ενέργειας και έπεται το χαμηλής) οδηγούν στο υψηλότερο πλάτος ταλαντώσεων. Αναπτύχθηκε ένα νέο θερμο-μηχανικό μοντέλο, που βασίζεται σε αναθεωρημένο παλαιότερο μοντέλο δύο θερμοκρασιών σε συνδυασμό με ελαστική θεωρία, το οποίο λαμβάνει υπόψη την στιγμιαία συχνότητα των chirped παλμών. Αυτό το μοντέλο βοήθησε στη διείσδυση σε βάθος στους μηχανισμούς και στα φυσικά φαινόμενα της μελέτης.

Optical control of nanoacoustic waves in semiconductors using ultrashort laser pulses

ABSTRACT

The interaction of ultrafast laser pulses with solid matter leads to the generation of longitudinal nanoacoustical strain waves inside the material. When the laser fluencies are within the thermoelastic region the frequencies of these waves are of the order GHz up to THz, depending of the time duration of the generating laser pulses and material characteristic response. These laser-generated nanoacoustical strain waves are localized and short-lived which makes them appealing to many applications, such as the non-destructive measurement of thermal and elastic properties of composite materials of technological interest, the high-resolution microscopic characterization of interfaces, the vibrational properties of nanostructured materials, and the study of biological materials, to name a few. Therefore, there is an increasing interest in the generation of high-amplitude nanostrain waves and their control on ultrafast time scales via shaped pump laser pulses. We have used $\sim 30 \text{ fs}$ laser pulses to generate longitudinal acoustic strains in Si (100) monocrystal substrates. We have also employed a degenerate femtosecond pump-probe transient reflectivity technique for the detection of these waves and for the study of the influence of the rearrangement in time of the spectral content of the generating laser pulses, i.e. the laser pulse chirp, on the induced strain waves. The Si substrates are covered by thin Ti films that serve a dual purpose: (a) they facilitate the efficient conversion of the laser pulse energy into mechanical strain, (b) they allow for the generated mechanical strain to be efficiently transferred into the Si substrate. The optical and geometrical characteristics of the Ti films were such that allowed for a part of the fs probe laser pulses to reach inside the Si crystal so that to probe the strain that travels inside it. Our results showed that giant acoustic strains were generated inside the Si, in the form of strong Brillouin oscillations, when laser fluences of $\sim 10 \text{ mJ/cm}^2$ were used (within the thermoelastic

regime for Ti). Furthermore we have discovered that the amplitude of these oscillations could be controlled by altering the chirp of the used fs laser pulses, and that negatively chirped pulses lead to the generation of the highest amplitude. We have developed a new thermo-mechanical model, based on the combination of a revised two-temperature model and elasticity theory, which takes into account the instantaneous frequency of the chirped femtosecond laser pump pulses. This model helped to gain valuable insight into the mechanisms and effects involved in our studies.

Εισαγωγή

Η αλματώδης ανάπτυξη της επιστήμης των υλικών και της νανοτεχνολογίας απαιτεί την ανάπτυξη επιστημονικών μεθόδων και τεχνικών τόσο για το χαρακτηρισμό των νανοδομών όσο και για την ανάπτυξη υλικών που να έχουν χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να είναι λειτουργικά σε αντίξοα περιβάλλοντα. Για τους λόγους αυτούς τα τελευταία χρόνια υπάρχει εξαιρετικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη ακουστικών κυμάτων χωρικά και χρονικά εντοπισμένων και ταυτόχρονα ικανών να ανιχνευθούν. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των υπερβραχέων παλμών laser προσφέρουν ένα σημαντικό εργαλείο για τη χρήση αυτών των υπερβραχέων, σύμφωνων οπτικών πηγών τόσο για τη δημιουργία όσο και την ανίχνευση τέτοιων ακουστικών κυμάτων [1–3]. Δύο βασικές περιοχές της έρευνας αυτής είναι η δημιουργία μικρών σε διάσταση αλλά γιγάντιων σε ακουστική τάση (stress) ακουστικών κυμάτων καθώς και ο έλεγχος των χαρακτηριστικών τους [4, 5].

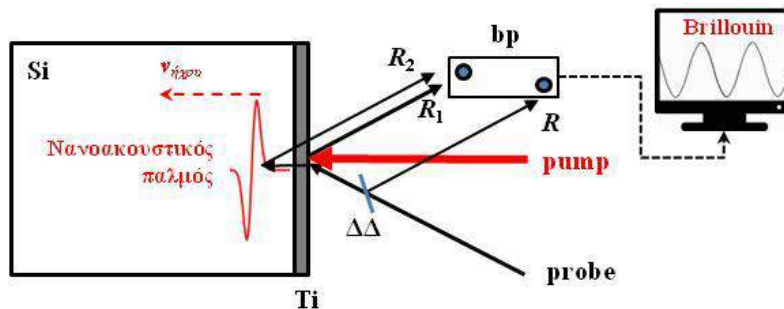
Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται ερευνητικά αποτελέσματα παραγωγής, ανίχνευσης και ελέγχου γιγαντιαίας τάσης χωροχρονικά εντοπισμένων νανοακουστικών κυμάτων επαγόμενων από υπερβραχείς παλμούς laser σε ημιαγωγό με μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον όπως είναι το πυρίτιο (Si), καθώς και η δυνατότητα ελέγχου τους μέσω ειδικά διαμορφωμένων υπερβραχέων παλμών laser. Επιπρόσθετα, πέραν των πειραματικών μεθόδων και αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται, παρουσιάζονται επίσης αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της έρευνας αυτής, το οποίο προσομοιάζει πλήρως τις πειραματικές συνθήκες και ρίχνει φως σε όλες τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα.

1. Πειραματικές μέθοδοι & πειραματικά αποτελέσματα

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι λεπτά, μεταλλικά, πολυκρυσταλλικά φιλμ Τιτανίου (Ti) πάνω σε υπόστρωμα Si (100). Τα μεταλλικά φιλμ είχαν πάχος 25 nm και εναποτέθηκαν σε υπόστρωμα Si (100) πάχους 0.5mm, μέσω unbalanced dc magnetron sputtering σε περιβάλλον υπερκάθαρου αερίου Αργού (Ar).

Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της δημιουργίας και ανίχνευσης νανοακουστικών παλμών με τη χρήση υπερβραχέων παλμών laser. Τόσο η δέσμη διέγερσης (pump) όσο και η δέσμη ανίχνευσης (probe) προέρχονται από ενισχυτή συστήματος laser Ti-Sapphire με ελάχιστη (Fourier-transform limited) χρονοδιάκριση παλμών 30 femtosecond (fs), κεντρικού μήκους κύματος ~795 nm και επαναληψιμότητας 1 kHz. Η δέσμη διέγερσης εστιάζεται κάθετα στην επιφάνεια του συστήματος Ti:Si ώστε να επιτευχθεί φωτεινή ροή της τάξης των 10 mJ/cm², η

οποία είναι κάτω από το κατώφλι αποδόμησης του Ti και εντός της θερμοελαστικής περιοχής για το Ti. Η δέσμη ανίχνευσης εστιάζεται κεντραρισμένα στην διεγερμένη περιοχή και υπό γωνία $\sim 40^\circ$ σε σχέση με τη δέσμη διέγερσης. Η επιφάνεια εστίασης της δέσμης ανίχνευσης είναι ~ 4 φορές μικρότερη από αυτήν της δέσμης διέγερσης ώστε η φωτεινή ροή που επιτυγχάνεται να είναι ~ 20 φορές μικρότερη για να εξασφαλιστεί ότι δεν συνεισφέρει στη δυναμική της διέγερσης.



Σχήμα 1.4 Αρχή λειτουργίας πειραματικής διάταξης διέγερσης-ανίχνευσης (pump-probe) νανοακουστικών παλμών: bp – balanced photodiode, R_1 – ανακλώμενη δέσμη ανίχνευσης από το σύστημα Ti:Si, R_2 – ανακλώμενη δέσμη ανίχνευσης από τον οδεύοντα νανοακουστικό παλμό μέσα στο Si, R – δέσμη ανίχνευσης αναφοράς, $\Delta\Delta$ – διαχωριστής δέσμης

Οι παλμοί laser ανίχνευσης καθυστερούνται χρονικά (time delay) σε σχέση με τους παλμούς laser διέγερσης με ελάχιστο χρονικό βήμα 0.8 fs. Για την ανίχνευση αλλαγών στην ανακλαστικότητα πριν και μετά τη διέγερση χρησιμοποιείται τεχνική εγκλειδωσης φάσης, που περιλαμβάνει μια ισορροπημένη φωτοδιόδο (balanced photodiode), ώστε πολύ μικρές αλλαγές ($\sim 10^{-5}$) να μπορούν να ανιχνευτούν.

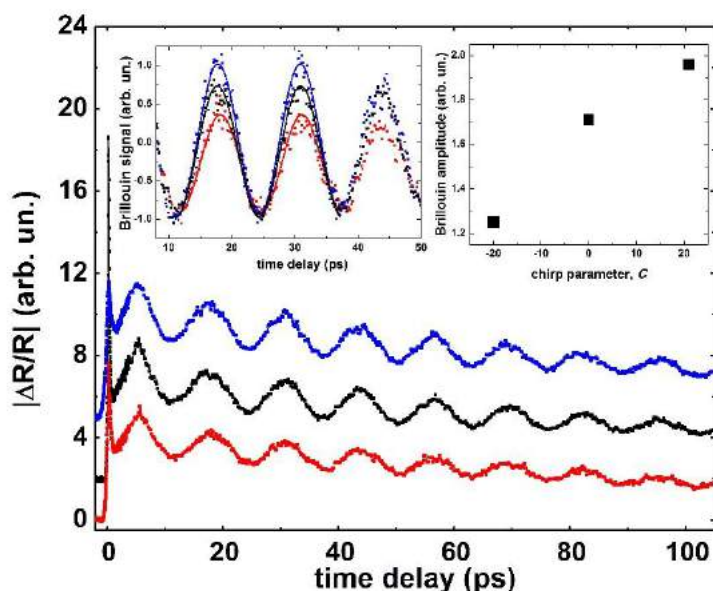
Το φιλμ του Ti έχει το ρόλο του πολύ αποδοτικού μετατροπέα της φωτεινής ενέργειας της δέσμης διέγερσης σε ακουστικό κύμα. Καθώς οι ακουστικές εμπεδήσεις του Ti και του Si είναι κοντινές, το δημιουργούμενο ακουστικό κύμα στο Ti μεταφέρεται πολύ αποδοτικά στο Si, ταξιδεύοντας μέσα σε αυτό με την ταχύτητα του ήχου στο Si. Το κύριο μέρος της δέσμης ανίχνευσης ανακλάται από το σύστημα Ti:Si (R_1), ενώ μικρό μέρος αυτής περνά στο Si και στη συνέχεια ανακλάται από τον οδεύοντα νανοακουστικό παλμό (R_2). Οι R_1 και R_2 οδηγούνται στην μια είσοδο της ισορροπημένης φωτοδιόδου όπου και συμβάλλουν. Στην άλλη είσοδο οδηγείται ένα μικρό μέρος της δέσμης ανίχνευσης, R, πριν την πρόσπτωσή της στο δείγμα. Με αυτό τον τρόπο καταγράφονται οι σχετικές αλλαγές της ανακλαστικότητας $\Delta R/R$.

Καθώς ο νανοακουστικός παλμός ταξιδεύει στο Si αλλάζει η οπτική διαφορά δρόμου μεταξύ των R_1 και R_2 . Ανάλογα με την χρονοκαθυστέρηση της δέσμης ανίχνευσης το καταγραφόμενο σήμα θα ταλαντώνεται περνώντας από ενισχυτική σε αποσβεστική συμβολή (ταλαντώσεις Brillouin). Το πλάτος των ταλαντώσεων αυτών είναι ευθέως ανάλογο με το μέγεθος της παραμόρφωσης (strain) του νανοακουστικού παλμού [6].

Οι fs παλμοί laser λόγω της εξαιρετικά μικρής χρονοδιάρκειάς τους διαθέτουν μεγάλο φασματικό εύρος (~ 80 nm @ $1/e^2$ της γκαουσιανής κατανομής). Όταν όλο

το φάσμα διαδίδεται ταυτόχρονα ο παλμός έχει τη μικρότερη δυνατή διάρκεια (35 fs / Fourier-transform limited). Το σύστημα laser επιτρέπει την χρονική αναδιάταξη του φασματικού περιεχομένου των παλμών (chirp), έτσι ώστε να μπορεί επιλεκτικά να προηγείται (αρνητικό chirp) ή να έπεται (θετικό chirp) χρονικά το φασματικό κομμάτι υψηλής ενέργειας του παλμού. Μετρώντας την παράμετρο του chirp, C , και το πλάτος των ταλαντώσεων Brillouin για κάθε C υπάρχει η δυνατότητα διερεύνησης της επίδρασης του chirp στους δημιουργούμενους νανοακουστικούς παλμούς [7].

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται τυπικά πειραματικά αποτελέσματα των ταλαντώσεων Brillouin για διαφορετικές περιπτώσεις: χωρίς chirp ($C = 0$), με αρνητικό chirp ($C = 21$) και με θετικό chirp ($C = -20$) [7].



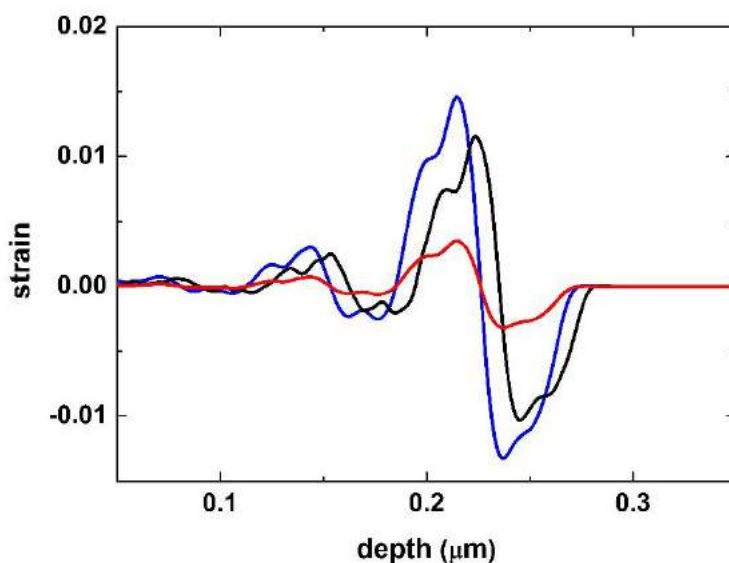
Σχήμα 1.2 Τυπικά πειραματικά αποτελέσματα μέτρησης νανοακουστικών παλμών με τη μορφή ταλαντώσεων Brillouin για Fourier-transform limited (μαύρο χρώμα) παλμούς laser και για παλμούς laser με θετικό (κόκκινο χρώμα) και αρνητικό (μπλε χρώμα) chirp. Στο αριστερά ένθετο φαίνονται τα αποτελέσματα μετά την αφαίρεση του εκθετικού υποβάθρου και το ημιτονοειδές fitting για την εξαγωγή του πλάτους, ενώ στο δεξιά ένθετο παρουσιάζεται το εξαγόμενο πλάτος ταλάντωσης ως συνάρτηση της παραμέτρου του chirp, C

Είναι εμφανές ότι η εισαγωγή αρνητικού chirp δημιουργεί εμφανώς μεγαλύτερο πλάτος ταλαντώσεων Brillouin, δηλαδή μεγαλύτερο νανοακουστικό strain συγκρινόμενο με τις άλλες δύο περιπτώσεις.

2. Θεωρητική μοντελοποίηση

Οι πειραματικές συνθήκες μοντελοποιήθηκαν πλήρως χρησιμοποιώντας εξισώσεις μοντέλου δύο θερμοκρασιών [8] που λαμβάνει υπ' όψη τα μη-θερμικά ηλεκτρόνια [9]. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε ένα νέο θερμο-μηχανικό μοντέλο, που βασίζεται σε αναθεωρημένο παλαιότερο μοντέλο δύο θερμοκρασιών (θερμοκρασίες πλέγματος και ηλεκτρονίων) σε συνδυασμό με ελαστική θεωρία [10], το οποίο λαμβάνει υπόψη την στιγμιαία συχνότητα των chirped παλμών [7]. Επιπρόσθετα, λήφθηκε υπ' όψη η διαστρωμάτωση και γεωμετρία της υπό μελέτη δομής και όλες οι οπτικές, ηλεκτρονικές και ακουστικές ιδιότητες του Ti και του Si. Αφού μοντελοποιήθηκε η αλληλεπίδραση των υπερβραχέων παλμών laser με το Ti για την παραγωγή των ναοακουστικών strain μέσα σε αυτό, με τη βοήθεια του ελαστικού μοντέλου έγινε διάδοση των strain αυτών μέσα στο Si. Με τον τρόπο αυτό ήταν εφικτή η εξαγωγή στιγμιότυπων της μορφής των ναοακουστικών strain ως συνάρτηση του βάθους διεξόδου μέσα στο Si.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται αποτελέσματα της παραπάνω μοντελοποίησης για τη χρονική στιγμή 20 ps μετά τη διέγερση όταν και το ναοακουστικό κύμα βρίσκεται πλήρως μέσα στο Si.



Σχήμα 2.1 Θεωρητικά υπολογισμένες ναοακουστικές παραμορφώσεις (strains) μέσα στο Si παραγόμενες από Fourier-transform limited (μαύρο χρώμα) παλμούς laser και από παλμούς laser με θετικό (κόκκινο χρώμα) και αρνητικό (μπλε χρώμα) chirp τη χρονική στιγμή 20 ps μετά τη διέγερση

Το θεωρητικό μοντέλο επιβεβαιώνει πλήρως τα πειραματικά αποτελέσματα και το γεγονός ότι παλμοί laser με αρνητικό chirp παράγουν ισχυρότερες ναοακουστικές παραμορφώσεις. Από το θεωρητικό μοντέλο μπορεί κανείς να

εξάγει τόσο τον εξαιρετικό χωρικό εντοπισμό που, αν ληφθεί υπ' όψη το θετικό κομμάτι του N-type ακουστικού παλμού (βλ. σχήμα 2.1) είναι της τάξης των 50 nm, όσο και την πολύ υψηλή τιμή του παραγόμενου stress συμπίεσης (compressional stress) όπου για την περίπτωση του αρνητικού chirp (strain ~ 0.015) είναι της τάξης των ~ 2 GPa.

3. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, παράχθηκαν γιγαντιαία νανοακουστικά κύματα σε Si με τη χρήση υπερβραχέων παλμών laser που εκτιμώνται σε λίγα GPa. Αυτό οφείλεται στην ταχεία αλληλεπίδραση του ηλεκτρομαγνητικού παλμού του laser με το Ti που παίζει το ρόλο μετατροπέα και έχει χαρακτηριστικά γρήγορης και αποδοτικής μετατροπής του φωτός σε μηχανικό κύμα. Επίσης, καθώς το Ti έχει πολύ καλό ταίριασμα ακουστικής εμπέδησης με το Si, το παραγόμενο νανοακουστικό κύμα μεταφέρεται αποδοτικά μέσα στο τελευταίο. Παρουσιάστηκαν επίσης αποτελέσματα όπου αναδιατάσσοντας το φασματικό περιεχόμενο των παλμών laser μπορούσαν να ελεγχθούν τα παραπάνω νανοακουστικά κύματα, που σημειωτέον είναι χωρικά εντοπισμένα (λίγες δεκάδες nm) και εξαιρετικά βραχύβια. Αναπτύχθηκε θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει πλήρως την αλληλεπίδραση και συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.

4. Αναφορές

- [1] C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins, and S. B. Palmer, "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals" *J. Appl. Phys.* **51**, 6210–12368 (1980)
- [2] O. B. Wright and K. Kawashima, "Coherent phonon detection from ultrafast surface vibrations," *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1668–1671 (1992)
- [3] C. Rossignol, B. Perrin, B. Bonello, P. Djemia, P. Moch, and H. Hurdequint, "Elastic properties of ultrathin permalloy/alumina multilayer films using picosecond ultrasonics and Brillouin light scattering", *Phys. Rev. B* **70**, 094102 (2004)
- [4] T. Shimada, C. Frischkorn, M. Wolf, and T. Kampfrath, "Maximizing the amplitude of coherent phonons with shaped laser pulses", *J. Appl. Phys.* **112**, 113103 (2012)
- [5] O.V. Misochko, T. Dekorsy, S.V. Andreev, V.O. Kompanets, Yu.A. Matveets, A.G. Stepanov, and S.V. Chekalin, "Effect of intense chirped pulses on the coherent phonon generation in Te", *Appl. Phys. Lett.* **90**, 071901, (2007)
- [6] E. Tzianaki, M. Bakarezos, G.D. Tsibidis, Y. Orphanos, P.A. Loukakos, C. Kosmidis, P. Patsalas, M. Tatarakis, and N.A. Papadogiannis, "High acoustic strains in Si through ultrafast laser excitation of Ti thin-film transducers", *Opt. Express* **23**, 17191–17204, (2015)
- [7] E. Tzianaki, M. Bakarezos, G.D. Tsibidis, S. Petrakis, P.A. Loukakos, C. Kosmidis, M. Tatarakis, and N.A. Papadogiannis, "Controlling nanoscale acoustic strains in Silicon using chirped femtosecond laser pulses", *Appl. Phys. Lett.* **108**, 254102 (2016)
- [8] N.A. Papadogiannis, S.D. Moustazis, and J.P. Girardeau-Montaut, "Electron relaxation phenomena on a copper surface via nonlinear ultrashort single-photon photoelectric emission", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, 2389–2396 (1997)

- [9] E. Carpene, “Ultrafast laser irradiation of metals: Beyond the two-temperature model,” *Phys. Rev. B* **74**, 024301 (2006)
- [10] G.D. Tsibidis, “Thermal response of double layered metal films after ultrashort pulsed laser irradiation: The role of nonthermal electron dynamics,” *Appl. Phys. Lett.* **104**, 051603 (2014)

Συνεδρία A5: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (I)**Η σημασία της διάρθρωσης του χώρου στην εστίαση της αντίληψης σε διαφορετικές πηγές που ακούγονται ταυτόχρονα. Μια παραστατική μέθοδος.**

Ηλίας Παπαγεωργίου
Αρχιτέκτων Μηχανικός
Κανάρη 8, Νέο Ψυχικό
hlipap@teemail.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δυνατότητα διαχωρισμού ήχων αποτελεί χαρακτηριστικό της αντίληψης που επιπλέον μπορεί να ενισχύεται από τη διάρθρωση του χώρου. Διαφορετικές ηχητικές πηγές που ακούγονται ταυτόχρονα από έναν ακροατή, μπορούν να ενισχύονται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με τη χωρική διάταξη, παρά το γεγονός πως ο απ' ευθείας ήχος δεν εμποδίζεται. Η εργασία παρουσιάζει μια παραστατική μέθοδο που καθιστά εύληπτο αυτό το φαινόμενο, μέσω της ηχογράφησης διαφορετικών ηχητικών αποσπασμάτων που παίζονται ταυτόχρονα από διαφορετικά ηχεία που έχουν τοποθετηθεί σε κατάλληλες διατάξεις μέσα στον χώρο.

ABSTRACT

The ability to distinguish different sounds is a characteristic of human perception and, additionally, can be assisted by the articulation of space. Different sound sources that someone can hear, are amplified differently according to the spatial setting, despite the fact that the direct sound of each one of them is not interrupted. The paper describes a presentational method that shows this phenomenon, through the recording of different sound tracks played simultaneously by different speakers that are placed in specific spatial settings

Εισαγωγή

Πολύ συχνά κατά τη διάρκεια της μέρας οι άνθρωποι συνυπάρχουν σε ανοιχτούς ενιαίους χώρους: σε αγορές, σε γραφεία ανοιχτής κάτοψης, σε ανοιχτά σχολεία ή στον δημόσιο χώρο εν γένει. Η πυκνή συνύπαρξη των ανθρώπων συνιστά ένα σημαντικό στοιχείο της ζωής στην πόλη, που της προσδίδει ζωντάνια. Η ταυτόχρονη συνύπαρξη ήχων, όμως, δημιουργεί προβλήματα όχλησης που είναι συχνά αξεπέραστα. Για την επίλυση ή την απάλυνση τέτοιων προβλημάτων, συνήθως επιλέγεται ο πλήρης διαχωρισμός των λειτουργιών ή ο μερικός επιμερισμός του χώρου με πανέλα ή άλλα αρχιτεκτονικά στοιχεία. Συχνά η χρήση τέτοιων διαχωριστικών στοιχείων δεν είναι επιθυμητή, ειδικά όταν η οπτική διαφάνεια είναι

σημαντική. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, όταν οι λειτουργίες δεν είναι αντιδιαμετρικά ασύμβατες μεταξύ τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πιο ανοιχτές χωρικές διατάξεις, καθώς ο χώρος αλλά και η ανθρώπινη αντίληψη συμβάλλουν στον διαχωρισμό των ηχητικών συμβάντων.

1. Αντληπτικός και χωρικός διαχωρισμός ερεθισμάτων

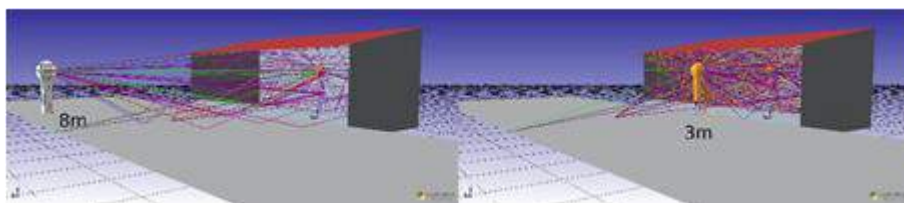
Ο άνθρωπος μπορεί και απομονώνει, μέσω του μηχανισμού της αντίληψης, τους ήχους που τον αφορούν. Από το σύνολο των ηχητικών ερεθισμάτων που γεμίζουν το ηχητικό πεδίο, μπορούμε να εστιάζουμε την προσοχή μας μόνο σε όσα μας ενδιαφέρουν. Το φαινόμενο του “πάρτυ κοκτέιλ” (the cocktail party effect) είναι χαρακτηριστικό. Συνδέεται με τη δυνατότητα ενός ανθρώπου, όταν παραβρίσκεται σε μια κοινωνική συνεννόηση, να μπορεί να παρακολουθεί προσεκτικά μόνο τους διαλόγους που τον ενδιαφέρουν και όχι τους υπόλοιπους. Το φαινόμενο έχει αποδειχτεί πειραματικά. Το 1953 ο Κόλιν Τσέρν [1,2] πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων με στόχο την κατανόηση της ικανότητας διαχωρισμού ανάμεσα σε διαφορετικούς ήχους ή είδη ομιλίας. Ζητήθηκε από έναν αριθμό ανθρώπων να ακούσουν ταυτόχρονα δύο ομιλίες και να προσπαθήσουν να επαναλάβουν μόνο τη μία από αυτές. Διαπιστώθηκε πως εύκολα μπορούσαν οι ακροατές να εστιάσουν την προσοχή τους στη μία ή στην άλλη ομιλία. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε διάφορες παραλλαγές και εναλλακτικά επαναλήφθηκε με ακουστικά ώστε το κάθε αυτί να ακούει διαφορετική ομιλία. Αποδείχτηκε έτσι πως η εμπρόθετη προσοχή ενός ανθρώπου μπορεί να διαχωρίσει δύο ήχους.

Η ανθρώπινη αυτή ικανότητα, όμως, δεν είναι απεριόριστη και διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Σε κάποιο βαθμό είναι επίκτητη και εξαρτάται από την ηλικία και το γενικότερο πνευματικό επίπεδο του ακροατή. Για παράδειγμα, στα ανοιχτά σχολεία με ανοικτή κάτοψη, όπως εκείνα που σχεδιάστηκαν και λειτούργησαν στη δεκαετία του 60 στο εξωτερικό, τα παιδιά δυσκολεύονταν να παρακολουθήσουν το μάθημα καθώς οι φωνές από τους άλλους δασκάλους αποσπούσαν την προσοχή τους [3]. Η δυνατότητα διαχωρισμού ήχων εξίσου εξαρτάται από τη διαφορά στην ηχητική πίεση ανάμεσα στις διαφορετικές πηγές. Μετά από ένα σημείο, ο δυνατότερος ήχος επικαλύπτει τον ασθενέστερο και ο ακροατής μπορεί να παρακολουθήσει πολύ ευκολότερα τον δυνατότερο ήχο.

Το ερώτημα που εξετάζεται εδώ είναι αν και κατά πόσο η διαμόρφωση του χώρου μπορεί να συμβάλει στον διαχωρισμό των ηχητικών ερεθισμάτων που προέρχονται από ηχητικές πηγές που ακούγονται ταυτόχρονα ενισχύοντας μόνο μία από αυτές. Αν, δηλαδή, σε έναν ενιαίο χώρο με οπτική και άρα ακουστική διαφάνεια μπορούν να δημιουργηθούν ιδιαίτερες περιοχές που, όντας σε επαφή με τις γειτονικές τους, μπορούν να συγκεντρώσουν ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας εντός τους. Επισημαίνεται πως στην παρούσα εισήγηση δεν εξετάζεται η πλήρης, ή έστω μερική, ηχομόνωση, που είναι αδύνατη σε ανοιχτούς χώρους, αφού ο ήχος περιθλάται ακόμα και μέσα από μικρά ανοίγματα. Αντίθετα μελετώνται περιπτώσεις όπου ο απ' ευθείας ήχος διαφορετικών πηγών φτάνει ανεμπόδιστος στον ακροατή. Η γεωμετρία του χώρου σε αυτές τις περιπτώσεις είναι σημαντική. Η παρουσία πρώτων ανακλάσεων μπορεί να ενισχύσει την ηχητική πίεση μιας πηγής. Συγκεκριμένες χωρικές διατάξεις, όπως μια γωνία, ένα Π, μια εσοχή ή και καμπύλες διατάξεις μπορούν να συμβάλλουν στη συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας

βοηθώντας στην εστίαση της προσοχής του ακροατή σε μία συγκεκριμένη πηγή. Η γεωμετρία της στέγης και του δαπέδου παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο.

Για παράδειγμα, κάτω από μία στοά με κεκλιμένη στέγη (εικόνα 1), οι πρώτες ανακλάσεις, αλλά και άλλα φαινόμενα όπως ο πλαταγισμός, συγκεντρώνουν την ηχητική ενέργεια και συνεπώς αυξάνουν την ηχητική πίεση της πηγής. Αντίθετα, έξω από τη στοά ο δέκτης δεν δέχεται όλες αυτές τις ανακλάσεις. Εξίσου, αν μια άλλη πηγή βρίσκεται έξω από τη στοά οι ανακλάσεις προς τον υπόλοιπο υπαίθριο χώρο δεν είναι τόσο έντονες.



Εικόνα 1. Ανακλάσεις στα πρώτα 50msec, εντός κι εκτός στοάς με κεκλιμένη στέγη, στην εκκλησία του Αγίου Πέτρου στη Μόλα της Πάρνηθας. Αριστερά ο δέκτης βρίσκεται σε απόσταση 8μ από την πηγή, ενώ δεξιά βρίσκεται κάτω από τη στέγη σε απόσταση 3μ από την πηγή. Πρόγραμμα μοντελοποίησης: Olive Tree Lab 3.0

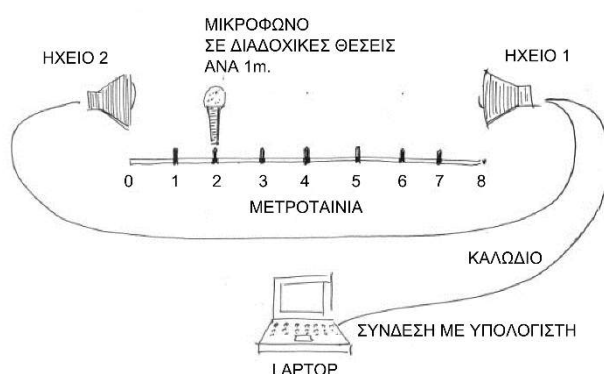
Ανάλογα με τον βαθμό περίκλεισης μιας χωρικής διάταξης μπορούν να δημιουργηθούν “άυλα” ακουστικά όρια στον χώρο, παρά το γεγονός πως ο απ’ ευθείας ήχος όλων των πηγών συνεχίζει να ακούγεται. Ακουστικές παράμετροι, όπως η καταληπτότητα (D50) περιγράφουν τη συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας σε μία περιοχή, με μετρήσιμα και συγκρίσιμα αριθμητικά μεγέθη. Τέτοιου είδους μεγέθη όμως, δεν είναι απολύτως κατανοητά σε όποιον δεν είναι εξοικειωμένος με τις βασικές έννοιες της ακουστικής. Γι’ αυτόν τον λόγο επινοήθηκε η παρακάτω παραστατική μέθοδος.

2. Μια παραστατική μέθοδος

Για την καλύτερη κατανόηση αλλά και παρουσίαση του φαινομένου της ταυτόχρονης παρουσίας ηχητικών πηγών επινοήθηκε μια παραστατική μέθοδος, που απομονώνει και αναδεικνύει τη σημασία της διάρθρωσης του χώρου στη συγκέντρωση της ηχητικής ενέργειας. Η συγκεκριμένη μέθοδος καθιστά ακουστές και εύληπτες χωρικές διαφοροποιήσεις και άυλα όρια, χωρίς να είναι απαραίτητο να απεικονίζονται με αριθμητικά μεγέθη ή άλλου είδους οπτικοποιήσεις. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να γίνουν αντιληπτές από οποιονδήποτε.

Η μέθοδος έχει ως εξής: Σε ένα ενιαίο ηχητικό αρχείο μιξάρονται δύο διαφορετικά ηχητικά αποσπάσματα που ακούγονται ταυτόχρονα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε το κάθε απόσπασμα να παίζει σε διαφορετικό ηχείο. Τα ηχεία είναι δύο απλά ηχεία υπολογιστή, μάρκας Hama ισχύος 2x7 Watt. Το μόνο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που διαθέτουν είναι πως παίρνουν ρεύμα από τη θύρα USB του υπολογιστή, οπότε το όλο σύστημα δεν χρειάζεται ρεύμα. Για να απέχουν την επιθυμητή απόσταση, προστέθηκε καλώδιο περίπου 12 μέτρων ανάμεσα στο πρώτο και το δεύτερο ηχείο.

Τα ηχεία τοποθετούνται σε διαφορετικές χωρικές διατάξεις, σε απόσταση 8 μέτρων μεταξύ τους. Ενώσω παίζουν ταυτόχρονα, ένας ψηφιακός εγγραφέας με πυκνωτικό μικρόφωνο (Zoom H1), πάνω σε τρίποδο, ηχογραφεί, ανά ένα μέτρο, τον ήχο που δημιουργείται ανάμεσά τους. Η ηχογράφηση γίνεται σε αρχεία WAV στο 90% του Input Level. Η εικόνα καταγράφεται και με βιντεοκάμερα. Εκ των υστέρων το ηχογραφημένο αρχείο του εγγραφέα, μιξάρεται με το βιντεοσκοπημένο αρχείο και σβήνεται ο ήχος της κάμερας. Προκύπτει έτσι ένα βίντεο όπου, ενώ η εικόνα δείχνει τη μετακίνηση του μικροφώνου ανάμεσα στα ηχεία, ο ήχος του προκύπτει από τη διαφορετική ηχογράφηση κάθε θέσης.



Εικόνα 2. Διάταξη ηχογράφησης, αποτελούμενη από φορητό υπολογιστή, δύο ηχεία (Hama 2x7 Watt), μια μετροταινία και έναν ψηφιακό εγγραφέα Zoom H1.

Επιλέχτηκαν δύο χαρακτηριστικά ηχητικά αποσπάσματα. Στο πρώτο το ένα ηχείο παίζει το ρεφραίν από την *Tarantella Pizzicarela Mia* των Encardia και το άλλο την *Tarantella Pizzica Nova*, των Ghetonia. Το δεύτερο απόσπασμα προέρχεται από το ρεφραίν του τραγουδιού *Τσίγλα* της Ντενεκεδούπολης. Το απόσπασμα έχει κοπεί σε δύο μέρη που μισαρίστηκαν το ένα πάνω στο άλλο. Και στα δύο ηχητικά αποσπάσματα τα μέρη έχουν τον ίδιο ρυθμό. Παρά τις ομοιότητες, όμως, έχουν διαφορές στη χροιά και την ένταση της φωνής των τραγουδιστών αλλά και στο είδος της αρχικής εγγραφής. Για την εξισορρόπηση του δεξιού και του αριστερού ηχείου έγιναν δοκιμές σε κενό χώρο με διαφορετικές μίξεις που ηχογραφήθηκαν και τελικά επιλέχτηκαν εκείνες που θεωρήθηκαν πως με το αυτί αλλά και στο ηχογραφημένο απόσπασμα ακούγονταν ακριβώς ίδιες. Τα ηχητικά αποσπάσματα παίζονται πάντα από τον VLC Media Player στο 130% της έντασης για λόγους τυποποίησης. Σημειώνεται πως πριν από κάθε ηχογράφηση πραγματοποιούνταν έλεγχος του αποτελέσματος με το αυτί, όχι μόνο από τον συγγραφέα αλλά και από περαστικούς και φίλους που τύχαινε να παραβρίσκονται στον χώρο τη στιγμή της εκτέλεσης. Σε όλα τα παραδείγματα το μικρόφωνο καταγράφει περίπου ό,τι ακούγεται και με το αυτί.

Ανάλογα με τη χωρική διάταξη στην οποία τοποθετούνται τα ηχεία, μπορούν να συμβούν δύο διαφορετικά πράγματα: Είτε ο ήχος των δύο ηχείων συγχέεται εντελώς, είτε ακούγονται ξεχωριστά και κάποια στιγμή υπάρχει μια μετάβαση από

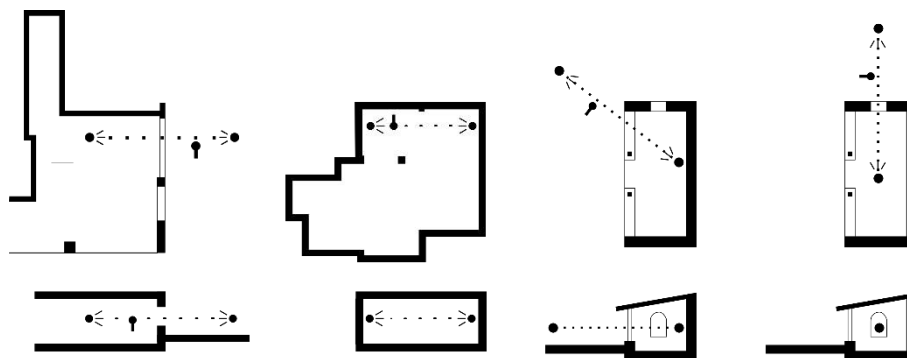
το ένα στο άλλο. Επισημαίνεται πως πάντα είναι ακουστό το δεύτερο ηχείο. Όμως από κάποιο σημείο και πέρα παρατηρείται μια μετάβαση από το ένα ηχείο στο άλλο. Ανάλογα με το είδος της διάταξης, η μετάβαση είναι περισσότερο ή λιγότερο απότομη. Στη συνέχεια περιγράφονται τέσσερα χαρακτηριστικά παραδείγματα. Οι διατάξεις απεικονίζονται σε κάτοψη και τομή στην εικόνα 3. Σε κάθε παράδειγμα αναφέρεται το είδος της χωρικής διάταξης και ο περιβαλλοντικός θόρυβος που καταγράφηκε εκείνη τη στιγμή.

1. Σε pilotis πολυκατοικίας, τα δύο ηχεία τοποθετήθηκαν εντός κι εκτός ενός χωρικού “διαφράγματος” που δημιουργείται από ένα στηθαίο 80cm και το δοκάρι. Έξω από το διάφραγμα το έδαφος είναι από γκαζόν ενώ μέσα στο pilotis είναι από βοτσαλόπλακα. Από την ηχογράφιση προκύπτει πως ο ήχος των δύο ηχείων διαχωρίζεται σχετικά άνετα. Περιβαλλοντικός Θόρυβος: 42 dB(A).

2. Μέσα σε ένα υπόγειο γκαράζ, τα ηχεία τοποθετήθηκαν σε δύο αντικριστές γωνίες. Ο ήχος των ηχείων ακούγεται σχεδόν όμοια σε κάθε σημείο του χώρου, ειδικά στο κέντρο του, χωρίς να υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση. Η μεγάλη αντήχηση περιορίζει κάπως την ενοποίηση. Περιβαλλοντικός θόρυβος: 32 dB(A).

3. Στο εκκλησιάκι του Αγίου Πέτρου, στη Μόλα της Πάρνηθας (είναι το ίδιο που μοντελοποιείται στην εικόνα 1 και απεικονίζεται στην εικόνα 4), τα ηχεία τοποθετήθηκαν εντός κι εκτός του ημιυπαίθριου χώρου που καλύπτεται με κεκλιμένη στέγη. Για λόγους χώρου η τοποθέτηση έγινε διαγώνια. Μέσα στη στοά, ο ήχος είναι πιο έντονος καθώς ενισχύεται από τις ανακλάσεις της στέγης και των γύρω τοίχων. Περιβαλλοντικός θόρυβος: 33 dB(A).

4. Στον ίδιο χώρο τα ηχεία τοποθετήθηκαν εντός κι εκτός της στοάς εκατέρωθεν ενός παραθύρου, που κάνει τα ηχεία να έχουν οπτική και άρα ακουστική επαφή μεταξύ τους. Η διαφορά στην αντίληψη των δύο ηχείων μέσα και έξω από τη στοά είναι εμφανής.



Εικόνα 3. Χωρικές διατάξεις σε κάθε ηχογράφιση. Από αριστερά: 1. Διάφραγμα σε pilotis, 2. Κλειστό γκαράζ με αντήχηση, 3. Στοά με κεκλιμένη στέγη, 4. Η ίδια στοά μέσα από ένα παράθυρο. Πάνω: κάτοψη, κάτω: τομή. Σε κάθε διάγραμμα σημειώνονται οι θέσεις των ηχείων.

Μέσα από αυτή την παραστατική μέθοδο γίνεται σαφής η σημασία επιφανειών ικανού μεγέθους, των οποίων οι ανακλάσεις, εκτός από την ενίσχυση της ηχητικής πίεσης, “γεμίζουν” τον ήχο προσδίδοντας του μικρή αντήχηση. Ο χώρος αποκτά μια αίσθηση “εσωτερικότητας” ακόμα κι όταν είναι στο ύπαιθρο. Σε αρκετά

παραδείγματα μία τουλάχιστον περιοχή μπορούσε να θεωρηθεί αυτόνομη, σε τέτοιο βαθμό που ο ήχος του δεύτερου ηχείου, αν και ακουστός, να είναι σχεδόν αμελητέος. Κάποιος μπορούσε να εστιάσει την προσοχή του στο ένα ηχείο χωρίς να ενοχλείται από το αντιδιαμετρικό του. Σημειώνεται, τέλος, πως τα ηχεία που χρησιμοποιήθηκαν έχουν κατευθυντικότητα κυρίως προς τα μπροστά και συνεπώς χάνονται κάποιες ανακλάσεις από τον χώρο. Η επιλογή τους προέκυψε από καθαρά πρακτικούς και οικονομικούς λόγους.

Η παρακολούθηση των συγκεκριμένων βίντεο καθιστά εύληπτη, ακόμα και σε κάποιον που δεν έχει γνώσεις ακουστικής, τη σημασία του χώρου γενικότερα αλλά και συγκεκριμένων χωρικών διατάξεων ειδικότερα για τον διαχωρισμό ήχων. Σε έναν αρχιτέκτονα, για παράδειγμα, μπορεί να γίνει σαφέστερο πως οι συνθετικές αποφάσεις έχουν συνέπειες στην ακουστική λειτουργία του χώρου. Συχνά στους αρχιτέκτονες δίνεται η εντύπωση πως η ακουστική είναι ένα εξειδικευμένο τεχνικό αντικείμενο που αφορά κλειστούς χώρους ακρόασης ή περιορίζεται στην ηχομόνωση των κτιρίων. Όμως όλη η επικοινωνία των ανθρώπων γίνεται με ήχους. Η κοινωνικότητα και η ζωή σε κάθε σημείο και γωνιά της πόλης συνδέεται με ήχους που άλλοτε επιθυμούμε να ακούμε και άλλοτε όχι. Ο χώρος παίζει έναν σημαντικό ρόλο σε αυτόν τον διαχωρισμό και συνεπώς στον τρόπο με τον οποίον συνυπάρχουν μεταξύ τους οι άνθρωποι.



Εικόνα 4. Ηχογράφηση στη στοά της εκκλησίας του Αγίου Πέτρου στη Μόλα της Πάρνηθας

3. Αναφορές

[1] Cherry, Colin, «Some experiments on the recognition of speech, with one and two ears», in *The journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 25, no. 5, p. 975-979, (1953)

[2] Gazzaniga, Michael, Ivry, Richard & Mangun George, *Cognitive Neuroscience, The Biology of the mind*, W.W Norton & Company, New York (2002)

[3] Hertzberger, Herman, *Space and Learning: Lessons in Architecture 3*, 010Publishers, Rotterdam (2008), σελ. 60.

Μελέτη και πρόταση εφαρμογής για την βελτίωση της ακουστικής μεγάλου αμφιθεάτρου πολλαπλής χρήσης

Ευάγγελος Ευστρατιάδης^a, Gottfried Schubert^b, Ευθύμιος Μπακαρέζος^{1,c}, και Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,d}

¹Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Ευαγγ. Δασκαλάκη 1, 74133 Ρέθυμνο

^a v.efstratiadis@gmail.com, Σύμβουλος Ακουστικής, ^b schubert.athens@gmail.com, Σύμβουλος Ακουστικής / Dr.G.Schubert-Acoustical Consultants, ^c bakarezos@staff.teicrete.gr, Αναπληρωτής Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ^d nrapadogiannis@staff.teicrete.gr, Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ακουστική μελέτη και πρόταση εφαρμογής για την βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς του αμφιθεάτρου πολλαπλών χρήσεων του Κολλεγίου Ψυχικού του Ελληνοαμερικανικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος. Λόγω της ιδιαιτερότητας της συμμετρικής ελλειψοειδούς φύσεως του χώρου και των ακουστικών προβλημάτων που εντοπίστηκαν, παρουσιάζει ενδιαφέρον ο τρόπος προσέγγισης τόσο από πλευράς αξιολόγησης της υφιστάμενης ακουστικής του, όσο και σε ότι αφορά την αντίστοιχη πρόταση λύσης.

Acoustic study and implementation recommendation for the acoustical improvement of a large multipurpose auditorium

ABSTRACT

In this project the acoustic study for the acoustic improvement of the “Hellenic-American Educational Foundation, Athens College” multipurpose auditorium is presented. Due to the symmetric elliptical nature of the structure, the approach regarding the evaluation of the auditorium’s current acoustics and the corresponding solutions, are of great interest.

Εισαγωγή

Στο Μεγάλο Αμφιθέατρο του Κολλεγίου Αθηνών-Κολλεγίου Ψυχικού διαπιστώθηκαν και επιβεβαιώθηκαν τρία από τα πιο σημαντικά ακουστικά προβλήματα για έναν χώρο, όπως φαινόμενα ηχούς, εστιασμού του ήχου, καθώς και μια ηχητική «τρύπα» στο άνω κεντρικό και άνω ακροατήριο, τα οποία υποβάθμιζαν την γενικότερη ακουστική της αίθουσας και δυσχέραιναν την καταληπτότητα ομιλίας. Η συμπεριφορά αυτή μοντελοποιήθηκε με χρήση μεθόδων ray tracing και γεωμετρικής οπτικής κοίλων επιφανειών, εκτιμώντας τις αιτίες της ηχούς και

καταδεικνύοντας ότι η εστίαση του ήχου είναι απόρροια της συμμετρικής ελλειψοειδούς φύσεως του χώρου. Επομένως, ήταν πολύ σημαντικό αρχικά να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά αυτά τα ακουστικά προβλήματα, χωρίς παράλληλα να επηρεαστούν ιδιαίτερα τα εν γένει οριακά επίπεδα του χρόνου αντήχησης. Απαραίτητη κρίθηκε η καλλιέργεια πρώτων ανακλάσεων, ειδικά στο κεντρικό και άνω ακροατήριο, για την ποιοτική αντίληψη και στην περίπτωση μουσικών παραστάσεων. Από την άλλη, ο περιορισμένος όγκος και διαστάσεις του αμφιθεάτρου, δεν επέτρεπαν πολλά περιθώρια επιλογής και διαμόρφωσης του χώρου, με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να μεταβάλει την ακουστική του ταυτότητα ανάλογα με τη χρήση. Στόχος ήταν επομένως η εύρεση της χρυσής τομής για μια πρόδηλη εφαρμογή που περίτεχνα θα επέτρεπε στην ακουστική του αμφιθεάτρου να προσδιοριστούν οι θέσεις ακουστικών ανακλαστών με τη μέθοδο εικονικών πηγών και ελλείψεων, και σχεδιάστηκαν ανακλαστικές επιφάνειες και διαχυτικές συστοιχίες. Οι προτεινόμενες λύσεις προσομοιώθηκαν στο λογισμικό Catt Acoustic, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακουστική συμπεριφορά του αναβαθμισμένου χώρου και συνεπώς η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων ακουστικών παρεμβάσεων.

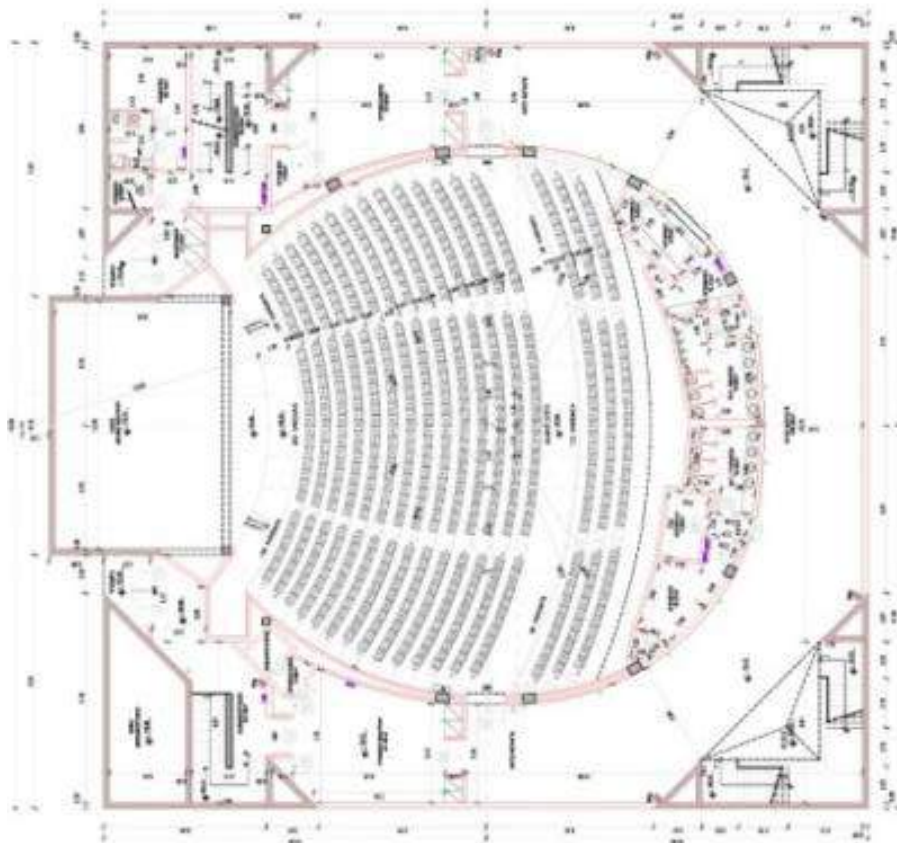
1. Περιγραφή της αίθουσας

Το αμφιθέατρο είναι κατά το ήμισυ κάτω από τη γη, ενώ βρίσκεται εντός του προαυλίου χώρου του Ελληνοαμερικάνικου Κολλεγίου που εδράζει σε μια ήσυχη περιοχή του Ψυχικού και περιβάλλεται από πυκνή βλάστηση, εξασφαλίζοντας έτσι κάτι παραπάνω από ιδανικές συνθήκες απομόνωσης από τον εξωτερικό θόρυβο. Επιπροσθέτως, περιβάλλεται από έναν διάδρομο, μεγάλου πλάτους με επένδυση μοκέτας που απορροφά ικανοποιητικά πιθανή οχλαγωγία έξω από την αίθουσα. Ωστόσο, οι πόρτες εισόδου στην κεντρική αίθουσα, συνιστούν αλλαγή κι αεροστεγή σφράγιση, ενώ κύριο παράγοντα όχλησης στο αμφιθέατρο αποτελεί το σύστημα κλιματισμού κι εξαερισμού και το μηχανοστάσιο το οποίο εφάπτεται με τη σκηνή.

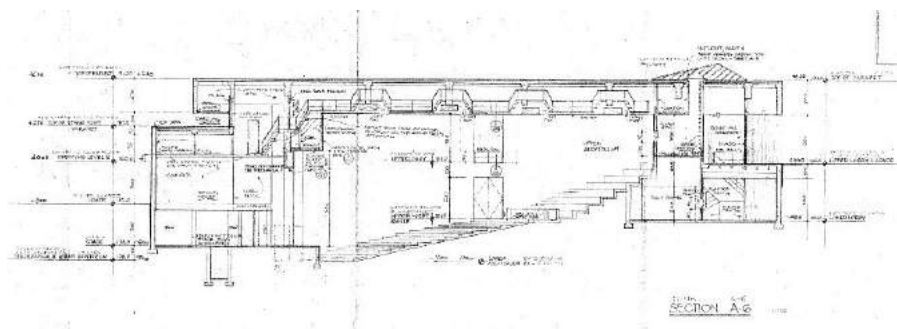
1.1 Αρχιτεκτονική προσέγγιση

Το αμφιθέατρο (βλ. σχήμα 1.1, σχήμα 1.2) είναι συμμετρικό κι ελλειψοειδές, ενώ δεν διαθέτει κάποιον εξώστη. Σχεδόν όλη η αίθουσα είναι επενδυμένη από μοκέτα 7 mm, εκτός από την ψευδοροφή αναρτημένου νευρομετάλλ και επιχρίσματος. Η συνολική επιφάνεια του χώρου μαζί με τη σκηνή είναι 2518.3 m², ενώ ο όγκος της αίθουσας χωρίς τη σκηνή είναι 4955 m³, με 835 καθίσματα που κατανέμονται σε δυο διαζώματα. Η γεωμετρία του χώρου υπαγορεύει προκαταρκτικά την πιθανή δημιουργία ηχούς (ακόμη και υφέρπουσας) και εστιασμού του ήχου, καθώς και την ισχυρή αίσθηση πλευρικών ανακλάσεων, λόγω του μεγάλου ανοίγματος στο κέντρο της πλατείας. Ωστόσο, η αίθουσα φαίνεται να υπηρετεί τις αρχιτεκτονικές προδιαγραφές που ορίζονται για την κατασκευή ενός αμφιθεάτρου, από την απαραίτητη κλίση δαπέδου (κεντρικό ακροατήριο 11^ο και άνω διάζωμα 23^ο), αξονική απόσταση, γραμμές ορατότητας και πλευρικές γραμμές ορατότητας (εντός «οπτικής γωνίας» των 30^ο), τη γωνία ανοίγματος προσκηνίου σε σχέση με την επιφάνεια ακροατών (περίπου 69^ο), έως και τις διαστάσεις που πρέπει να διέπουν το κέλυφος σκηνής. Σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια, το αμφιθέατρο, πέρα από μια δυσαναλογία ύψους ως προς πλάτος, φαίνεται να ικανοποιεί οριακά

τον λόγο όγκου ανά ακροατή και τις περισσότερες αναλογίες διαστάσεων και σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές κατατάσσεται κατάλληλος κυρίως για διαλέξεις και θεατρικές παραστάσεις. [1], [2]



Σχήμα 1.1 – Κάτοψη αμφιθεάτρου



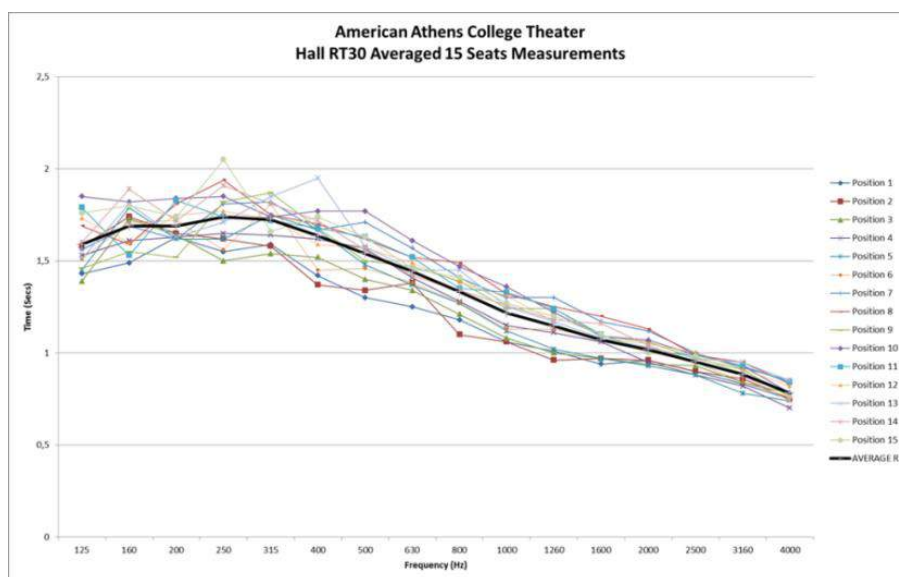
Σχήμα 1.2 - Τομή αμφιθεάτρου.

2. Μετρήσεις

Οι μετρήσεις στο αμφιθέατρο πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ηχομέτρου, με το πρόγραμμα WINMLS 2004, ακουστική προσομοίωση στο Catt Acoustic, ενώ για την μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης και της ηχηρότητας, με το Sound Source HP 1001 της Brüel&Kjær. Επίσης, έγινε και υπολογισμός των ακουστικών παραμέτρων του χώρου, σύμφωνα με σχέσεις της θεωρίας, εφαρμόστηκε μέθοδος ray tracing στα αντίστοιχα αρχιτεκτονικά μοντέλα και αναλύθηκε ηχογράμμα κρουστικού σήματος στην open source πλατφόρμα επεξεργασίας ήχου, Audacity. Όλες οι μέθοδοι συγκρίθηκαν μεταξύ τους για λόγους διερεύνησης της αξιοπιστίας τους, αλλά και για να αποκομιστεί μια αναλυτικά σφαιρική άποψη της απόκρισης του χώρου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, την εκμείευση ενός μέσου όρου που λειτούργησε καταλυτικά στον προσαρμόσιμο ακουστικό σχεδιασμό. Οι μετρήσεις έγιναν για 15 θέσεις, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές για αίθουσες χωρίς ακροατήριο (ISO-3382).

Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι ο συνολικός θόρυβος βάθους εφάπτεται οριακά στην προτεινόμενη καμπύλη NR25, με εμφανή συμβολή της στάθμης του συστήματος κλιματισμού κατά περίπου +2dB, ειδικά στο επίπεδο της σκηνής και των μπροστινών σειρών του ακροατηρίου, μια και το δωμάτιο του μηχανοστασίου είναι ουσιαστικά συζευγμένος χώρος με τη σκηνή και η ηχομόνωσή του καθώς και του συστήματος κλιματισμού αποτελεί θεμελιώδες μέλημα.

Ο μέσος χρόνος αντήχησης, σύμφωνα με τις μετρήσεις και τον υπολογισμό της εξίσωσης Sabine για μεγάλους χώρους, είναι περίπου $RT_{60} \cong 1.3$ s.



Σχήμα 2.1 - Διάγραμμα του χρόνου αντήχησης σε τριτοκταβική ανάλυση για όλες τις θέσεις, σε σύγκριση με τον μέσο όρο.

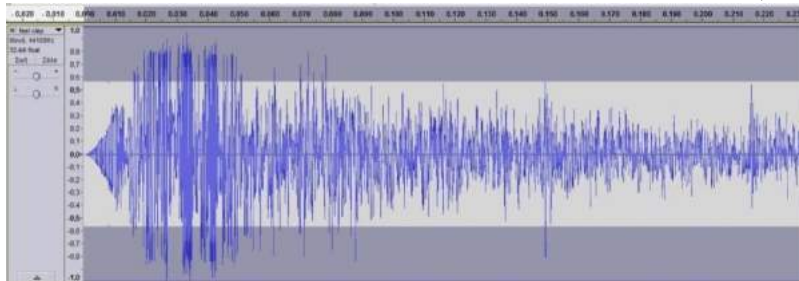
Δεδομένου ότι, ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για μια αίθουσα πολλαπλής χρήσης πρέπει να κυμαίνεται στην ομιλία : $0.85 < RT_{60} < 1.3$ sec και μουσική : $1.3 < RT_{60} < 1.83$ sec, στο αμφιθέατρο τα κριτήρια αυτά ικανοποιούνται οριακά.

Γενικότερα, παρατηρείται υψηλός χρόνος αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, έως τα 500 Hz, ο οποίος μειώνεται γραμμικά κι εκτός προδιαγραφών, όσο αυξάνεται η συχνότητα. Κάτι που αποδεικνύει επαρκή ηχοαπορρόφηση στο χώρο και δεν ενδείκνυται άλλη ηχοαπορροφητική επέμβαση. Σε αυτό συνηγορούν και οι οριακές τιμές του *EDT*. Ωστόσο, κάποιες κορυφές της τάξης περίπου των 2 sec, στις περιοχές των 250 και 400 Hz, προδίδουν την πιθανή ύπαρξη ηχούς στο κεντρικό ακροατήριο και σε μεγάλο τμήμα του άνω διαζώματος. Το ίδιο υπογραμμίζει και ο Κεντρικός Χρόνος (Centre Time, *T_c*) ο οποίος υπερβαίνει τα προτεινόμενα όρια των 80 ms για τις χαμηλές συχνότητες έως τα 500 Hz, κυρίως στο ύψος του γεωμετρικού κέντρου του αμφιθεάτρου και το άνω διάζωμα. Παράλληλα, οι μη αποδεκτές αρνητικές τιμές της μέσης Ηχηρότητας (*Gmid*) αποδίδουν αξιοσημείωτη εξασθένηση στο πλαϊνό ακροατήριο της τάξης των -3 dB, σε σχέση με τις αντιστοιχες κεντρικές θέσεις, ενώ υποδεικνύουν μια ηχητική «τρύπα» στο γεωμετρικό κέντρο της αίθουσας και στο άνω διάζωμα. Κάτι που πιθανότατα οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή ηχητικής ενέργειας, λόγω των κοίλων πλαϊνών τοίχων της αίθουσας. Από την άλλη, σύμφωνα με το μέσο όρο Στάθμης Ηχητικής Πίεσης (*SPL*), η στάθμη φαίνεται να φθίνει στις υψηλές συχνότητες, ενώ παρατηρείται αφ' ενός μια εξασθένηση της τάξης του -1 dB στις πλαϊνές θέσεις, αφ' ετέρου, μια αύξηση της στάθμης κατά 1 dB περίπου, σε σχέση με τις πλησιέστερες θέσεις, στο επίπεδο των πιο απομακρυσμένων θέσεων του ακροατηρίου. Κάτι που προδίδει πιθανή εστίαση του ήχου σε εκείνα τα σημεία.

Τα αποτελέσματα του *MLS* και *Catt*, υπαγορεύουν συνολικά μια οριακά ικανοποιητική ευκρίνεια με μεμπτά στοιχεία τις εν γένει υψηλές τιμές Διαύγειας (*C₈₀*) που πιστοποιούν το οριακό αντηχητικό πεδίο του αμφιθεάτρου (ειδικά στο άνω διάζωμα) και Διακριτότητα (*D₅₀*) που δεν ικανοποιείται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων που αντιστοιχούν στην ομιλία. Εξίσου, οριακή είναι και η χωρική αντίληψη σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Πλευρικών Κλασμάτων (*LF*), ενώ σε ότι αφορά το *Bass Ratio*, η αίθουσα φαίνεται να εξασφαλίζει την κατάλληλη «ζεστασιά» στις μουσικές παραστάσεις. Τέλος, η ακουστική «ιδιορρυθμία» στο κέντρο της αίθουσας και η ηχητικά υποδεέστερη περιοχή του άνω διαζώματος επιβεβαιώνονται και από τους ακουστικούς δείκτες καταληπτότητας ομιλίας, [1]

2.1 Ηχόγραμμα

Αναλύοντας το ηχόγραμμα (βλ. σχήμα 2.2), παρατηρούνται κάποιες ανακλάσεις στα 30 με 43 ms περίπου (Pre Delay/Φαινόμενο Haas) και μία περιοχή στα 53 με 63 ms, με ανακλάσεις που έχουν ελαφρώς εξασθενημένη στάθμη κι ενδεχομένως προδίδουν πολλαπλή ηχώ, λόγω του επαναλαμβανόμενου μοτίβου τους. Πέρα από τα 45-50 ms, οι πιο δυνατές καθυστερημένες ανακλάσεις διακρίνονται περίπου στα 70, 73 και 80 ms που ανέρχονται στα ίδια επίπεδα στάθμης με τον απευθείας ήχο και διακρίνονται ως ηχώ, ενώ κάποιες από τις έντονες ανακλάσεις με μισή περίπου στάθμη του αρχικού σήματος παρατηρούνται γενικότερα στα 90, 115, 150 και 215 ms, με τις τελευταίες να απέχουν περίπου 50 ms μεταξύ τους και τις πρώτες με την τελευταία να έχουν διαφορά άνω των 80 ms, με αποτέλεσμα να ακουστούν ως ξεχωριστές (διακριτή ηχώ), υποβαθμίζοντας την καταληπτότητα και την ευκρίνεια αντίστοιχα, σύμφωνα με το κριτήριο *Dietsch & Kraak*. [4]



Σχήμα 2.2 – Ανάλυση ηχογραφημένου κρουστικού σήματος στο αμφιθέατρο.

3. Ανάλυση με ακτίνες / Raytracing

Προκειμένου να τεκμηριωθεί ακόμη καλύτερα η ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου, μοντελοποιήθηκε, υπό κλίμακα, στο Autocad τόσο η τομή, όσο και η κάτοψη του και πραγματοποιήθηκε ανάλυση με ακτίνες, τόσο για την προσέγγιση κάποιων ανακλαστικών διαδρομών της οροφής, όσο και για την εκτίμηση εστιακών σημείων του ήχου, λόγω ανακλάσεων από τους πλαϊνούς κοίλους τοίχους.

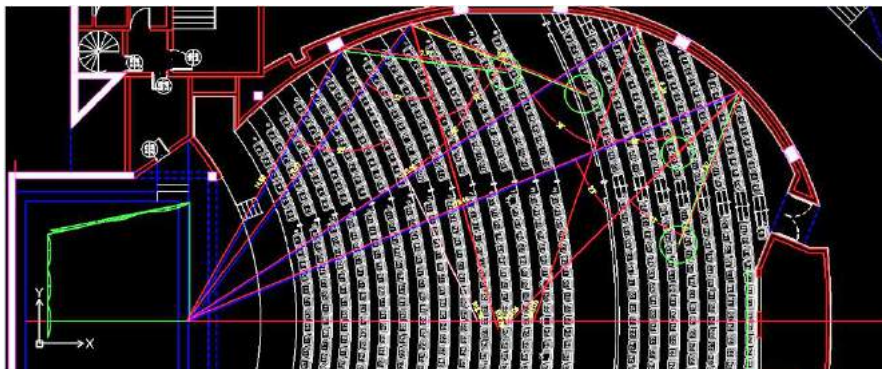
Για την ανάλυση των ανακλάσεων της οροφής, χρησιμοποιήθηκε η τομή του αμφιθεάτρου και εφαρμόστηκε η γεωμετρική μέθοδος που αφορά τις κατοπτρικές ανακλάσεις σε επίπεδες πλήρως ανακλαστικές επιφάνειες. Με αυτό τον τρόπο υπολογίστηκε η διαφορά διαδρομής (Sound Path Diferrence) ανακλώμενου και απευθείας ήχου σε μέτρα και «μεταφράστηκε» στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Οι προδιαγραφές συστήνουν χρονική καθυστέρηση (ITDG) < 30 ms (κατά Beranek), με αποτέλεσμα οι οριακές τιμές που υπολογίστηκαν να υποδεικνύουν υποβαθμισμένη οικειότητα και ανάγκη ενίσχυσης των πρώτων ανακλάσεων, ενώ σύμφωνα με τη διαφορά διαδρομής ανακλώμενου κι απευθείας ήχου $[(SAB)-(SB)] \geq 14$ m και ≥ 34 m / ηχώ σε ομιλία και μουσική αντίστοιχα), παρατηρούμε την ύπαρξη ηχούς ειδικότερα από τις ανακλάσεις της οροφής και του πίσω τοίχου. [2]

Για τη μελέτη της ανακλώμενης ηχητικής ενέργειας από τους πλαϊνούς τοίχους, χρησιμοποιήθηκε προσέγγιση της γεωμετρικής οπτικής (βλ. σχήμα 3.1). Μια πλήρως ανακλαστική κοίλη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ακτίνα R , θέση πηγής S , σε απόσταση s κι εστιακό σημείο M , σε απόσταση u . Θεωρώντας ημικυκλικές επιφάνειες, για τον υπολογισμό της απόστασης και συνεπώς θέσης του εστιακού σημείου ισχύει ότι: [4], [5]

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{s} = \frac{2}{R \cos \theta} \quad (3.1)$$

όπου για την ακτίνα της κοίλης επιφάνειας, R , και για ημικυκλικές επιφάνειες ισχύει $R = 2f$ δηλαδή $f = R/2$, ενώ θ είναι η γωνία πρόσπτωσης. Σύμφωνα με τη γεωμετρική μέθοδο της οπτικής για κοίλες επιφάνειες στην κάτοψη του αμφιθεάτρου, υπολογίστηκαν εστιακά σημεία στον χώρο. Οι παρειές του αμφιθεάτρου διαχωρίζονται από τον διάδρομο στο κέντρο της αίθουσας και διακρίνονται σε δυο διακριτά τόξα ημικυκλίου, με ελάχιστα διαφορετικές ακτίνες που αντιστοιχούν στα δύο διαζώματα του ακροατηρίου: $R_1 = 18.7$ m (ακτίνα πλαϊνού κοίλου τοίχου κάτω διαζώματος) και $R_2 = 13$ m (ακτίνα του τοίχου που περικλείει το άνω διάζωμα).



Σχήμα 3.1 - Ανάλυση ακτινών στην κάτοψη του μοντέλου του αμφιθεάτρου. Οι μπλε γραμμές αντιπροσωπεύουν την απόσταση από τη πηγή στη σκηνή και οι πράσινες την απόσταση του εστιακού σημείου από την κοίλη επιφάνεια. Τα εστιακά σημεία που προκύπτουν, σημειώνονται με τους πράσινους κύκλους.

Για κάθε περίπτωση υπολογισμού, είναι γνωστά τόσο η γωνία θ , όσο και η απόσταση s από τη πηγή. Οπότε, μπορούν να υπολογιστούν οι αποστάσεις, u_n , από τις κοίλες επιφάνειες, που ορίζουν τα εστιακά σημεία στην αίθουσα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται ότι η εστίαση του ήχου είναι απόρροια του ελλειψοειδούς σχήματος του αμφιθεάτρου, εντοπίζοντας εστιακά σημεία στο ανώτερο σημείο του κάτω πλαϊνού ακροατηρίου, στο πλαϊνό ακροατήριο του άνω διαζώματος και στο κεντρικό άνω ακροατήριο. Περιοχές που χαρακτηρίζονται από ηχητική αστάθεια, όπως πιστοποιείται και από τις μετρήσεις των ακουστικών δεικτών στο αμφιθέατρο.

4. Πρόταση λύσης

Η αξιολόγηση του αμφιθεάτρου υπαγορεύει την ανάγκη επαναδρομολόγησης πρώτων ανακλάσεων σε ευρύτερο μέρος του ακροατηρίου και ειδικά στο κεντρικό και άνω διάζωμα, τόσο για να εξασφαλιστεί επαρκής κατανομή ηχητικής ενέργειας, όσο και για να εξαλειφτούν φαινόμενα ηχούς και εστίασης του ήχου. Για την προσέγγιση της κατάλληλης θέσης και κλίσης των ανακλαστικών και διαχυτικών κατασκευών οροφής και παρειών του αμφιθεάτρου, συνδυάστηκαν οι μέθοδοι των ελλείψεων και εικονικών πηγών στη τομή και κάτοψη του αντίστοιχα. [1], [2]

Όπως διαπιστώνεται από την μελέτη για τον σχεδιασμό της οροφής, οι εφαπτόμενες στις σχετικές ελλείψεις υποδεικνύουν ανακλαστές σε διαφορετικά επίπεδα ύψους, καθώς και δυο ανακλαστές με διαφορετικές κλίσεις στον πίσω τοίχο, οι οποίοι θα παρεμβάλλονταν της διαδρομής των ανακλάσεων που προκαλούν ηχώ και θα εξουδετερώνουν την εκδήλωση της, αναπροσανατολίζοντας χρήσιμες ανακλάσεις προς το ακροατήριο. Για την ομοιόμορφη διασπορά των ανακλάσεων, ο σχεδιασμός της ανακλαστικής συστοιχίας οροφής, όπως και της πρόσοψης της σκηνής, θα διαρρυθμιστεί σε κυρτή μορφή, αντιγράφοντας το ομόκεντρο τοξοειδές σχήμα του ακροατηρίου και με τέτοιες κλίσεις ώστε να κατανέμεται ηχητική ενέργεια απευθείας σε αυτό, διατηρώντας παράλληλα εφάμιλλη σχεδιαστική ομοιομορφία με το αμφιθέατρο που αφομοιώνεται στην αρχιτεκτονική του.

Από την άλλη, οι ανακλάσεις της οροφής δεν θα πρέπει να είναι έντονες για να μην επηρεάσουν την χροιά του ήχου. Αυτό σημαίνει ότι, το μεγαλύτερο ποσοστό πρώτων ανακλάσεων θα πρέπει να προέρχεται από τις παρειές. Επομένως, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους πλευρικούς ανακλαστές και διαχυτές. Σε αυτή τη περίπτωση εφαρμόστηκαν οι παραπάνω μέθοδοι στην κάτοψη του αμφιθεάτρου, με τα ίδια εστιακά σημεία πηγής και δέκτη για την μέθοδο των ελλείψεων. Για την κατανομή ανακλάσεων ευρέος φάσματος σε όλο το ακροατήριο, εξετάστηκε ο συνδυασμός συστοιχίας διακριτών ανακλαστών από το επίπεδο της σκηνης έως το τέλος του κεντρικού ακροατηρίου. Συγκεκριμένα, προτείνεται ανακλαστική κατασκευή πριονωτής διάταξης, η οποία στο άνω τμήμα αποτελείται από μεγάλους ανακλαστές, που θα αναπροσανατολίζουν ανακλάσεις σχεδόν σε όλο το φάσμα, ενισχύοντας την ηχηρότητα στο άνω κεντρικό και άνω ακροατήριο, διατηρώντας παράλληλα ομοιόμορφα επίπεδα χρόνου αντήχησης, ενώ μικρότερου μεγέθους ανακλαστές στο αντίστοιχο κάτω τμήμα, στοχεύουν κυρίως στη τόνωση των υψηλών συχνοτήτων, συμβάλλοντας στην βελτίωση της καταληπτότητας και λαμπρότητας. Οι πλευρικές ανακλαστικές συστοιχίες έχουν μη περιοδική διάταξη, με το πλάτος τους να αυξάνει γραμμικά προς το κεντρικό ακροατήριο, προκειμένου να διατηρείται ανάκλαση του ίδιου συχνοτικού εύρους όσο απομακρυνόμαστε από τη πηγή. Με τη συγκεκριμένη απεριοδική συστοιχία ανασχηματίζονται οι κοίλοι πλαϊνοί τοίχοι κι επιτυγχάνεται η αποφυγή φαινομένων εστιασμού του ήχου. Παράλληλα καλύπτεται η ηχοαπορροφητική επένδυσή τους, εξασφαλίζοντας μια μικρή αύξηση του χρόνου αντήχησης που θα διευρύνει την καταλληλότητά του αμφιθεάτρου ακόμη και για μουσικές παραστάσεις, ενώ προκειμένου να αυξηθεί ακόμη περισσότερο ο χρόνος αντήχησης, επιλέχθηκε δάπεδο ακουστικά σκληρό. [3]

Εξίσου σημαντικός είναι ο ελεγχόμενος χειρισμός ανεξάρτητων πρώτων ανακλάσεων στις ακουστικά υποβαθμισμένες περιοχές του χώρου, προκειμένου να βελτιωθεί τόσο η οικειότητα, η ευκρίνεια, όσο και η ηχηρότητα, εξισορροπώντας την ακουστική τους με την υπόλοιπη αίθουσα. Όπως προκύπτει από τη μελέτη, αποτελεσματική θέση ανακλαστήρα που απευθύνεται σχεδόν σε όλους τους δέκτες, είναι πάνω από τη σκηνή. Επομένως, επιλέχθηκε η χρήση ανεξάρτητων ανακλαστών, αναρτημένων κοντά στην σκηνή. Προκειμένου να ενισχυθούν οι πρώτες ανακλάσεις σε ευρύ φάσμα, οι ανακλαστές έχουν μεγάλες διαστάσεις, με ελαφρά κύρτωση για επέκταση της εμβέλειάς τους και εξομάλυνση της στάθμης των ανακλάσεων. Παράλληλα, στοιχίζονται με μικρή κλίση ώστε η ανακλώμενη ηχητική ενέργεια να φτάνει ανεπηρέαστη έως το πίσω μέρος της αίθουσας, απευθείας στα επιθυμητά σημεία του ακροατηρίου. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι αφού καταφθάσει στο απορροφητικό ακροατήριο καθίσταται μη αξιοποιήσιμη για την σύνθεση αντηχητικού πεδίου. Σε αντίθεση με τους πλευρικούς, οι αναρτώμενοι ανακλαστές είναι απαλλαγμένοι από την «ευθύνη» της διατήρησης του χρόνου αντήχησης και θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ενθαρρύνουν επί το πλείστον τη χρήση της αίθουσας για διαλέξεις ή θεατρικές παραστάσεις. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται ακουστική ευελιξία, όπως αρμόζει σε μια αίθουσα πολλαπλής χρήσης, χωρίς να κρίνεται απαραίτητη η χρήση μεταβλητών στοιχείων. [1]

Για την αντιστάθμιση της ηχοαπορρόφησης που πλέον έχει περιοριστεί σημαντικά λόγω των ανακλαστικών κατασκευών, προτιμήθηκε η χρήση διαχυτών που πλεονεκτούν των ηχοαπορροφητών, μια και συμβάλλουν στην ηχοαπορρόφηση, χωρίς να επηρεάζουν αισθητά τα επίπεδα ηχητικής ενέργειας και το απαιτούμενο ηχητικό πεδίο στην περίπτωση μουσικής. Ουσιαστικά, η θέση των διαχυτών

στοχεύει στην εξουδετέρωση φαινομένων εστιασμού και στην διασπορά του ήχου στο πλαϊνό ακροατήριο και στο άνω διάζωμα, όπου τα ακουστικά προβλήματα της αίθουσας φαίνεται να τονίζονται. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο σχεδιασμός «πριονωτών» διατάξεων που θα εκτείνονται κλιμακωτά από το γεωμετρικό κέντρο της αίθουσας, έως και τους πίσω τοίχους, ακολουθώντας την κεκλιμένη διάταξη του άνω ακροατηρίου. Αποφεύχθηκε η περιοδική επανάληψη του διαχυτικού μοτίβου της συστοιχίας, μια και κάτι τέτοιο θα εξακολουθούσε να προκαλεί φαινόμενα εστίασης, ενώ προτείνεται η οριζόντια διάταξη της με διαφορετικές γωνίες για κάθε πλάτωμα ενός οδοντοτού μοτίβου, προκειμένου να περιοριστούν φαινόμενα comb filtering και η ηχητική ενέργεια να διαχέεται οριζόντια σε όλο το ακροατήριο. [3]

5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του νέου ακουστικού σχεδιασμού του αμφιθεάτρου στο Catt Acoustic, επιτεύχθηκε εξομάλυνση του χρόνου αντήχησης σε προσαρμόσιμα επίπεδα για σχεδόν κάθε περίπτωση χρήσης, ενώ εξουδετερώθηκαν αποτελεσματικά φαινόμενα ηχούς κι εστίασης του ήχου. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής στάθμης και ηχηρότητας σε όλο το ακροατήριο και αναπληρώθηκε το ηχητικό «κενό» στο γεωμετρικό κέντρο της αίθουσας, ενώ σε ότι αφορά την πραγματοποίηση διαλέξεων, αναμένεται να είναι ακουστικά ευδιάκριτες όπως υπογραμμίζουν τα βελτιωμένα αποτελέσματα καταληπτότητας στην αίθουσα.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή της γεωμετρικής οπτικής για κοίλες επιφάνειες, καθώς και η ανάλυση ηχογράμματος, λειτουργούν καταλυτικά στην κατάλληλη αξιολόγηση κι εντοπισμό ακουστικών προβλημάτων, ενώ εξίσου εύστοχη είναι η χρήση της μεθόδου εικονικών πηγών κι ελλείψεων για τον προσδιορισμό των θέσεων ανακλαστήρων. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί η αναβαθμισμένη ακουστική του μεγάλου αμφιθεάτρου του Ελληνοαμερικάνικου Κολλεγίου Αθηνών, που φαίνεται να ακροβατεί μεταξύ της προσαρμογής σε ομιλία και μουσική.

6. Αναφορές

[1] Barron, M., “*Auditorium Acoustics and Architectural Design*”, 2η Έκδοση Spon Press, Νέα Υόρκη (2010)

[2] Thomas D Rossing, “*Springer handbook of acoustics*”, 1st edition Springer Science+Business Media, LLC New York (2006)

[3] Trevor J Cox. and Peter D’Antonio USA, “*Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, design and application*”, 1^η έκδοση Spon Press Taylor & Francis Group, New York (2004)

[4] Vercammen, Martijn, “Sound concentration caused by curved surfaces” PhD thesis in the *Bouwstenen series of the Faculty of Architecture, Building and Planning of the Eindhoven University of Technology* (2012)

[5] Wolf, E., Born, M., “*Principles of optics, electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*”, 7th edition Cambridge University Press (1999)

Ακουστικός Σχεδιασμός Ανακλαστήρων σε Αίθουσες Ακροατηρίου

Νίκος Π. Τσινίκας
Καθηγητής Αρχιτεκτονικής Α.Π.Θ.
tsinikas@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την διαδικασία ακουστικού σχεδιασμού χώρων, προτεραιότητα δίδεται στον καθορισμό του γεωμετρικού στερεού και στη συνέχεια υπολογίζονται οι ακουστικές ποιότητες και ποσότητες.

Ένα ‘φτωχό’ ηχόγραμμα με λίγες και ασθενείς ανακλάσεις, δεν μπορεί να εμπλουτιστεί αν ο χώρος παρουσιάζει ακουστικά λάθη. Για να εμπλουτιστεί το ηχόγραμμα πρέπει να αυξηθούν οι ανακλάσεις που είναι σχεδιαστικό θέμα προτεραιότητας δηλαδή, πριν την πρόβλεψη του χρόνου αντήχησης.

Τα λογισμικά της ακουστικής χώρου δεν περιέχουν αρχιτεκτονικές σχεδιαστικές λύσεις χώρων ακροατηρίου και χρησιμοποιούνται από ειδικούς που γνωρίζουν τις μεθόδους γεωμετρικής ακουστικής για να ‘επιβεβαιώσουν’ τις σωστές αποφάσεις σχεδιασμού παρά να τις προκαλέσουν.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι τρόποι χάραξης ανακλαστήρων για μία σειρά από διαφορετικούς χώρους μαζί με τις οδηγίες σχεδιασμού και την σημασία τους στο τελικό αποτέλεσμα.

Acoustic Design of Reflectors in Auditoria

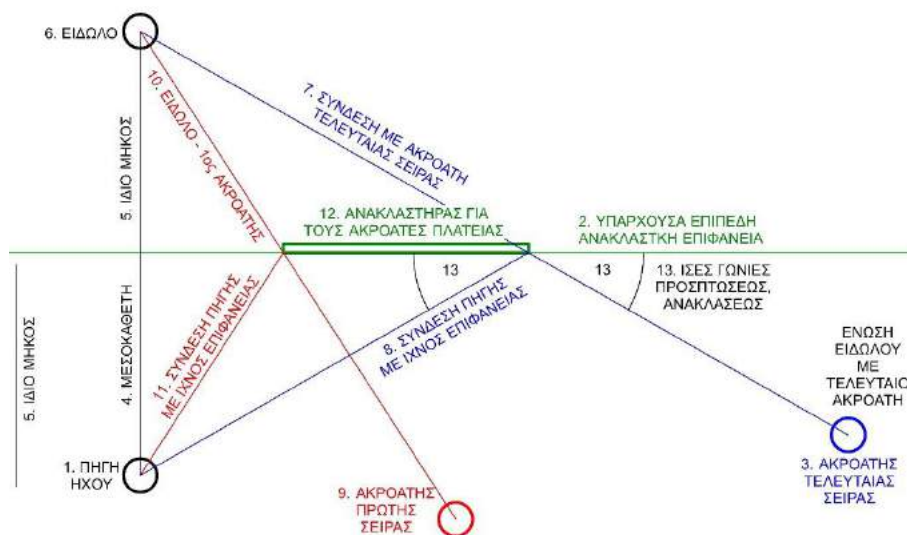
ABSTRACT

Acoustic design of auditoria, follow certain decisions path, starting with geometric acoustic design of reflectors and then the calculation of acoustic qualities and quantities. A poor echogram with few and weak reflections cannot be changed if the geometry of the auditorium doesn't change. To enrich an echogram first the shape must be changed by introducing new reflecting surfaces.

The acoustic software packages do not provide nor include, architectural design solutions, software is just a tool for use by someone who knows the methods of geometric acoustic configurations in order to justify the right decisions and not to provoke them.

This paper presents geometric acoustic configurations for different use auditoria along with design instructions and their importance to ‘good’ acoustics.

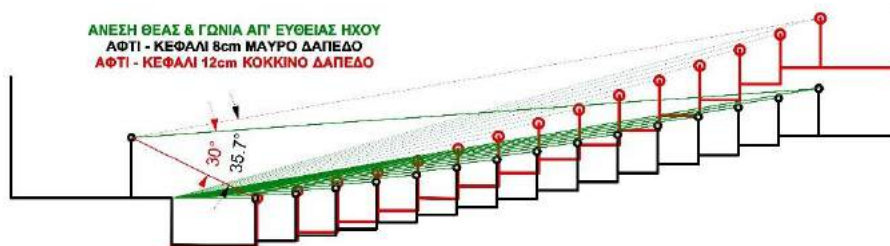
1. Χάραξη Ανακλαστήρα με τη Μέθοδο του Ειδώλου της Ηχητικής Πηγής



Σχήμα 1. Χάραξη Ανακλαστήρα με τη Μέθοδο του Ειδώλου της Ηχητικής Πηγής.

Για τη χάραξη των ανακλαστήρων ακολουθήστε την αρίθμηση στο σκίτσο. Επιλέγουμε μία πηγή ήχου, την ανακλαστική επιφάνεια, τον ακροατή στην τελευταία σειρά, χαράζουμε μεσοκάθετη από την πηγή στην επιφάνεια, ίσης απόστασης διάστημα και φθάνουμε στο είδωλο. Συνδέουμε το είδωλο με τον ακροατή της τελευταίας σειράς και συνδέουμε την πηγή με το ίχνος τομής στην επιφάνεια. Αυτό είναι το άκρο του ανακλαστήρα. Στη συνέχεια συνδέουμε το είδωλο με τον ακροατή της πρώτης σειράς και συνδέουμε την πηγή με το ίχνος τομής στην επιφάνεια. Αυτό είναι το άλλο άκρο του ανακλαστήρα.

2. Άνεση Θέας και Γωνία Απευθείας Ήχου

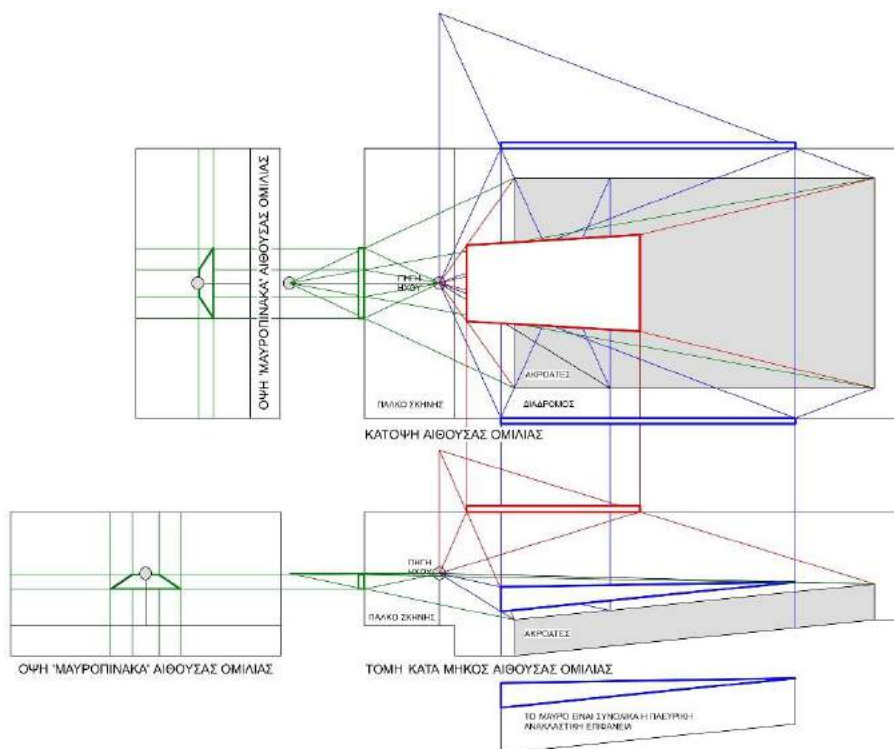


Σχήμα 2. Άνεση Θέας και Γωνία Απευθείας Ήχου

Οι 2 κατά μήκος τομές έχουν διαφορετική άνεση θέας. Η κατω, με μαύρο χρώμα, έχει χαραχθεί με άνεση θέας 8εκ (απόσταση από το μάτι έως την κορυφή του κεφαλιού) και η πάνω, με κόκκινο χρώμα, έχει χαραχθεί με άνεση θέας 12εκ.

Είναι εμφανής η διαφορά της γωνίας απευθείας ήχου από την πηγή προς όλους τους ακροατές (30°, 35.7°), το υψόμετρο της τελευταίας σειράς και η κλίση του δαπέδου.

3. Προσδιορισμός των Ανακλαστήρων Αίθουσας Ακροατηρίου, Σχήματος Ορθογώνιου Παραλληλεπίπεδου με Μικρή Κλίση Δαπέδου και Σημειακή Ηχητική Πηγή



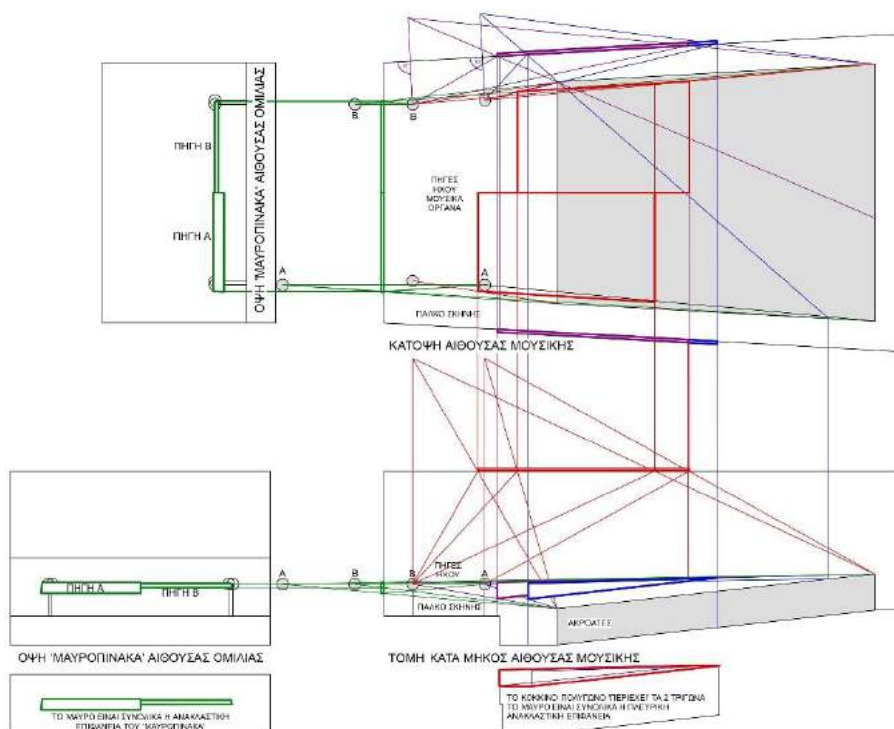
Σχήμα 3. Τμήματα επιφανειών του χώρου που δρουν ως ανακλαστήρες.

Τοποθετείται η σημειακή πηγή του ήχου στη σκηνή, π.χ. στο μισό μέτρο από το άκρο της σκηνής στο μέσο και σε ύψος 1.5μ από το δάπεδο της σκηνής. Με τη γεωμετρική ακουστική ως εργαλείο προσδιορίζουμε τα είδωλα της πηγής (μπλέ για πλευρικούς τοίχους, κόκκινο για την οροφή και πράσινο για τον τοίχο σκηνής-μαυροπίνακα) και στη συνέχεια ενώνουμε τα είδωλα με τους πρώτους και τους τελευταίους ακροατές. Το αποτέλεσμα είναι κόκκινο τραπέζιο στην οροφή, πράσινο τραπέζιο στον τοίχο σκηνής-μαυροπίνακα και μπλε τρίγωνο πλευρικών τοίχων.

4. Προσδιορισμός των Ανακλαστήρων Αίθουσας Ακροατηρίου, Σχήματος Κάτοψης Τραπεζίου με Μικρή Κλίση Δαπέδου και Επιφανειακή Ηχητική Πηγή

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με το προηγούμενο παράδειγμα μόνο που αντί για μία ηχητική πηγή έχουμε 4 άκρες μιας επιφανειακής πηγής. Το αποτέλεσμα

είναι δύο κόκκινα τραπέζια στην οροφή (ένα για κάθε πηγή κοντά στην άκρη και κοντά στον μαυροπίνακα), δύο πράσινα τραπέζια στον τοίχο σκηνής-μαυροπίνακα και μπλε-μωβ τρίγωνα πλευρικών τοίχων (κάτω δεξιά με κόκκινο χρώμα η συνολική ανακλαστική επιφάνεια τοίχου).



Σχήμα 4. Τμήματα επιφανειών του χώρου που δρουν ως ανακλαστήρες.

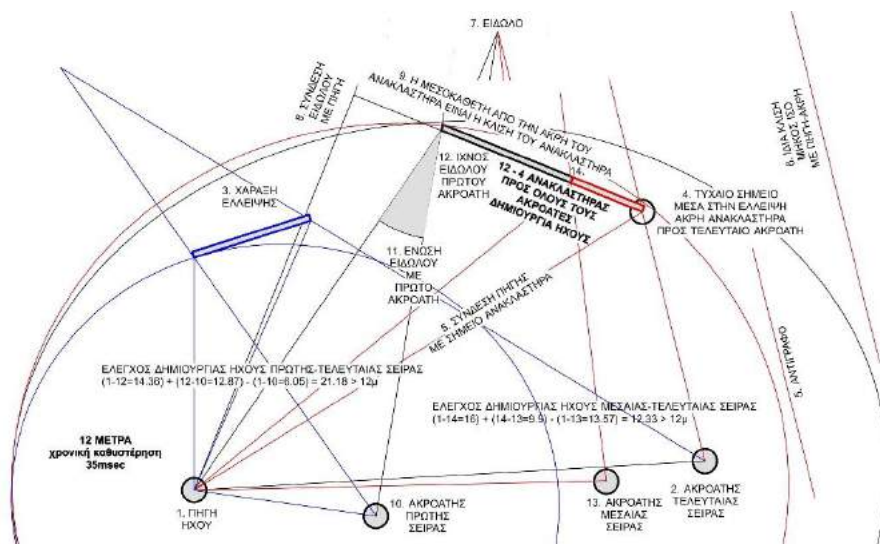
Η επιφανειακή πηγή ήχου απαιτεί πολύ μεγαλύτερες επιφάνειες για ανάκλαση από την σημειακή πηγή. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη χάραξης κυρτών ανακλαστήρων έτσι ώστε με μικρότερο μέγεθος ανακλαστήρα να τροφοδοτούνται μεγαλύτερες περιοχές ακροατών.

5. Χάραξη Ελλείψεων για την Αποφυγή Ακουστικών Λαθών

Η πιο καθυστερημένη ανάκλαση για την αποφυγή ηχούς είναι να διανύσει ο ανακλώμενος ήχος απόσταση 17m μετά τον απευθείας ήχο ή αλλιώς σε χρονικό διάστημα 50ms. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που απέχουν ίση απόσταση από δύο σημεία (πηγή ήχου-ακροατής) είναι η έλλειψη. Για κάθε ακροατή πρέπει να χαραχθούν ελλείψεις που να εξασφαλίζουν την αποφυγή ηχούς.

Επιλέγουμε την πηγή (1), επιλέγουμε τον ακροατή της τελευταίας σειράς (2), χαράζουμε έλλειψη ως τον γεωμετρικό τόπο που απέχει από 2 σημεία (3), τυχαίο σημείο 'μέσα' στην έλλειψη του τελευταίου ακροατή (4), συνδέουμε πηγή - τυχαίο σημείο 4 και δημιουργούμε αντίγραφο στην ίδια κλίση (5), αλλάζουμε το μήκος ίσο με το μήκος 1 – 4 (6), τοποθετούμε την ευθεία 6 στο σημείο 4 και βρίσκουμε το

είδωλο 7 (7), συνδέουμε το 7 με το 1 (8), μεσοκάθετη από το 4 στην ευθεία 1 - 7 (αυτή είναι η ανακλαστική επιφάνεια) (9), επιλέγουμε τον ακροατή της πρώτης σειράς (10), ενώνουμε το είδωλο με τον ακροατή πρώτης σειράς 10 (11), το ίχνος είδωλου πρώτου ακροατή πάνω στον ανακλαστήρα είναι η αρχή του (12).



Σχήμα 5. Χάραξη Ελλείψεων για την Αποφυγή Ακουστικών Λαθών.

Ο ανακλαστήρας 12-4 στέλνει ήχο προς όλους τους ακροατές, όμως το πρώτο τμήμα του είναι εκτός της έλλειψης και προκαλεί 'ηχώ'.

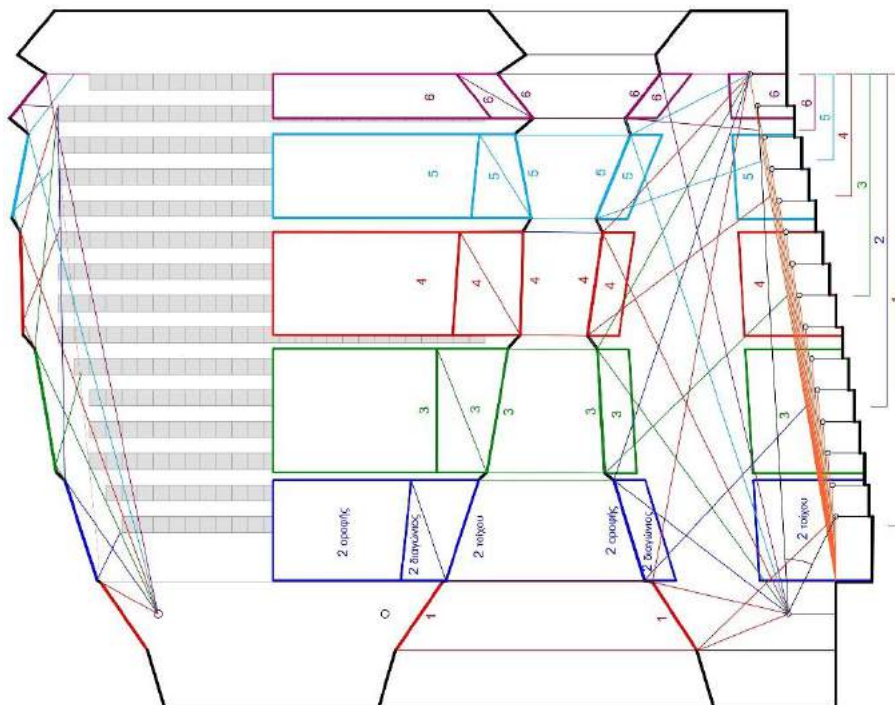
Επιλέγουμε έναν ακροατή μεσαίας σειράς, συνδέουμε με το είδωλο και βρίσκουμε τμήμα του ανακλαστήρα που στέλνει ήχο από τον μεσαίο μέχρι τον τελευταίο (13 & 14), χαράζουμε 2 ελλείψεις από την πηγή στον πρώτο και από την πηγή στον 'μεσαίο', βλέπουμε ότι το σημείο 12 είναι έξω από την έλλειψη πηγής-πρώτου. Αυτό σημαίνει ότι: η πρόσπτωση (1 - 12) συν την ανάκλαση (12 - 10) μείον τον απευθείας ήχο (1-10) είναι μεγαλύτερη από 12m επομένως θεωρείται καθυστερημένη ανάκλαση όντας > 35msec

Τέλος, με μπλε χρώμα, ένας ανακλαστήρας κοντά στη σκηνή που στέλνει ήχο σε όλους τους ακροατές χωρίς προβλήματα (το αρχικό του σημείο είναι στην μικρή έλλειψη πηγής-πρώτου και το τελικό του σημείο είναι μέσα στην μεγάλη έλλειψη πηγής-τελευταίου).

6. Χάραξη Ανακλαστήρων Οροφής με 'Οδοντωτό' Σχήμα σε Περαισιές

Πρώτα η τομή και μετά η κάτοψη. Πρώτα σχεδιάζεται το κεκλιμένο δάπεδο με γνώμονα την οπτική άνεση θέας. Με την οπτική άνεση θέας εξασφαλίζεται καλή γωνία απευθείας ήχου από την πηγή στους ακροατές. Επιλέγεται η θέση της ηχητικής πηγής, π.χ. 1.5μ ύψος και 1μ από την άκρη της σκηνής. Όλοι οι ανακλαστήρες τροφοδοτούν ήχο στην τελευταία σειρά προς τις μπροστινές σειρές όπως έχει σχεδιαστεί το παράδειγμα, ο πρώτος σε όλους, ο δεύτερος σε 10 σειρές

από το τέλος, ο τρίτος σε 7 σειρές από το τέλος, ο τέταρτος σε 4 σειρές από το τέλος, ο πέμπτος σε 3 σειρές από το τέλος και ο έκτος σε 2 σειρές από το τέλος.



Σχήμα 6. Κάτοψη: αριστερά ανακλαστήρες πλευρικού τοίχου και ακτίνες, μέση άνοψη ανακλαστήρων οροφής, δεξιά διαγώνιοι ανακλαστήρες οροφής-τοίχων. Τομή: αριστερά ανακλαστήρες οροφής και ακτίνες, μέση διαγώνιοι ανακλαστήρες οροφής-τοίχων, δεξιά όψεις ανακλαστήρων τοίχων.

Δεν ‘χαραμίζεται’ καθόλου γωνία απευθείας ήχου προς τους ανακλαστήρες. ‘Όσο πιο κοντά στην πηγή είναι ο ανακλαστήρας, τόσο σε μεγαλύτερη περιοχή ακροατών στέλνει ανακλώμενο ήχο. Ο τελευταίος ανακλαστήρας τροφοδοτεί ανακλώμενο ήχο μόνο στις πίσω σειρές ακροατών. ‘Όσο πιο κοντά ο ανακλαστήρας στην πηγή τόσο μεγαλύτερη η γωνία εκπομπής. Μετά την χάραξη του πρώτου ανακλαστήρα που τροφοδοτεί όλους τους ακροατές, μπορούμε να χαράξουμε γωνίες από την πηγή προς το χώρο που σταδιακά μειώνεται η γωνία τους. Πάνω στις ακτίνες ‘γλιστράνε’ οι ανακλαστήρες. Το οδοντωτό σχήμα μπορεί εύκολα να μετασχηματιστεί, π.χ. στην προέκταση των ακτίνων 1ου, 2^{ου}, 5^{ου} και 6^{ου} να ‘ανέβουν’ οι ανακλαστήρες προς την οροφή και να μειωθεί το θολωτό σχήμα (π.χ. επίπεδη οροφή). Με την ίδια τεχνική μπορεί εύκολα να χαραχτεί οροφή που το τέλος του ενός να είναι η αρχή του άλλου ανακλαστήρα σχηματίζοντας μια τεθλασμένη συνεχή γραμμή. Από την αρχή και το τέλος των ανακλαστήρων ανεβάζουμε περασίες στην κάτοψη, στο συγκεκριμένο παράδειγμα για τους 6 ανακλαστήρες χαράζουμε 12 κατακόρυφες γραμμές. Αντιγράφουμε τους 6 ανακλαστήρες της τομής και τους μεταθέτουμε κατακόρυφα στην επάνω πλευρά της

ώστε: η δεξιά πηγή του ήχου (τα μουσικά όργανα που είναι κοντά στην άκρη της σκηνής) να τροφοδοτεί από την δεξιά άκρη του ανακλαστήρα προς τον ακροατή της τελευταίας σειράς και η αριστερή πηγή του ήχου (τα μουσικά όργανα που είναι κοντά στον τοίχο της σκηνής) να τροφοδοτεί από την αριστερή άκρη του ανακλαστήρα προς τον ακροατή της πρώτης σειράς. Με αυτό τον τρόπο θα καλυφτεί όλη η περιοχή ακροατών από όλους τους μουσικούς.

Χάραξη: Κόκκινο (πηγή-Γ) ανάκλαση (Γ-τελευταίος) προέκταση – είδωλο ανακλαστική επιφάνεια Γ-B. Μπλέ: (πηγή-A) ανάκλαση (A-πρώτος) προέκταση – είδωλο ανακλαστική επιφάνεια A-B. Αν θεωρήσουμε τις 2 διαγώνιες A-B-Γ ως ‘εφαπτόμενες’ μιας κυρτής επιφάνειας τότε ο κυρτός ανακλαστήρας που θα τροφοδοτεί ήχο σε όλους τους ακροατές από όλους τους μουσικούς θα ‘εγκλωβιστεί’ μέσα στο τρίγωνο ΑΒΓ και θα έχει ασύμμετρη μορφή κυρτού τόξου (όχι τμήμα κύκλου).

8. Κυρτοί Ανακλαστήρες σε Αίθουσα Συναυλιών με Διάταξη Έκκεντρης Αρένας.

Για τη σωστή χάραξη ανακλαστήρων οροφής πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω: α) η ηχητική πηγή – ορχήστρα, είναι επιφανειακή και τοποθετείται κάπου ανάμεσα στις περιοχές ακροατών πλατείας, β) ο ανακλαστήρας ακριβώς πάνω από την ορχήστρα πρέπει να είναι κυρτός διπλής καμπυλότητας (τμήμα σφαίρας) ώστε να αντανακλά προς όλες τις κατευθύνσεις, μπρος-πίσω και αριστερά-δεξιά, γ) οι υπόλοιποι ανακλαστήρες σχεδιάζονται έτσι ώστε να τροφοδοτούν ήχο τις περιοχές ακροατών γύρω από την ορχήστρα και συνήθως είναι κυρτοί μονής καμπυλότητας (τμήματα κυλίνδρου). Οι πολλές ‘ανισόπεδες’ περιοχές πλατείας (φιλαρμονική Βερολίνου), δημιουργούν μικρούς κάθετους τοίχους ανάμεσά τους που λειτουργούν ως ενισχυτικά τοπικά ακουστικά (πλευρικές ανακλάσεις μικρής χρονικής καθυστέρησης).

9. Μετατροπή Αποθήκης με Δικλινή Στέγη σε Αίθουσα Μουσικής

Για την μετατροπή ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου χώρου με δικλινή στέγη σε αίθουσα μουσικής χρειάζεται: δημιουργία υπερυψωμένου πάγκου (κλιμακωτό πάγκο με τρία επίπεδα, ψηλό κρουστά, μεσαίο πνευστά, χαμηλό έγχορδα), κατασκευή δαπέδου πλατείας με κλίση (πρόβλεψη άνεσης θέας και βέλτιστη γωνία απευθείας ήχου) και πρόβλεψη ανακλαστήρα πάγκου που να αντανακλά ήχο σε όλους σχεδόν τους ακροατές πλατείας.

Οι κατακόρυφοι τοίχοι του παραλληλεπίπεδου, ως πλευρικοί ανακλαστήρες, παρέχουν πρώιμες ανακλάσεις. Οι δύο διαγώνιες πλευρές της δικλινούς στέγης παρέχουν πλευρικές ανακλάσεις.

Στους πλευρικούς ανακλαστήρες, η αναγνώριση της κατεύθυνσης του ήχου στα δύο αφτιά προκύπτει από τη διαφορά φάσης, τη διαφορά πλάτους ταλάντωσης και τον απευθείας ήχο, την ηχο-περίθλαση και την ηχητική σκιά στο ένα αφτί με αποτέλεσμα την αίσθηση κατευθυντικότητας – χώρου.

Ακουστική σημαντικών παραδοσιακών κτισμάτων της Θράκης και δημιουργία βάσης δεδομένων εικονικών ακροάσεων

Φώτιος Κοντομίχος
Μεταδιδάκτορ /
Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
fotkon@upatras.gr

Νικόλαος-Αλέξανδρος
Τάτλας
Επικ. Καθηγητής,
Τμ.Ηλεκτρονικών Μηχ.
Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά
Τ.Τ. / Θηβών 250
Αιγάλεω
ntatlas@teipir.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής /
Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Στέλιος Μ. Ποτηράκης
Αν. Καθηγητής, Τμ.
Ηλεκτρονικών Μηχ.
Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά
Τ.Τ. / Θηβών 250
Αιγάλεω
spoti@teipir.gr

Χαράλαμπος
Παπαδάκος
Ερευνητής /
Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ.
Μηχανικών
Πανεπιστημίου
Πατρών
papadakos@upatras.gr

Ιωάννης
Μουρτζόπουλος
Καθηγητής /
Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ.
Μηχανικών
Πανεπιστημίου
Πατρών
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα παλιά αρχοντικά σπίτια αποτελούν σε πολλές περιοχές της Ελλάδας σημαντικά κτήρια που εκφράζουν ιδιαίτερα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά και συχνά θεωρούνται διατηρητέα μνημεία του πολιτισμού μας. Στην περίπτωση που έχουν συντηρηθεί και αναπαλαιωθεί κατάλληλα και εφόσον δεν κατοικούνται πλέον, φιλοξενούν συνήθως κρατικές υπηρεσίες, παραδοσιακούς ξενώνες, ή μουσεία ποικίλου περιεχομένου και αποτελούν κοιτίδες και κέντρα διεξαγωγής εκδηλώσεων και δραστηριοποίησης ομάδων δημιουργικής απασχόλησης.

Η αποτύπωση των ακουστικών χαρακτηριστικών τέτοιων χώρων αποτελεί στοιχείο της πολιτισμικής κληρονομιάς, εφόσον μπορεί να παράσχει μια εικόνα για το ακουστικό περιβάλλον στο οποίο οι άνθρωποι ζούσαν όταν οι χώροι αυτοί κατοικούνταν. Η σύγχρονη τεχνολογία μας δίνει τη δυνατότητα προκειμένου να αποτυπωθεί και να καταγραφεί η ακουστική συμπεριφορά των χώρων αυτών και να αναπαραχθεί η ακουστική εμπειρία που είχαν στον εκάστοτε χώρο οι άνθρωποι κατά τη διεξαγωγή διαφόρων δραστηριοτήτων στο παρελθόν.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, πραγματοποιήθηκε καταγραφή των ακουστικών παραμέτρων, η αρχιτεκτονική αποτύπωση των χώρων αυτών στην περιοχή της Θράκης και δημιουργήθηκαν εικονικές ακροάσεις παραδοσιακού ηχητικού υλικού σε

πολλαπλές θέσεις. Η βάση δεδομένων των κρουστικών αποκρίσεων και των εικονικών ακροάσεων πρόκειται να διατεθεί ελεύθερα μέσω του επίσημου ιστότοπου του έργου.

Acoustics of important traditional buildings in Thrace and implementation of virtual auralization database

ABSTRACT

The old mansions are important traditional buildings in many parts of Greece, showing local architectural characteristics and being significant cultural monuments. When restored properly, they usually host government agencies, traditional guest houses, museums, cultural centers and creative activity groups.

The recording and analysis of acoustic characteristics for such spaces is important for the cultural heritage and can illustrate the acoustic environment in which people lived when the premises were occupied. Modern technology enables the capturing and precise determination of the acoustic behavior of these spaces and the reproduction of the audio experience that people had while conducting various activities in the past.

The present work implemented as part of a project, concerns the recording and evaluation of acoustic parameters with reference to the architectural characteristics of such spaces in Thrace and the creation of virtual auralizations with traditional audio material for multiple listening positions. The database of impulse responses and virtual auralizations will be freely available through the project's official website.

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια ενός συνολικότερου έργου που αφορά την αποτύπωση του ηχητικού πολιτισμικού υλικού των κοινοτήτων της Θράκης. Προκειμένου να αποτυπωθούν πληρέστερα τα ακουστικά πολιτιστικά χαρακτηριστικά της περιοχής, εκτός από την ηχογράφιση προφορικού υλικού από κάθε γλωσσολογική κοινότητα (ελληνική, τουρκική, πομακική), πραγματοποιήθηκαν ακουστικές καταγραφές σε σημαντικά πολιτιστικά κτίρια, παλιά αρχοντικά και λατρευτικούς χώρους.

Πιο συγκεκριμένα, για της ανάγκες της εργασίας πραγματοποιήθηκαν καταγραφές σε τρεις τέτοιους χώρους. Στο Ιμαρέτ της Κομοτηνής το οποίο χρησιμοποιείται πλέον ως μουσείο και ως χώρος όπου υλοποιούνται εκπαιδευτικά προγράμματα σε διάφορες βαθμίδες της εκπαίδευσης και επιλεγμένες πολιτιστικές εκδηλώσεις. Ο συγκεκριμένος χώρος διαθέτει κλειστές αίθουσες καθώς επίσης και στεγασμένο αίθριο. Στο λαογραφικό μουσείο της Ξάνθης που φιλοξενείται στο αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου και διαθέτει μία αίθουσα εκδηλώσεων και αίθουσα διδασκαλίας και δημιουργικής απασχόλησης νέων. Τέλος, στο αρχαιολογικό μουσείο Μαρώνειας το οποίο στεγάζεται στο αρχοντικό Ταβανιώτη και διαθέτει

χώρο διαλέξεων. Για τους συγκεκριμένους χώρους υπολογίζονται οι ακουστικές παράμετροι και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Πέρα από τις μονοφωνικές μετρήσεις της απόκρισης των συγκεκριμένων χώρων, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εξειδικευμένου ανδρείκελου και η αμφιωτική (binaural) καταγραφή σε διαφορετικές θέσεις ακρόασης. Οι αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή αρχείων εικονικής ακρόασης (virtual auralizations) εντός των συγκεκριμένων χώρων ύστερα από το συνδυασμό με τις ηχογραφήσεις προφορικού πολιτιστικού υλικού και την απαραίτητη επεξεργασία. Τα αρχεία εικονικών ακροάσεων να διατίθενται ελεύθερα στην ιστοσελίδα του έργου [1] διαχέοντας τα πολιτιστικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Στην Ενότητα 1 αναφέρονται τα ιστορικά στοιχεία που αφορούν τα πολιτιστικά κτίρια που μελετήθηκαν, αλλά και η χρήση που έχουν σήμερα. Στην Ενότητα 2 αναφέρονται στοιχεία που αφορούν στη διαδικασία των μετρήσεων. Στην Ενότητα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των ακουστικών παραμέτρων αλλά και μια συγκριτική αποτίμηση της ακουστικής των πολιτιστικών χώρων. Στην Ενότητα 4 αναφέρεται η διαδικασία δημιουργίας της βάσης δεδομένων των εικονικών ακροάσεων και στην Ενότητα 5 καταγράφονται ορισμένα συμπεράσματα.

1. Τα κτίσματα και η χρήση τους

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων στο Ιμαρέτ Κομοτηνής, στο Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου, στο Αρχοντικό Ταβανιώτη. Οι συγκεκριμένοι χώροι αποτελούν σημαντικά παραδοσιακά κτίρια στην περιοχή της Θράκης και επιλέχθηκαν προκειμένου να αποτυπωθεί η καθημερινότητα και τα πολιτιστικά χαρακτηριστικά των γλωσσικών κοινοτήτων που συμβιώνουν εκεί.

Το **Ιμαρέτ Κομοτηνής** (Σχ.1α) βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της πόλης της Κομοτηνής, χρονολογείται μεταξύ του 1360 και του 1380 και αποτελεί ένα από τα παλαιότερα οθωμανικά μνημεία της περιοχής της Θράκης και της Ευρώπης γενικότερα [2]. Πρόκειται για ένα οικοδόμημα με τρεις χώρους που διαμορφώνουν στην κάτοψη το σχήμα T (τύπου zaviye). Ο μεσαίος χώρος είναι τετράγωνος στην κάτοψη και αποτελεί το κέντρο του κτιρίου. Καλύπτεται με ημισφαιρικό θόλο με χαμηλό οκταγωνικό τύμπανο μέσω τεσσάρων λοφίων κατασκευασμένων με την τεχνική των πρισματικών τριγώνων. Είναι ανοιχτός στη βόρεια πλευρά με δυο πλατιές παραστάδες που στηρίζουν ψηλό ημικυκλικό τόξο που ορίζει το άνοιγμα. Στο μέσον του νοτίου τοίχου του ανοίγεται ορθογώνια σε κάτοψη κόγχη που επιστέφεται με οξυκόρυφο τόξο διπλής καμπυλότητας. Δυο θύρες με πέτρινα θυρώματα και μεγάλα ανακουφιστικά τόξα πάνω από αυτές στα βόρεια άκρα του ανατολικού και δυτικού τοίχου του οδηγούν στους δυο πλευρικούς χώρους που φέρουν παρόμοια κάλυψη και είναι εξοπλισμένοι με τζάκια [3]. Εκεί στεγάζεται σήμερα το Εκκλησιαστικό Μουσείο της Ιεράς Μητροπόλεως Μαρωνείας και Κομοτηνής, ενώ συχνά ο ίδιος χώρος χρησιμοποιείται για μουσικές εκδηλώσεις και διαλέξεις. Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκε ο ένας από τους δύο κλειστούς χώρους και ο ημιανοιχτός. Σύμφωνα με τους φύλακες, η κλειστή αίθουσα χρησιμοποιείται για ομιλίες κατά τη διάρκεια των εγκαίνιων εκθέσεων.

Το **Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου** (Σχ.1β) βρίσκεται στην παλιά πόλη της Ξάνθης και κτίστηκε το 1877 από τους καπνέμπορους Αθανάσιο και Παντελή

Κουγιουμτζόγλου. Πρόκειται για δύο όμοιες μεταξύ τους κατοικίες οι οποίες κατασκευάστηκαν σε επαφή, με ενιαία στέγη που διαμορφώνεται με αέτωμα. Αναπτύσσονται σε τρία επίπεδα και φέρουν εσωτερικά αξιόλογο τοιχογραφικό διάκοσμο. Η οργάνωση των όψεων και η χρήση των υλικών δημιούργησαν ένα ενδιαφέρον αρχιτεκτονικό στυλ με νεοκλασικές επιρροές [4]. Σήμερα, στεγάζει το λαογραφικό μουσείο Ξάνθης και επίσης χρησιμοποιείται για καλλιτεχνικές εκδηλώσεις.

Το **Αρχοντικό Ταβανιώτη** (Σχ.1γ) βρίσκεται στη Μαρόνεια Ροδόπης και κτίστηκε ανάμεσα στα 1880 και 1885 από τον Μαρωνίτη έμπορο Παρράσιο Ταβανιώτη. Έχει χαρακτηριστεί ιστορικό διατηρητέο μνημείο και αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα της οικιστικής αρχιτεκτονικής στη Δυτική Θράκη. Στο ισόγειο το χαμώι χρησιμοποιούνταν για μαγείρεμα και άλλες καλοκαιρινές εργασίες. Το κατώι είχε πατητήρι στη ΝΔ του γωνία, χτιστά αμπάρια για ελιές και πιθάκια για κρασί και λάδι. Στον όροφο η δυτική και η νότια πλευρές του χαγιατιού και της σάλας προβάλλουν σε σαχισιά (κλειστοί εξώστες). Η ξύλινη στέγη είναι τετράριχτη στον κύριο οικοδομικό πυρήνα και τρίριχτη στις προεξοχές του χαγιατιού δυτικά και νότια [5]. Σήμερα, έχει αποκατασταθεί και φιλοξενεί τη μόνιμη έκθεση αρχαιοτήτων με θέμα «Η Μαρόνεια και ο Ίσμαρος από τα Προϊστορικά μέχρι τα Νεότερα Χρόνια».



α. **Σχήμα 1** Αποψη των κτιρίων α. Ιμαρέρ Κομοτηνής, β. Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου, γ. Αρχοντικό Ταβανιώτη.

2. Μετρήσεις

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας διεξήχθησαν μετρήσεις κρουστικής απόκρισης των χώρων με δύο διαφορετικές μεθόδους: (1) μετρήσεις με παντοκατευθυντικό μικρόφωνο και (2) με αμφιωτική διάταξη μικροφώνων με τη χρήση του ανδρείκελου (KEMAR).

- Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παντοκατευθυντικού μικροφώνου, προορίζονται κυρίως για ανάλυση και υπολογισμό αντικειμενικών ακουστικών παραμέτρων για τους υπό μελέτη χώρους.
- Οι μετρήσεις που προέκυψαν χρησιμοποιώντας την αμφιωτική διάταξη έχουν σκοπό τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς των χώρων μέσω του υπολογισμού παραμέτρων που αξιολογούν τους χώρους αυτούς σύμφωνα με την αντιληπτική ικανότητα του ανθρώπου.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός ακουστικών μετρήσεων υψηλής πιστότητας.

2.1 Διαδικασία και θέσεις μετρήσεων

Για τις μετρήσεις στην παρούσα εργασία, το σήμα διέγερσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν Σήμα Σάρωσης Ημιτόνου (Sine Sweep), η περίοδος του οποίου φθίνει καθώς εξελίσσεται ο χρόνος. Η συνολική του διάρκεια είναι ίση με 10 sec, ώστε να καλύπτει τυπικά τη μέτρηση κρουστικής απόκρισης σε μικρούς, μεσαίους και μεγάλους κλειστούς χώρους. Επίσης, η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν 48 KHz, ενώ ο κβαντισμός ίσος με 16 bit. Αντίστοιχα ήταν και τα χαρακτηριστικά των κρουστικών αποκρίσεων που παράχθηκαν.

Προκειμένου η μελέτη των χώρων να είναι αντικειμενική, αλλά επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, για να παραχθούν εικονικές ακροάσεις σε πληθώρα σημείων στους επιλεγμένους χώρους, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πολλά σημεία. Η πηγή τοποθετήθηκε σε όλους τους χώρους σε μια φυσική θέση στο ύψος ενός μέσου ομιλητή και το μετρητικό μικρόφωνο όπως και το ανδρείκελο τοποθετήθηκαν στις θέσεις των ακροατών. Ύστερα από τη διεξαγωγή των μετρήσεων, ήταν απαραίτητη η επεξεργασία των αρχείων που προέκυψαν, προκειμένου να γίνουν κατάλληλα για τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων, αλλά και για την παραγωγή των αντίστοιχων αρχείων για τις εικονικές ακροάσεις. Η συγκεκριμένη επεξεργασία δεν αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της ακουστικής του χώρου, ούτε έχει επίδραση στα αποτελέσματα των υπολογισμών. Η βασική επεξεργασία που εφαρμόστηκε στα αρχεία των ακουστικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ήταν η αποκοπή της αρχικής καθυστέρησης εμφάνισης του απευθείας σήματος και εισήχθη σταθερή αρχική καθυστέρηση για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων. Ακολούθως, οι κρουστικές αποκρίσεις κανονικοποιήθηκαν στη στάθμη και τέλος εφαρμόστηκε παράθυρο για τον περιορισμό της χρονικής τους διάρκειας υιοθετώντας ίδια διάρκεια για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων.

3. Αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι

Οι καθιερωμένες αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι που υπολογίζονται στις μελέτες ακουστικής κλειστών χώρων είναι οι εξής:

- Χρόνος αντήχησης (Reverberation Time, RT)
- Ακουστική ευκρίνεια (Clarity, C50)
- Δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index, STI)
 - a. Χρόνος αντήχησης (RT)

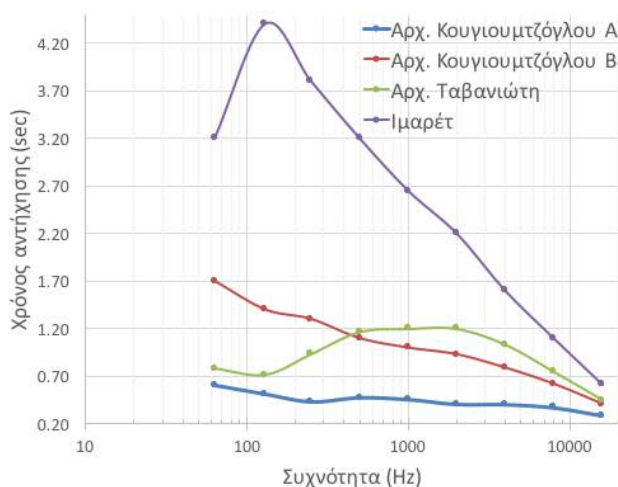
Η ιδανική τιμή του χρόνου αντήχησης έχει προσδιοριστεί πειραματικά στη βιβλιογραφία σε συσχέτιση με την προβλεπόμενη χρήση του χώρου και τον όγκο του [6]. Στον Πίνακα 2, δίνεται ο όγκος κάθε αίθουσας, η ενδεικτική χρήση που γίνεται και η τιμή του ιδανικού χρόνου αντήχησης.

Πίνακας 1 Όγκος υπό μελέτη χώρων και ο ιδανικός χρόνος αντήχησης με βάση τον όγκο και τη χρήση.

Χώρος	Χρήση	Όγκος	Ιδανικό RT
-------	-------	-------	------------

		(m ³)	(sec)
Ιμαρέτ Κομοτηνής (εκθεσιακός χώρος)	Ομιλία	338.25	0.7
Ιμαρέτ Κομοτηνής (εξωτερικός χώρος)	Ομιλία/Μουσική	0.00	-
Αρχοντικό Ταβανιώτη (Αρχαιολογικό Μουσείο Μαρώνειας)	Ομιλία	124.95	0.5
Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου (αίθουσα εκδηλώσεων)	Ομιλία/Μουσική	131.58	0.5/0.9
Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου (αίθουσα δημιουργικής απασχόλησης)	Ομιλία	245.87	0.6

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο μέσος όρος του χρόνου αντήχησης για τις διάφορες θέσεις μέτρησης στους υπό μελέτη κλειστούς χώρους.

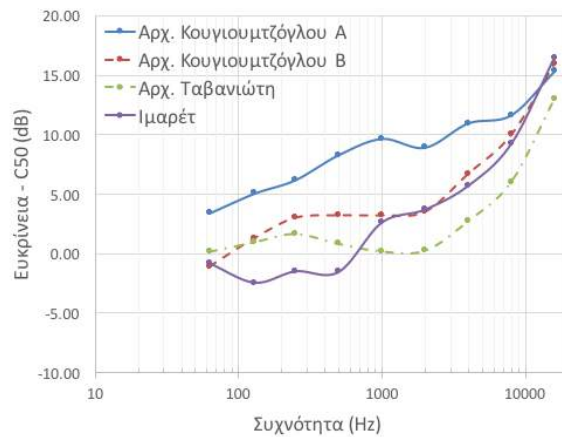


Σχήμα 3 Χρόνος αντήχησης των χώρων που μελετήθηκαν συναρτήσει της συχνότητας.

3.2 Ακουστική ευκρίνεια (C50)

Η ακουστική ευκρίνεια (C50) είναι μία παράμετρος που αναφέρεται στην ευκρίνεια και τη «διαφάνεια» μετάδοσης σήματος ομιλίας ή μουσικής μέσα στο χώρο [7]. Ο υπολογισμός της ευκρίνειας συμπεριλαμβάνει τον προσδιορισμό του λόγου της ακουστικής ενέργειας που διαδίδεται τα πρώτα 50 msec προς την ενέργεια από το χρονικό αυτό σημείο έως το τέλος της κρουστικής απόκρισης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός τόσο καλύτερη είναι η μετάδοση και η κατανόηση της ομιλίας. Οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου πάνω από τα 0dB είναι αποδεκτή με

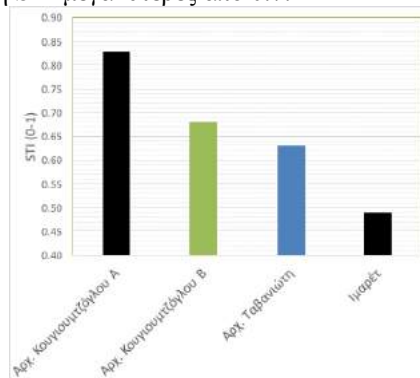
βέλτιστη τα +9dB για αίθουσες όπου απαιτείται κατανόηση ομιλίας, ενώ αν η παράμετρος αυτή ισούται με -3dB για τους ίδιους χώρους, η κατανόηση ομιλίας θα είναι πολύ φτωχή [8].



Σχήμα 4 Ακουστική ευκρίνεια (C50) για τους χώρους που μελετήθηκαν συναρτήσει της συχνότητας.

3.3 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI)

Ο δείκτης STI αποτελεί μια αντικειμενική παράμετρο που προσδιορίζει το ποσοστό των σωστών συλλαβών που αντιλαμβάνεται ο μέσος ακροατής μέσα σε ένα κλειστό χώρο λαμβάνοντας υπόψη το θόρυβο βόθους και το χρόνο αντήχησης [9]. Οι τιμές του δείκτη μετάδοσης ομιλίας (STI) κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1, ενώ είναι αποδεκτές από 0.5 και πάνω. Οι χώροι που προορίζονται αποκλειστικά για μετάδοση ομιλίας (χώροι διαλέξεων, αίθουσα διδασκαλίας, θέατρο) πρέπει να έχουν τιμές του δείκτη STI μεγαλύτερες από 0.7.



Σχήμα 5 Δείκτης μετάδοσης ομιλίας χώρων εκδηλώσεων και μουσείων που μελετήθηκαν

4. Δημιουργία βάσης δεδομένων εικονικών ακροάσεων

Οι αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις που μετρήθηκαν με το ανδρείκελο σε διαφορετικές θέσεις των πολιτιστικών κτιρίων, συνελίχθηκαν με ηχογραφήσεις προφορικού πολιτιστικού υλικού που ηχογραφήθηκε στην περιοχή της Θράκης. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης διαδικασίας παράγει αρχεία εικονικής ακρόασης ικανά να μεταφέρουν την ακουστική εντύπωση των χώρων σε έναν ακροατή με τη χρήση ακουστικών. Τα αρχεία υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία για τη διαχείριση της έντασης και την αφαίρεση παραμορφώσεων ιδιαίτερα στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Η βάση δεδομένων των εικονικών ακροάσεων πρόκειται να διατίθεται ελεύθερα από την επίσημη ιστοσελίδα του έργου [1].

5. Συμπεράσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι χώροι που μελετήθηκαν χρησιμοποιούνται κυρίως για κοινωνικές – πολιτιστικές εκδηλώσεις με κύρια δραστηριότητα τη μετάδοση ομιλίας και σε ορισμένες περιπτώσεις τη μουσική. Συγκριτικά, η αίθουσα εκδηλώσεων στο Αρχοντικό Κουγιουμτζόγλου (Λαογραφικό Μουσείο Ξάνθης) είναι αυτή που παρουσιάζει την καλύτερη ακουστική συμπεριφορά και η αίθουσα στο Ιμαρέτ αυτή που παρουσιάζει την πιο προβληματική συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο μιας και ιστορικά το Ιμαρέτ δεν κατασκευάστηκε με έμφαση στην ακουστική συμπεριφορά.

Παρατηρώντας τις τιμές των αντικειμενικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, είναι ξεκάθαρο ότι οι αίθουσες κατά κύριο λόγο είναι ακατάλληλες να φιλοξενούν τις εκδηλώσεις οι οποίες οργανώνονται σε αυτές. Η έλλειψη ακουστικής μελέτης αλλά και οποιασδήποτε μορφής ακουστικής διαμόρφωσης είναι εμφανής. Αυτό εν μέρει δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι χώροι αυτοί στο παρελθόν είχαν διαφορετική χρηστικότητα, όπως οικιακοί χώροι κ.ά., οπότε οι απαιτήσεις για την ακουστική συμπεριφορά ήταν διαφορετικές, ενώ επίσης ορισμένες από τις αίθουσες ήταν κενές από έπιπλα και ως εκ τούτου εμφάνιζαν υψηλή αντήχηση. Επίσης, ως διατηρητέοι χώροι οι επεμβάσεις που μπορούν να γίνουν σε πολλές περιπτώσεις είναι είτε απαγορευμένες, είτε αρκετά δαπανηρές.

6. Ευχαριστίες

“The research leading to these results has received funding from the [EEA] Mechanism 2009-2014 under Project Contract n° [3768].

7. Αναφορές

[1] <http://ct-audiolink.gr/>

[2] M. Kiel. Studies on the Ottoman Architecture of the Balkans. Variorum (1990).

[3] http://odysseus.culture.gr/h/2/gh251.jsp?obj_id=1775, Ιστοσελίδα Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού, ανακτήθηκε 01/07/2016.

[4] http://odysseus.culture.gr/h/2/gh251.jsp?obj_id=856, Ιστοσελίδα Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού, ανακτήθηκε 01/07/2016.

- [5] http://odysseus.culture.gr/h/1/gh151.jsp?obj_id=20342, Ιστοσελίδα Υπουργείου Πολιτισμού και Αθλητισμού, ανακτήθηκε 01/07/2016.
- [6] L. Beranek. Acoustics. Acoustical Society of America. NY (1996).
- [7] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders. Fundamentals of Acoustics – 4th edition. John Wiley & Sons (2000).
- [8] Δ. Σκαρλάτος, Εφαρμοσμένη Ακουστική, Εκδόσεις Gotsis (2015).
- [9] W. J. Cavanaugh, G. C. Tocci, J. A. Wilkes. Architectural Acoustics: Principles and Practice. John Wiley & Sons (2010).

Σύγκριση ακουστικών χαρακτηριστικών ορθόδοξων ναών.

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Κοντομίχος Φώτης
Μεταδιδάκτορ /
Εργαστήριο Ενσύρματης
Τηλ/νίας, Τμήμα Ηλ.
Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
fotkon@upatras.gr

Χαράλαμπος Παπαδάκος
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
rapadakos@upatras.gr

Νικόλαος-Αλέξανδρος
Τάτλας
Επικ. Καθηγητής,
Τμ. Ηλεκτρονικών Μηχ.
Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. /
Θηβών 250 Αιγάλεω
ntatlas@teipir.gr

Στέλιος Μ. Ποτηράκης
Αν. Καθηγητής, Τμ.
Ηλεκτρονικών Μηχ.
Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά
Τ.Τ. / Θηβών 250
Αιγάλεω
spoti@teipir.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
mourjor@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αρχιτεκτονική των ναών της ορθόδοξης πίστης παρουσιάζει κάποιες βασικές ιδιαιτερότητες. Διαφορετικοί αρχιτεκτονικοί ρυθμοί, διαφορετικό μέγεθος και πολλές φορές διαφορετικά υλικά οικοδόμησης προσδίδουν στον χώρο διαφορετική ακουστική συμπεριφορά. Ναοί οι οποίοι κατασκευάστηκαν σε διαφορετικές ιστορικές περιόδους επίσης παρουσιάζουν ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον.

Σκοπός της εργασίας είναι να καταγράψει την ακουστική συμπεριφορά τέτοιων χώρων λατρείας που βασίζονται σε διαφορετικές σχεδιαστικές σχολές και να εξαγάγει κάποια συμπεράσματα για την διαφοροποίηση της ακουστικής συμπεριφοράς των χώρων αυτών με βάση τον αρχιτεκτονικό ρυθμό, το μέγεθος του χώρου και τα υλικά κατασκευής.

Για τις ανάγκες της εργασίας έχει καταγραφεί η ακουστική του ναού του Αγ. Ανδρέα Πατρών που ακολουθεί τον ρυθμό της βασιλικής με τρούλο και του ναού της Κοίμησης της Θεοτόκου της Κομοτηνής που είναι δείγμα των εκκλησιών της μεταβυζαντινής περιόδου με χαμηλό προφίλ, ρυθμό τρίκλιτης βασιλικής με νάρθηκα και βασικό υλικό κατασκευής το ξύλο. Πέρα από την ανάλυση των μετρήσεων δημιουργήθηκε και μία βάση δεδομένων εικονικών ακροάσεων βυζαντινών ψαλμών που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα ακρόασης που εξετάζουν το κατά πόσο η διαφορετική ακουστική συμπεριφορά των χώρων είναι αντιληπτή και αναγνωρίσιμη.

Acoustic Parameters comparison of Orthodox Churches

ABSTRACT

The structure and geometry of Orthodox churches follows different stylistic architectural characteristics and such churches also vary in size and surface materials, often due to their construction during different historic periods. As a result, such variations result to significant differences in acoustic properties. This paper attempts to quantify such differences by examining the characteristic examples of two churches with different architectural styles: the Basilica with dome and the three-aisle Basilica with antetemple.

The work presents comparative results of acoustic measurements carried out in these churches, together with subjective listener tests based on auralisation of anechoic psalm material with binaurally recorded impulse responses of the churches. A generic orthodox church was also simulated in a computer application and was used as reference for both objective and subjective results.

1. Εισαγωγή

Στην πρώιμη αυτή η μελέτη εξετάζεται η ακουστική δύο αρχιτεκτονικά ετερόκλιτων ορθόδοξων ναών, του Αγίου Ανδρέα Πατρών και του ναού κοιμήσεως της Θεοτόκου στην Κομοτηνή [7,2].

Επιπλέον, με την παρούσα εργασία διευρύνεται και επαληθεύεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων προηγούμενης έρευνας των συγγραφέων [1] η οποία βασιζόταν αποκλειστικά στη χρήση γενικευμένου προτύπου (generic) υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης της ακουστικής των ιερών ορθόδοξων ναών. Στην παρούσα εργασία οι ακουστικές παράμετροι υπολογίζονται τόσο από πολλαπλές μετρήσεις όσο και από η εικονική ακρόαση ψαλμών με τη χρήση μετρημένων αμφιωτικών κρουστικών αποκρίσεων των χώρων. Οι ακροάσεις αυτές αξιοποιούνται σε πείραμα ακρόασης για την αξιολόγηση των αντιληπτικά και υποκειμενικά αποδεκτών ακουστικών χαρακτηριστικών των ναών αυτών, σε σύγκριση μάλιστα και με αντίστοιχες ακροάσεις που προκύπτουν από την υπολογιστική εξομοίωση του προτύπου (generic) ναού.

2. Χαρακτηριστικά των ναών

(α) Ο ιερός ναός του Α. Ανδρέα Πατρών είναι ορθόδοξη εκκλησία που βρίσκεται στην ανατολική παραλιακή ζώνη της Πάτρας. Είναι ρυθμού βυζαντινής βασιλικής και η ανέγερση του έγινε τα έτη 1908-1974. Το εμβαδό της επιφάνειάς του είναι περίπου 1800m² και μπορεί να φιλοξενήσει 7.000 πιστούς (4 άτομα/ m²). Είναι η μεγαλύτερη εκκλησία στην Ελλάδα και η τρίτη μεγαλύτερη βυζαντινού ρυθμού στα Βαλκάνια, μετά τον Καθεδρικό Ναό του Αγίου Σάββα στο Βελιγράδι και τον Καθεδρικό Ναό Αλεξάντρ Νέφσκυ στη Σόφια [7].

(β) Ο Ιερός Μητροπολιτικός Ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου Κομοτηνής είναι ορθόδοξη εκκλησία που βρίσκεται στο εσωτερικό του φρουρίου της ομώνυμης πόλης και ανεγέρθηκε το 1800. Ο ναός είναι τρίκλιτος με νάρθηκα, ξυλόστεγος και το δάπεδο του βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό του γύρω χώρου. Στη σημερινή του μορφή, είναι αναστηλωμένος και έχει κηρυχθεί ιστορικό διατηρητέο μνημείο [2].

(γ) Το γενικευμένο πρότυπο (generic model) ορθόδοξου ναού βασιλικής με τρούλο, αναπτύχθηκε στο CATT-Acoustics και έχει μεταβλητές γεωμετρικές παραμέτρους όγκου και υλικών [1,6].

3. Διαδικασία μετρήσεων

Σε όλες τις περιπτώσεις, η θέση ηχητικής πηγής (αυτοενισχυόμενο ηχείο με ευρεία απόκριση συχνότητας και ονομαστική ισχύ 650 watt) τοποθετήθηκε στο κέντρο μπροστά από το ιερό, θέση από την οποία ψέλνει ο ιερέας. Πάρθηκαν μετρήσεις σε τέσσερις θέσεις που καλύπτουν όλη την επιφάνεια του κεντρικού χώρου όπως και μία μέτρηση κάτω από το γυναικωνίτη. Στο Σχ. 1(α) παρουσιάζεται η κάτοψη του ναού του Αγίου Ανδρέα Πατρών με τις θέσεις πηγής και δεκτών. Το ύψος τοποθέτησης των μικροφώνων είναι ίσο με 1.2m που αντιπροσωπεύει το ύψος καθημένου ακροατή.

Στην περίπτωση του Ιερού ναού Κοιμήσεως της Θεοτόκου Κομοτηνής, οι θέσεις των μικροφώνων φαίνονται στο Σχ.1(β) Το ύψος τοποθέτησης των μικροφώνων αντιστοιχεί στο ύψος καθιστών ακροατών 1.2m.

Στις παραπάνω θέσεις μετρήθηκαν 2 κατηγορίες αποκρίσεων: (α) μονοκαναλικές, κρουστικές αποκρίσεις με χρήση παντοκατευθυντικού μετρητικού μικροφώνου DPA 4000, (β) δικάναλες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις με χρήση μετρητικού ανδρικού ΚΕΜΑΡ της εταιρίας G.R.A.S..

Ύστερα από τη διεξαγωγή των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η επεξεργασία των αρχείων που προέκυψαν, προκειμένου να είναι κατάλληλα για τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων, αλλά και για την παραγωγή των αντίστοιχων αρχείων για τις εικονικές ακροάσεις. Έτσι, η αρχική καθυστέρηση εμφάνισης του απευθείας σήματος αποκόπτεται και υιοθετείται σταθερή αρχική καθυστέρηση για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων. Ακολούθως, οι κρουστικές αποκρίσεις κανονικοποιούνται και τέλος εφαρμόζεται παράθυρο για τον περιορισμό της χρονικής τους διάρκειας υιοθετώντας ίδια διάρκεια για όλα τα αρχεία κρουστικών αποκρίσεων.

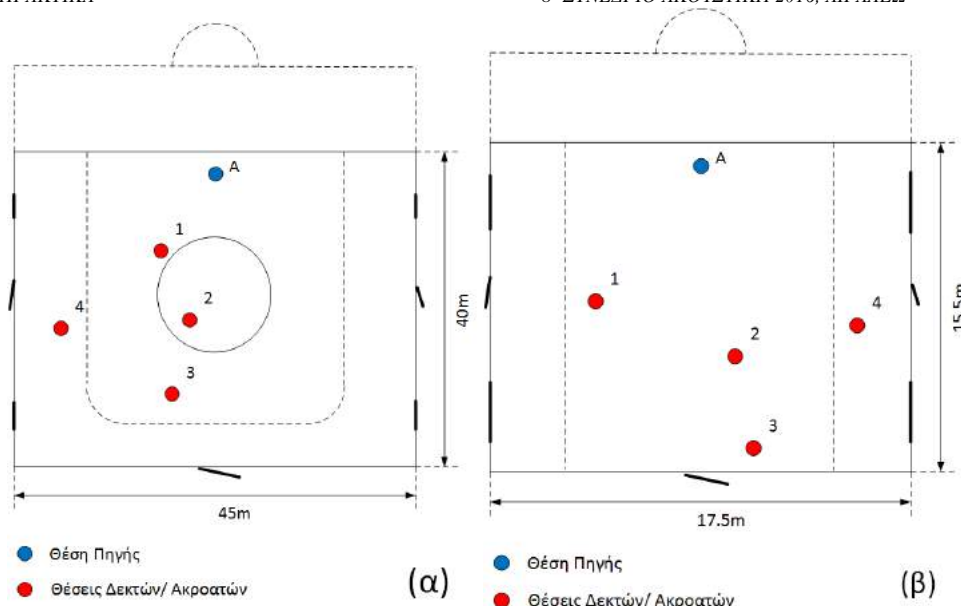
4. Αποτελέσματα

4.1 Ακουστικές παράμετροι

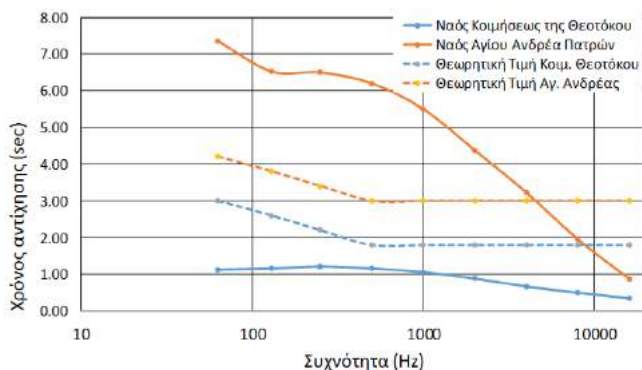
Για τους χώρους που μελετήθηκαν και με βάση τις μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτούς, υπολογίστηκαν οι παρακάτω αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι:

- Χρόνος αντήχησης (Reverberation Time, RT)
- Ακουστική ευκρίνεια (Clarity, C50)
- Δείκτης μετάδοσης ομιλίας (Speech Transmission Index, STI)

Οι μέσες τιμές Χρόνου Αντήχησης για όλες τις μετρημένες θέσεις στους 2 ναούς, δίνονται στο Σχήμα 2. Στο ίδιο σχήμα παρατίθενται και οι ιδανικές μορφές της συνάρτησης RT-συχνότητας όπως προτείνονται για λατρευτική χρήση (ναούς), αντίστοιχου όγκου με τις 2 περιπτώσεις ναών που εξετάστηκαν [3].



Σχήμα 1. Κατόψεις των δύο ιερών ναών και θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. (α) Άγιος Ανδρέας Πατρών. (β) Κοίμηση της Θεοτόκου Κομοτηνής.



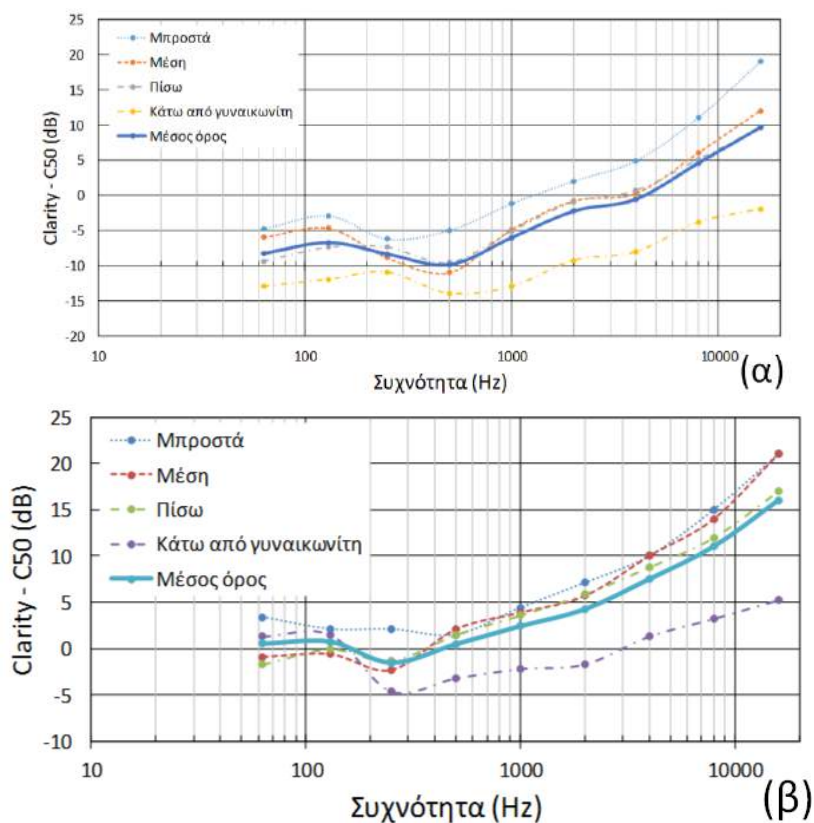
Σχήμα 2. Χρόνος Αντήχησης ανά συχνότητα για τους 2 ναούς και ιδανικές τιμές για ναούς με αντίστοιχο όγκο.

4.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων μετρήσεων

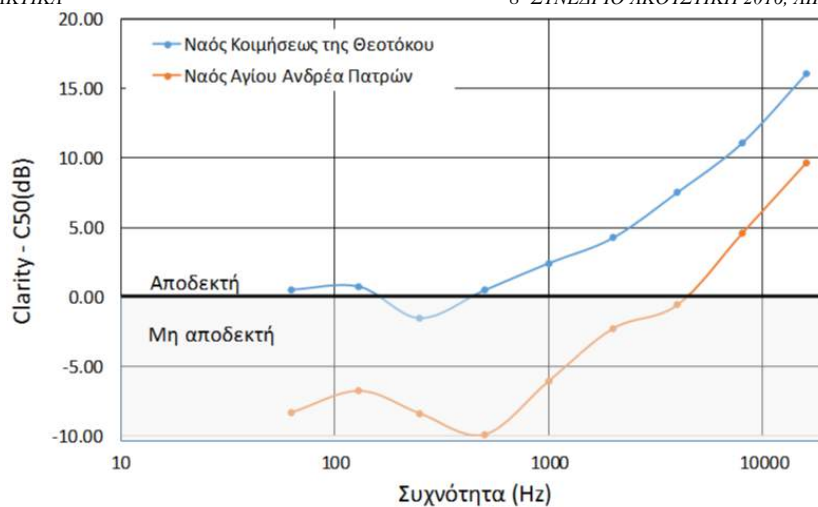
Από την παραπάνω σύγκριση φαίνεται ότι και οι δύο ναοί εμφανίζουν Χρόνο Αντήχησης που δε συμπίπτει με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή για λατρευτικούς χώρους αντίστοιχου όγκου [3], δεδομένα που βεβαίως αφορούν μη-ορθόδοξους ναούς. Ο ναός του Αγίου Ανδρέα παρουσιάζει σχεδόν διπλάσιο χρόνο αντήχησης από τον θεωρητικά αναμενόμενο, ενώ ο ναός Κοιμήσεως τη Θεοτόκου παρουσιάζει μικρότερο χρόνο αντήχησης από τον αναμενόμενο. Και στις 2 περιπτώσεις, η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις επιφάνειες και στα επιμέρους αρχιτεκτονικά στοιχεία: για τον ναό Αγ. Ανδρέα, τα υλικά είναι εξαιρετικά ανακλαστικά, ενώ για την εξαιρετικά υψηλή τιμή RT σε χαμηλές

συχνότητες, επιδρά ο όγκος και το μέγεθος του τρούλου. Ο ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου περιέχει εσωτερικά ασυνήθιστα και απορροφητικά υλικά όπως το ξύλο.

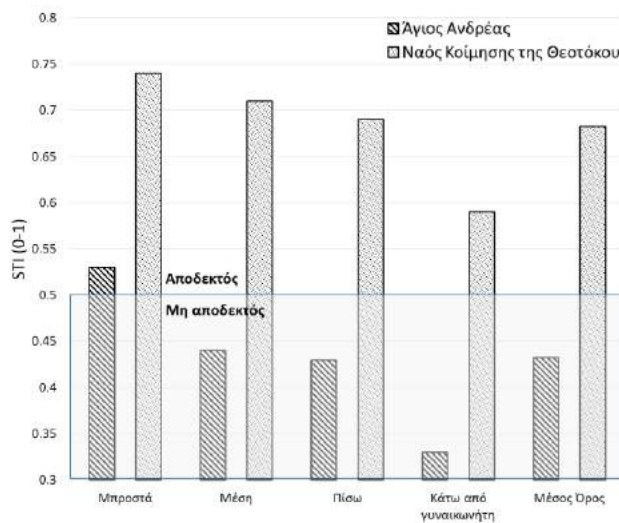
Με δεδομένη την εξαιρετικά υψηλή αντήχηση, για το ναό του Αγ. Ανδρέα, η ευκρίνεια είναι μη αποδεκτή στις κρίσιμες μπάντες συχνοτήτων για την ομιλία (500 - 4.000Hz) ενώ στο ναό κοιμήσεως της Θεοτόκου, όπου η αντήχηση είναι χαμηλή, ο δείκτης αυτός παρουσιάζει αποδεκτές τιμές. Είναι λοιπόν αναμενόμενο, όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα στο Σχ.4, ότι ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας παρουσιάζει μη αποδεκτή τιμή στην περίπτωση του Αγίου Ανδρέα και αποδεκτή τιμή στην περίπτωση του ναού κοιμήσεως της Θεοτόκου. Παρατηρώντας τις μετρήσεις για κάθε χώρο είναι επίσης προφανές, ότι οι μπροστινές θέσεις παρουσιάζουν την καλύτερη καταληπτότητα που είναι και αποδεκτή, ενώ στις μεσαίες και πίσω θέσεις η καταληπτότητα μειώνεται και γίνεται μη αποδεκτή για την περίπτωση του ναού του Αγ. Ανδρέα. Τέλος, οι χειρότερες θέσεις ως προς την καταληπτότητα βρίσκονται κάτω από το μπαλκόνι του γυναικωνίτη.



Σχήμα 3. Ευκρίνεια σε διαφορετικές θέσεις: (α) Ι.Ν. Αγίου Ανδρέα, (β) Ι.Ν. Κοιμήσεως Θεοτόκου.



Σχήμα 4. Σύγκριση ακουστικής ευκρίνειας για τους δύο ναούς.



Σχήμα 5. Σύγκριση του δείκτη μετάδοσης ομιλίας στις αντίστοιχες θέσεις ανάμεσα στους δύο ναούς.

4.3 Πειράματα ακρόασης

Το πείραμα ακρόασης υλοποιήθηκε με εικονικές ακροάσεις που προέκυψαν από μετρημένες και προσομοιωμένες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις των ναών μετά από συνέλιξη με τα 30 πρώτα δευτερόλεπτα ανηχοϊκών ηχογραφήσεων από τις βάσεις δεδομένων της εργασίας CAHRISMA [5] και DAMASKINOS [4]. Το πείραμα έχει ως σκοπό να εξετάσει την υποκειμενική προτίμηση του κοινού όσον αφορά την ακρόαση ψαλμών. Το τεστ είναι τύπου AB, οι ακροατές ακούνε ψαλμούς

σε αντίστοιχες θέσεις των δύο ναών με τη διαφορετική αντήχηση και βαθμολογούν κατά την υποκειμενική τους εκτίμηση – προτίμηση. Στο τεστ πήραν μέρος 10 μη ειδικοί ακροατές, οι οποίοι όμως έχουν συμμετάσχει και άλλες φορές σε παρόμοια τεστ. Σε κάθε ερώτημα ο ακροατής ακούει τον ίδιο ύμνο στην αντίστοιχη θέση στον πρώτο και στο δεύτερο ναό και ψηφίζει ποιο άκουσμα από τα δύο του αρέσει περισσότερο δίνοντας βαθμολογώντας ποσοτικά την προτίμηση του. Τα ηχητικά δείγματα των ψαλμών αποτελούνται ?? . Σε ένα δεύτερο σκέλος του πειράματος, ο ακροατής συγκρίνει τους ίδιους ψαλμούς σε αντίστοιχες θέσεις του Ναού του Αγίου Ανδρέα και του πρότυπου μοντέλου (generic model), όπως έχει προκύψει από την εξομοίωση σε υπολογιστή ναού με παρόμοιο όγκο, ψηφίζοντας αντίστοιχα ποιο άκουσμα από τα δύο προτιμάει.

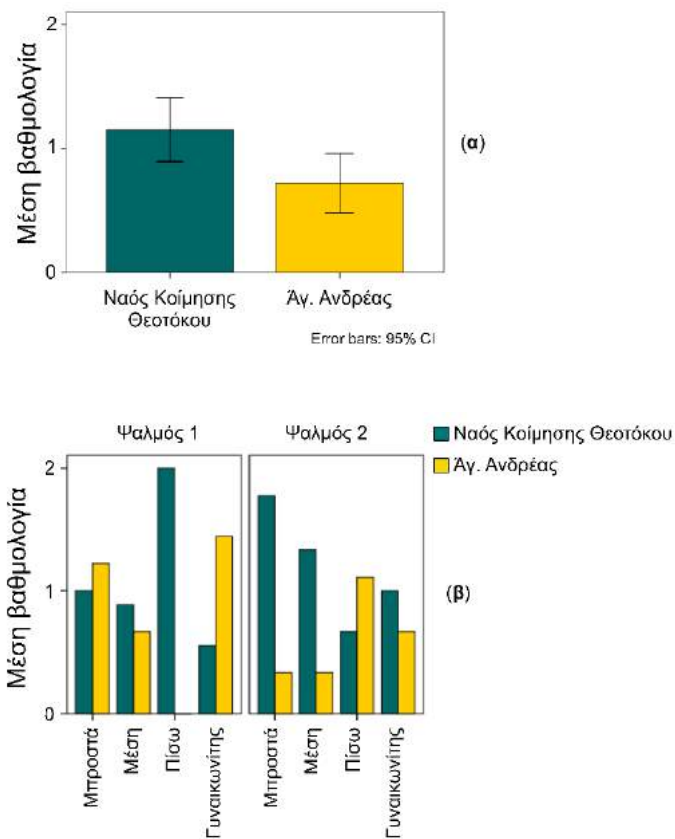
Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Σε αυτή την ανάλυση ο παράγοντας p (p -factor) για $p < 0.05$, δείχνει αν η μεταβλητή που εξετάζεται προκύπτει ότι είναι σημαντική στην υποκειμενική κρίση των ακροατών. Με δεδομένο ότι δείκτης p της στατιστικής ανάλυσης παίρνει τιμή $p = 0.011$ σε σχέση με το συγκεκριμένο ναό, στο Σχ. 6(α) παρουσιάζεται η μέση βαθμολογία προτίμησης του ενός έναντι του άλλου ναού. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, οι ακροατές προτιμούν το ναό Κοιμήσεως της Θεοτόκου, ο οποίος παρουσιάζει μικρότερη αντήχηση και καλύτερη καταληπτότητα. Με δεδομένο ότι το είδος του ψαλμού φαίνεται ως στατιστικά ισχυρά σημαντική παράμετρος ($p = 0.000$), στο Σχ.6(β) παρουσιάζεται η προτίμηση των δύο ψαλμών στις αντίστοιχες θέσεις των ναών. Παρατηρείται η συμπληρωματικότητα των απαντήσεων, καθώς ο κάθε ναός παρουσιάζεται κατάλληλος για ένα από τα δύο είδη ψαλμού.

Στο δεύτερο μέρος του τεστ εξετάστηκε η προτίμηση των ακροατών ανάμεσα σε ηχητικά δείγματα που παρήχθησαν από μετρημένες και προσομοιωμένες αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις αντίστοιχων θέσεων στο ναό του Αγίου Ανδρέα και στο γενικευμένο μοντέλο ναού αντίστοιχων διαστάσεων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 7 στις μπροστινές και μεσαίες θέσεις οι ακροατές εμφανίζουν σημαντική προτίμηση ως προς τις μετρήσεις στον Αγ. Ανδρέα σε σχέση με τις προσομοιώσεις, ενώ στις πίσω θέσεις εμφανίζεται προτίμηση ως προς την εξομοίωση, με δεδομένο ότι για τη θέση αυτή δεν παρουσιάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό η επίδραση της υψηλής αντήχησης του πραγματικού ναού.

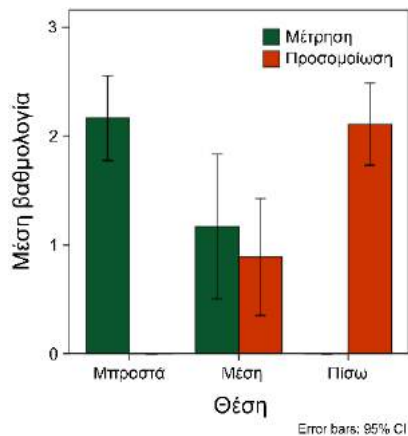
5. Συμπεράσματα

Από τη μελέτη αυτή, διαφαίνεται ότι η ακουστική των ορθόδοξων ναών, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αρχιτεκτονική μορφή, τη γεωμετρία και τα υλικά των χώρων αυτών. Ο ναός Κοιμήσεως της Θεοτόκου, που κατά τη συγκεκριμένη μέτρηση είχε μοκέτα στο πάτωμα και μικρό όγκο, παρουσιάζει μεγαλύτερη ηχοαπορρόφηση και τελικά μικρότερο χρόνο αντήχησης από το προβλεπόμενο, με αποτέλεσμα η καταληπτότητα και ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας να παρουσιάζουν αποδεκτές τιμές.

Σε σχέση με την υποκειμενική αποδοχή και προτίμηση που αφορά την ακουστική των ναών, τα αποτελέσματα του τεστ ακρόασης δείχνουν μεν κάποιες τάσεις, αλλά δεν μπορούν να οδηγήσουν σε γενικευμένα συμπεράσματα, κάτι που θα προκύψει εν δυνάμει από την εξέταση περισσότερων ναών. Επιπλέον, διαφαίνεται ότι το είδος του ψαλμού,



Σχήμα 6. (α) Μέση προτίμηση του ενός έναντι του άλλου ναού (β) συσχέτιση του κάθε ψαλμού με τη θέση σε κάθε ναό.



Σχήμα 7. Η μέση βαθμολογία της μέτρησης έναντι της προσομοίωσης.

είναι συσχετισμένο με την προτίμηση της ακουστικής και επιπλέον είναι εμφανές ότι η υπερβολική συνεισφορά του αντηχητικού πεδίου όπως π.χ. για τις απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης, οδηγεί σε αρνητική υποκειμενική αντίληψη για τη συνεισφορά της ακουστικής του ναού.

6. Ευχαριστίες

“The research leading to these results has received funding from the [EEA] Mechanism 2009-2014 under Project Contract n° [3768].

7. Βιβλιογραφία

[1] John Mourjopoulos, Charalambos Papadakos, Gavriil Kamaris, Georgios Chryssochoidis, Georgios Kouroupetroglou, ‘Optimal Acoustic Reverberation Evaluation of Byzantine Chanting in Churches’, 40th International Computer Music Conference joint with the 11th Sound and Music Computing Conference, At Athens, Greece, Volume: II, pp. 941-947

[2] Τριάρχη Φ. Ο νομός Ροδόπης χθες και σήμερα, Αρχείο Θράκης, τομ. 39ος, 1976.

[3] L. Beranek – Acoustics. Acoustical Society of America. NY (1996).

[4] Δ.Δελβηγιώτης, Γ. Κουρουπέτρογλου, «DAMASKINOS: The prototype corpus of Greek Orthodox exxlesiastical chant voices”, Proc. Of the International Conference “Crossroads Greece as an Intercultural Pole of Musical Thought and Creativity”, Thessaloniki, Greece, June 6-10 2011,pp. 289-302.

[5] CAHRISMA project acustica.ing.unife.it

[6] CATT-Acoustics. www.catt.se

[7] Κώστας Τριανταφύλλου, «Ο νέος μεγάλος ναός στην Πάτρα του Πολιούχου της Αγίου Ανδρέα», Πελοποννησιακή Πρωτοχρονιά, τ. ΣΤ' (1962), σελ. 306-309.

Συνεδρία B5: Μουσική ακουστική**Μελέτη και Σύγκριση Ηχητικών Αποκρίσεων της Αρχαιοελληνικής Λύρας με την Ενσωμάτωση Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων**

Θ. Κουμαρτζής
Μεταπτ. Φοιτητής
theo_ionathan@hotmail.com

Ρ. Κωτσάκης
Διδάκτωρ
rkotsakis@gmail.com

Γ. Καλλίρης
Αναπλ. Καθηγητής
gkal@jour.auth.gr

Εργαστήριο Ηλεκτρονικών ΜΜΕ
Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μέσων Μαζικής Επικοινωνίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αρχική ανάπτυξη της αρχαϊκής λύρας έγινε στα 3d Labs του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, όπου μία σειρά από καύκαλα χελώνας σκαναρίστηκαν τρισδιάστατα (3d scanning) και πάνω τους σχεδιάστηκαν (επίσης σε 3d) όλα τα υπόλοιπα μέρη της εκάστοτε λύρας. Στη συνέχεια, σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ήχου του Τμήματος Δημοσιογραφίας & Μ.Μ.Ε. του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης, τα όργανα ηχογραφήθηκαν και βγήκαν τα απαραίτητα ποιοτικά σχεδιαγράμματα από τα ηχητικά clips. Σήμερα η ανάγκη μελέτης και ανάπτυξης ενός μέσου για την κατά το δυνατόν απλούστερη εφαρμογή του με όσο πιο πλήρη ποιοτικά χαρακτηριστικά στην τελική αναπαραγωγή του ήχου, είναι επιτακτική: η συγκριτική μελέτη ανάμεσα στη χρήση πυκνωτικών μικροφώνων και πιεζοηλεκτρικών στοιχείων οδήγησε σε ορισμένα συμπεράσματα που παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Study and Comparison of Audio Responses of Ancient Greek Lyra with the Integration of Piezoelectric Elements**ABSTRACT**

The initial development of archaic lyre was completed in 3d Labs of the International University of Greece, where a series of tortoise shell scanned using 3d scanning technology and on them were designed (also in 3d) the rest of the parts of each lyre. Then, in collaboration with the Laboratory of Sound of the Department of Journalism & Media of the Aristotle University of Thessaloniki, the instruments were recorded and we began the final stage of development of musical instruments of different types of Ancient Greek Lyres shortly before their bid to musicians and music lovers. Today the need for designing and developing an external media is

imperative: a comparative study between the condenser microphones and piezoelectric elements led to some conclusions which are detailed below.

Εισαγωγή

Μετά από την μελέτη και ανάπτυξη της αρχαϊκής λύρας σε συνεργασία με το Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος και του τμήματος Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε. του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης και την επιβεβαίωση της μουσικής ποιότητας των ανακατασκευών τους, η τελική παρουσίαση των οργάνων αυτών στο μουσικόφιλο κοινό δημιούργησε νέες ανάγκες και προκλήσεις. Τα δεκαοκτώ διαφορετικά μοντέλα διαφορετικών τύπων αρχαϊκής λύρας (Φόρμιγξ, Βάρβιτος, Χέλυσ κ.α.) στελέχωσαν μια παγκόσμια μουσική κοινότητα (αριθμεί περισσότερα από 200 μέλη σε περισσότερες από 18 διαφορετικές χώρες) αποτελούμενη από επαγγελματίες μουσικούς, εκπαιδευτικούς, μουσικοθεραπευτές αλλά και από μουσικόφιλους χωρίς κάποιο μουσικό υπόβαθρο.

Πέρα από την χρήση κάποιου μικροφώνου (εξοπλισμός που κοστίζει ιδιαίτερα για ένα ποιοτικό αποτέλεσμα) η χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση λόγω της φύσης του ηχείου των λυρών, το οποίο είναι κατασκευασμένο από δέρμα ζώου, χρησιμοποιώντας έτσι την παλλόμενη μεμβράνη ως τον σημαντικότερο παράγοντα ενίσχυσης του σήματος που παράγεται από τις χορδές του οργάνου. Η φύση λοιπόν του ηχείου της λύρας, που αποτελεί στην ουσία ένα είδος κρουστόφωνου, στο οποίο όμως η πηγή δημιουργίας του ήχου είναι οι χορδές, οι οποίες παλλόμενες μεταφέρουν την δόνηση αρχικά στον ξύλινο καβαλάρη και εν συνεχεία στην δερμάτινη μεμβράνη που είναι ουσιαστικά το καπάκι του ηχείου του οργάνου, είναι τέτοια που απαιτεί περαιτέρω έρευνα όχι μόνο σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και την θέση που θα τοποθετηθούν σε σχέση με τον καβαλάρη του οργάνου για ένα κατά το δυνατόν πιο πλήρες φάσμα συχνοτήτων. Σε αυτό το δεύτερο παράγοντα στηρίχθηκε και η μελέτη που έγινε συγκριτικά με την χρήση των αισθητήρων και μικροφώνου για να εντοπιστούν οι βασικές διαφορές τους, μέσω σύγκρισης των παραγόμενων ηχητικών σημάτων. Ειδικότερα θα προσδιοριστούν οι διαφορές στις εξαγόμενες ηχητικές αποκρίσεις με τη βοήθεια συναρτήσεων μεταφοράς κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος μετρήσεων.

Αν και έχει πραγματοποιηθεί ηχογράφιση ανακατασκευής της Χέλυσ με την χρήση πυκνωτικών μικροφώνων, δεν έχει παρουσιαστεί ξανά συγκριτική μελέτη σε σχέση με την χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

1. Σκοπός του πειράματος

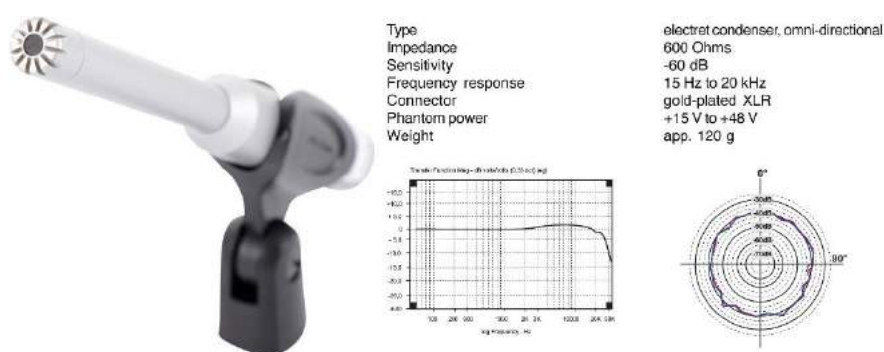
Η ιδιαίτερη μορφή του ηχείου του τύπου της ανακατασκευής της αρχαϊκής λύρας (Χέλυσ) που χρησιμοποιήθηκε και η μεμβράνη που, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των σύγχρονων μουσικών οργάνων, είναι κατασκευασμένη από δέρμα ζώου και όχι από ξύλο, αποτέλεσε το σημείο που έκριζε περαιτέρω μελέτης σε ότι αφορά την χρήση του οργάνου στην σύγχρονη εποχή.

Για την ακρίβεια, η χρήση πυκνωτικών μικροφώνων αποτελεί την ιδανική λύση για την ενίσχυση του ήχου του οργάνου για την συμμετοχή του σε ζωντανές εκτελέσεις, ηχογραφήσεις αλλά και περαιτέρω διεύρυνσής του με απευθείας

επεξεργασία του σήματος τόσο με μηχανικά όσο και με ψηφιακά μέσα (hardware και software).

Ωστόσο, το υψηλό κόστος και η υψηλή ευαισθησία σε πιθανή ανάδραση (feedback), καθιστούν την μελέτη και εφαρμογή πιεζο-ηλεκτρικών στοιχείων (κρυστάλλων) αναγκαία: η εύκολη εφαρμογή τους ακόμη και από κάποιο άτομο δίχως πρότερη εμπειρία και η δυνατότητα απευθείας σύνδεσής τους με κάρτα ήχου ή ηχεία οδήγησαν στην συγκριτική μελέτη που έγινε με παράλληλη χρήση και των δύο, με το αποτέλεσμα (που περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω) να αποδεικνύει ότι οι αποκλίσεις στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των δυο είναι μικρές.

1.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροφώνου Behringer ECM8000 measurement microphone - condenser (15-48V)

Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων:

Jack: 1/4 inch (6.35mm) Stereo TRSS endpin jack

Material: Copper and pizo electron

Impedance: High ohmic

Cable Length: Approx. 40cm/ 15.75inch

Weight: 30g

1.2. Πειραματική διαδικασία

Η σύγκριση των δυο σημάτων που προέρχονται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και από το μικρόφωνο καταγραφής βασίστηκε στην εξαγωγή και σύγκριση ετερόκλητων ηχητικών παραμέτρων στο χρονικό, φασματικό και σαφματικό πεδίο μέσω του εργαλείου MIRtoolbox στο περιβάλλον MATLAB[2]. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν τα χρονικά χαρακτηριστικά που αφορούν τον αριθμό των κορυφών των σημάτων (npeaks), την ενεργό τιμή (rms), τον αριθμό μηδενισμών του σήματος (zerocross), την εντροπία, καθώς και την ομαλότητα του σήματος (irregularity) [5]-[8]. Στο πεδίο της συχνότητας εξήχθησαν οι φασματικοί

παράμετροι των συχνοτήτων που περιλαμβάνουν τα ενεργειακά κατώφλια 20%, 50%, 80%, 90%, 99% της συνολικής ενέργειας του σήματος (rolloff(20%), rolloff(50%), rolloff(80%), rolloff(90%), rolloff(99%)), ενώ ταυτόχρονα καταγράφηκαν τα ποσοστά ενέργειας του σήματος που περιλαμβάνονται μέχρι τις συχνότητες 500Hz, 1000Hz, 1500Hz, 2000Hz, 3000Hz, 4000Hz και 8000Hz (brightness(500Hz), brightness(1000Hz), brightness(1500Hz), brightness(2000Hz), brightness(3000Hz), brightness(4000Hz), brightness(8000Hz)) [1]-[4]. Παράλληλα, προσδιορίστηκαν οι φασματικές στατιστικές ιδιότητες του μέσου όρου (sp_centroid), διακύμανσης (sp_spread), ασυμμετρίας (sp_skewness), κύρτωσης (sp_kurtosis) και της αναλογίας γεωμετρικού προς αριθμητικό μέσο όρο (sp_flatness) ως ένδειξη της φασματικής μορφής. Τέλος, εξήχθησαν οι φασματικοί συντελεστές «ανοιγμένου» στην κλίμακα Mel (mfcc1...13), λόγω της ιδιαίτερης σημασίας που έχουν στα θέματα αντίληψης της ανθρώπινης ακοής. Οι παραπάνω 35 ηχητικές ιδιότητες περιγράφονται με τις αντίστοιχες ονομασίες στον Πίνακα 1.1.

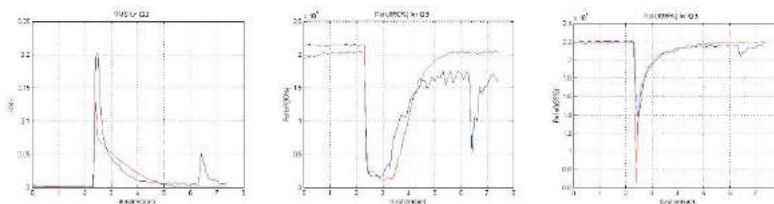
Πίνακας 1.1 Ηχητικά χαρακτηριστικά που εξήχθησαν

Χρονικά χαρακτηριστικά	Φασματικά Χαρακτηριστικά	Σαφματικά χαρακτηριστικά
npeaks	rolloff(20%,50%,80%,90%,99%)	mfcc1...13
rms	brightness(500Hz,1000Hz,1500Hz,2000Hz,3000Hz,4000Hz,8000Hz)	
zerocross		
entropy	sp_centroid, sp_spread	
irregularity	sp_skewness, sp_kurtosis, sp_flatness	

Στις παρακάτω Εικόνες 1-9 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά της ενεργού τιμής rms καθώς και των συχνοτήτων rolloff(90%) και rolloff(99%) της φασματικής απόκρισης τριών νοτών (G3 – 196 Hz - σολ, C4 – 261.4 Hz or Middle C). Με μπλε χρώμα συμβολίζονται οι τιμές των ηχητικών δεδομένων που προέρχονται από το μικρόφωνο καταγραφής και με κόκκινο το ηχητικό σήμα από την κάμα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

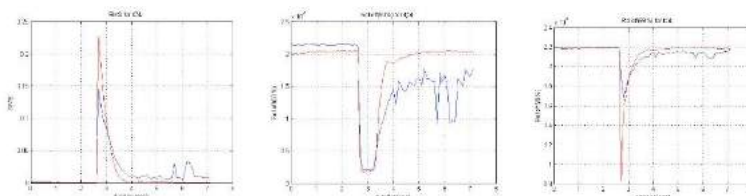
Εικόνα 1.

- i) Ενεργός τιμή rms των σημάτων για την G3
- ii) Συχνότητα rolloff(90%) των σημάτων για την G3
- iii) Συχνότητα rolloff(99%) των σημάτων για την G3



Εικόνα 2.

- i) Ενεργός τιμή rms των σημάτων για την C4
- ii) Συχνότητα rolloff(90%) των σημάτων για την C4
- iii) Συχνότητα rolloff(99%) των σημάτων για την C4



Παράλληλα ο Πίνακας 2 απεικονίζει την ποσοστιαία μεταβολή των εξαγόμενων χαρακτηριστικών, από τον οποίο προκύπτει επίσης πως τα δυο σήματα δεν διαφέρουν σημαντικά, γεγονός που προσδίδει αξιοπιστία στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

Πίνακας 1.2 Ποσοστιαίες μεταβολές των χαρακτηριστικών των ηχητικών σημάτων

Features	%Diff	Features	%Diff	Features	%Diff
sp_spread	0,65	mfcc1	0,037	rms	0,466
entropy	1,403	rolloff(99%)	1,483	entropy	6,68
rolloff(99%)	3,005	mfcc2	1,889	brightness(2000Hz)	7,914
mfcc1	4,435	rolloff(20%)	7,247	irregularity	8,986
brightness(1000Hz)	7,109	mfcc7	8,758	brightness(1000Hz)	9,174
rolloff(50%)	8,969	entropy	10,06	brightness(1500Hz)	10,06
brightness(1500Hz)	9,88	irregularity	11,54	mfcc1	11,2
sp_centroid	9,906	mfcc13	11,55	rolloff(99%)	12,46
rolloff(80%)	9,94	mfcc10	18,34	rolloff(20%)	20,37
sp_skewness	10,81	sp_spread	18,97	brightness(500Hz)	22,67

2. Συμπεράσματα

Τα τελικά στοιχεία των μετρήσεων αποδεικνύουν ότι τα ποιοτικά αποτελέσματα των δυο μεθόδων καταγραφής και αναπαραγωγής του ήχου στην περίπτωση της ανακατασκευής της αρχαίας ελληνικής Χέλως, δεν διαφέρουν σημαντικά, με την λύση, ωστόσο, των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων να είναι ευκολότερα προσαρμόσιμη (και πιο οικονομική) τόσο από επαγγελματίες μουσικούς όσο και από ερασιτέχνες. Εν τέλει, υπάρχει πληθώρα άλλων τύπων αρχαίας λύρας όπου ο ήχος αναπαράγεται με τρόπο αντίστοιχο με αυτή του πειράματος (Βάρβιτος) ενώ και άλλες όπου η παρουσία του ξύλου ως υλικό τόσο στους βραχίονες όσο και και στο καπάκι του

ηγείου (Φόρμιγξ, Κιθαρίς) διαφοροποιεί τα τελικά ηχητικά αποτελέσματα και χρήζουν περαιτέρω μελέτης και πειραμάτων.

3. Αναφορές

- [1] N. Koumartzis, D. Tzetzis, P. Kyratsis & R.G. Kotsakis «A New Music Instrument from Ancient Times: Modern Reconstruction of the Greek Lyre of Hermes using 3D Laser Scanning Advanced Computer Aided Design and Audio Analysis», *Journal of New Music Research*, 44:4, 324-346 (2015)
- [2] Efthimios Bakarezos, Vasilios Vathis, Spyros Brezas, Yannis Orphanos and Nektarios A. Papadogiannis «Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre», *Applied Acoustics*, Issue 73 478-483 (2012)
- [3] Chih-Ming Ho and Nagy S. Nosseir «Dynamics of an impinging jet. Part 1. The feedback phenomenon», *Journal of Fluid Mechanics*, 105, pp 119-142 (1981)
- [4] Magella Bédard, Alain Berry «Development of a directivity-controlled piezoelectric transducer for sound reproduction», *Journal of Sound and Vibration*, Volume 311, Issues 3–5, 8 April 2008, Pages 1271–1285 (2007).
- [5] Lartillot, O., and Toiviainen, P., «Mir in matlab (ii): A toolbox for musical feature extraction from audio», in *Proceedings of the 8th International Conference on Music Information Retrieval*, Vienna, Austria, Sept. 23-27, (2007)
- [6] Kotsakis, R., Kalliris, G., and Dimoulas, C., “Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification”, *Speech Communication*, vol. 54, no. 6, pp. 743-762, 2012
- [7] Kotsakis, R. G., Dimoulas, C. A., and Kalliris, G. M., “Contribution of Stereo Information to Feature-Based Pattern Classification for Audio Semantic Analysis”, in *Proceedings of the Seventh International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization*, Luxembourg, Dec. 3-4, 2012.
- [8] Kotsakis, R., Kalliris, G., and Dimoulas, C., “Classification Techniques of Audio Events in Radio Productions and the Exploitation of Audio Properties”, in *Proceedings of the 6th National Acoustics Conference*, Corfu, Greece, Oct. 8-10, (2012)

Συνεδρία Α6: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (II)**Ηχομόνωση και Εσωτερική Διαρρύθμιση της
Νεοελληνικής Κατοικίας : οι δεκαετίες 50 - 80**

Ρίκα Δελγιαννίδου, δρ. Αρχιτέκτων Μηχανικός, διδάσκουσα ΠΔ407/80,

rika_del5@yahoo.gr

Νίκος Μπάρκας, καθηγητής, nbarkas@arch.duth.gr, <http://nikosbarkas.gr/>

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση διερευνά την εσωτερική διαρρύθμιση των αστικών κατοικιών της χρονικής περιόδου '50 - '80, μέσα στο ευρύ πλαίσιο των διαχρονικών οικονομικών & κοινωνικών εξελίξεων, του νομοθετικού πλαισίου και των αρχιτεκτονικών αντιλήψεων. Το δείγμα της έρευνας αφορά 13 χαρακτηριστικά παραδείγματα κατοικιών που αξιολογούνται σύμφωνα με : τη μεθοδολογία των κυρτών χαρτών του space syntax, λειτουργικές παραμέτρους που αφορούν τη γειτνίαση επιμέρους χώρων και οικοδομικών διατάξεων, καθώς και την υπολογισμένη ακουστική άνεση σε ποικίλες περιπτώσεις γειτονικών οικιακών χρήσεων. Στόχος της διαπραγμάτευσης είναι να αξιολογήσει ποιοτικά την εσωτερική διαρρύθμιση των κατοικιών και παράλληλα να αποτιμήσει τεχνολογικά τις εφαρμοζόμενες οικοδομικές επιλύσεις, με γνώμονα τα διεθνή κριτήρια εσωτερικής ησυχίας (NC) και τις απαιτήσεις του Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12).

**Sound isolation and layout in the modern Greek
residences: the decades 50 - 80****ABSTRACT**

This paper studies the interior layouts of the residential buildings of the 1950 - 1980 time period, within the broader framework of the economic and social developments occurring throughout this period, the legislative framework and the architectural concepts. The sample includes 13 particular residential layouts that are evaluated in accordance with: the methodology of convex maps of space syntax, structural parameters relating to the proximity of individual spaces and building layouts, as well as the measured acoustic comfort in various occasions of neighboring household uses. The article aims to the qualitative evaluation of individual functional layouts and in the technological assessment of building requirements, in accordance with the international criteria of internal quietness (NC) and the requirements of the building regulations (Article 12).

Εισαγωγή

Ο οικοδομικός τομέας, κατά την περίοδο 1950-1980, αποτέλεσε βασική συνιστώσα της ελληνικής οικονομίας ως ποσοστό του συνόλου των επενδύσεων σε πάγιο κεφάλαιο. Το τέλος του εμφυλίου σηματοδότησε μια ευρεία εσωτερική μετανάστευση που σε συνδυασμό με τα κατεστραμμένα κτήρια και την απουσία διαθέσιμων κεφαλαίων, όξυνε το πρόβλημα της στέγης στα μεγάλα αστικά κέντρα. Η ανέγερση ψηλών κτηρίων, κατέστη επιτακτική ανάγκη και εξελίχθηκε σε επιχειρηματική δραστηριότητα των μικροαστικών στρωμάτων (σχηματισμός της νέας τάξης των εργολάβων οικοδομών). Το κράτος, περιορίζοντας την τραπεζική χρηματοδότηση της οικοδομής, ενύνησε το σύστημα της αντιπαροχής και απώλεσε την κατασκευή από οποιαδήποτε φορολογική επιβάρυνση επί της γης, ενώ αντίθετα φορολογούσε τη μεταβίβαση των μεταχειρισμένων ακινήτων. Με στόχο την αύξηση της κερδοφορίας του κατασκευαστικού κεφαλαίου θεσπίστηκε η κάθετη ιδιοκτησία (για επιμερισμό του κόστους κατασκευής σε πολλούς ιδιοκτήτες), ενώ πρόσθετα ο κατασκευαστής είχε τη δυνατότητα της πώλησης διαμερισμάτων πριν την αποπεράτωση, συνεπώς μπορούσε να επιχειρεί με ελάχιστα κεφάλαια, μικρής δυναμικότητας, αλλά βραχείας απόδοσης. [1]

Οι πολυκατοικίες της περιόδου χτίζονται σύμφωνα με τον κατά σειρά δεύτερο Γενικό Οικοδομικό Κανονισμό (ΓΟΚ '55) που αντικατέστησε τον ΓΟΚ '29 και τις μεταγενέστερες συμπληρώσεις / τροποποιήσεις του. Ο ΓΟΚ '55 διαδραμάτισε κρίσιμο ρόλο στην εξέλιξη της μορφής των πόλεων, θεσπίζοντας τα διάφορα συστήματα δόμησης. Σε ότι αφορά τις οικοδομικές ανέσεις, ο ΓΟΚ '55 αναφέρεται στο φωτισμό - αερισμό των διαμερισμάτων και προδιαγράφει τις εγκαταστάσεις υγιεινής. Επίσης διαπραγματεύεται θέματα που αφορούν τη θερμομόνωση και την υγρασιμότητα των οικοδομών, ενώ για την ηχομόνωση θεσπίζονται εδάφια που αφορούν τα ειδικά κτήρια (ξενοδοχεία, νοσοκομεία κλπ.), χωρίς συγκεκριμένες προδιαγραφές για τα υπόλοιπα. Ο ΓΟΚ '73 επαναπροσδιόρισε και συμπλήρωσε τον ΓΟΚ '55. Για πρώτη φορά καταγράφονται σε 5 άρθρα (113 ως 117) προδιαγραφές για την ηχομόνωση όλων κτηρίων και αποδεκτές τιμές ηχομονωτικής ικανότητας, με διάκριση οριζόντιων-κατακόρυφων διαχωριστικών και αερόφερτων θορύβων – κρούσεων. [2], [3]

Στα τέλη της δεκαετίας του '50 οι αστικές πολυκατοικίες των μεγάλων αστικών κέντρων (που σπανίως σχεδιάζονται από αρχιτέκτονες) προσδιορίζονται από νέα πρότυπα, κακέκτυπα εκείνων της πρώιμης μεταπολεμικής περιόδου, διαμορφώνοντας τις προτιμήσεις του μεγάλου κοινού – αγοραστή. Κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι οι απλές, συμμετρικές συνθέσεις, με μικρές αρχιτεκτονικές προεξοχές και επιμήκεις εξώστες. Η μεγάλη ζήτηση διαμερισμάτων (παρά την ολοένα αυξανόμενη παραγωγή) απέδιδε μικρή σημασία στην αρχιτεκτονική σύνθεση και στην οικοδομική ποιότητα : οτιδήποτε χτιζόταν γινόταν άμεσα ανάρπαστο. Μετά το '60, η λεγόμενη «Υψηλή Αρχιτεκτονική» στην Ελλάδα θα κινηθεί ανάμεσα στις εξελιγμένες παραλλαγές του «γυάλινου κρυστάλλου» του Mies van den Roche και τις σχηματοποιημένες εκδοχές του κλασικισμού : ένα συντηρητικό ρεύμα προσκολλήθηκε στη στασιμότητα της παράδοσης, ένα άλλο παραδοσιακό ρεύμα επιδίωξε το συσχετισμό παλαιού / νέου και τέλος, ένα τρίτο, πρωτοποριακό ρεύμα προσπάθησε να πορευτεί πειραματιζόμενο με νεωτερισμούς και καινοτομίες [4], [5].

1. Η μεθοδολογία της έρευνας

Η διαρρύθμιση και οι εσωτερικές οικοδομικές διατάξεις σε διαμερίσματα αστικών πολυκατοικιών των δεκαετιών 50-70 αξιολογήθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά.

Η ποιοτική διερεύνηση έγινε με δύο τρόπους :

-λειτουργικά, με διαχωρισμό των διαμερισμάτων σε ενότητες, ανάλογα με τη χρήση των επιμέρους χώρων

-εποπτικά, με αναπαράσταση των κατοικιών του δείγματος σε διαγράμματα κυρτού χάρτη, σύμφωνα με τη θεωρία του space syntax [6]

Ποσοτικά, η ακουστική άνεση των κατοικιών του δείγματος αξιολογήθηκε μέσω της αποτίμησης της προσφερόμενης ηχομονωτικής ικανότητας των εφαρμοσμένων οικοδομικών διατάξεων και του υπολογισμού της αναμενόμενης εσωτερικής ησυχίας, σύμφωνα με τα δεδομένα του ισχύοντος Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12).

Για τις ανάγκες των υπολογισμών, συγκροτήθηκε ένας κατάλογος 117 πιθανών θορύβων - πηγών. Εξ αυτών :

-34 εσωτερικοί θόρυβοι ήταν καταγεγραμμένοι ήδη από την προπολεμική περίοδο (από 50 ως 70dB, με μέγιστο 92dB από κλασικά μουσικά όργανα),

-49 εσωτερικοί θόρυβοι, εμφανίστηκαν την χρονική περίοδο του δείγματος (από 70 ως 90dB, με μέγιστο 103dB από στερεοφωνικά μηχανήματα),

-34 εσωτερικοί και εξωτερικοί θόρυβοι αφορούν τη σύγχρονη εποχή (από 80 ως 100dB). [2]

2. Ανάλυση των ευρημάτων της έρευνας

Για την οικονομία της δημοσίευσης σχολιάζουμε αναλυτικά ως χαρακτηριστικό παράδειγμα του δείγματος της έρευνας, διαμέρισμα στην οδό Νάρκισσου 41, στο Ψυχικό (1970), των αρχιτεκτόνων Ζενέτου και Γεωργακόπουλου. Όπως φαίνεται στην χρωματικά επεξεργασμένη κάτοψη (εικ. 3.1) το επιλεγμένο διαμέρισμα του τυπικού ορόφου χωρίζεται σε τέσσερις (4) λειτουργικές ενότητες :

-ενότητα Α: χώροι υποδοχής (κόκκινο χρώμα), χώλ εισόδου,

-ενότητα Β: χώροι κύριας χρήσης – διημέρευσης (μπλε χρώμα), σαλόνι - τραπεζαρία και κουζίνα,

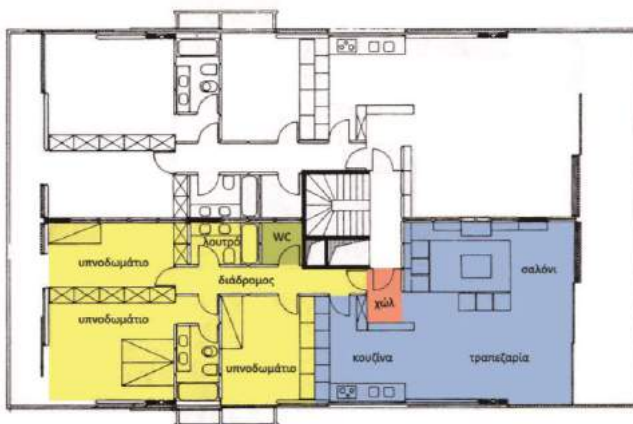
-ενότητα Γ: χώροι ύπνου - ανάπαυσης (κίτρινο χρώμα), τρία υπνοδωμάτια και λουτρό - WC, με διάδρομο πρόσβασης,

-ενότητα Δ: βοηθητικοί χώροι (πράσινο χρώμα), αποθήκη.

Όπως αναλύθηκε σε παλαιότερη δημοσίευση, τα διαμερίσματα της προπολεμικής περιόδου διαπνέονται από κοινές αντιλήψεις και τυπικά χαρακτηριστικά διαρρύθμισης : σαφείς λειτουργικές ενότητες, ομαδοποίηση των επιμέρους χώρων κάθε ενότητας, δίαυλοι επικοινωνίας και προσβάσεις διαμέσου κόμβων. [6]

Στο παράδειγμα της εικόνας 3.1. που ανήκει στην ώριμη περίοδο του δείγματος (1970), παρά τη διατήρηση ορισμένων βασικών ενότητων, η διαρρύθμιση επιθυμεί να διαφοροποιηθεί από τα παραδείγματα των προηγούμενων δεκαετιών, με μια συνειδητή προσπάθεια εξάλειψης των χώρων προετοιμασίας φαγητού και την ένταξή τους στους χώρους κύριας χρήσης του διαμερίσματος. Αναλυτικά παρατηρούμε :

-οι ενδιάμεσοι χώροι ελαχιστοποιούνται, η μοναδική πρόσβαση στο διαμέρισμα εξυπηρετείται διαμέσου μικρού προθαλάμου που οδηγεί ευθέως στη σαλο-τραπεζαρία (χωρίς την παρεμβολή κανενός κουφώματος),
 -σχηματίζεται μια σύνθετη σαλο-κουζίνα, καθώς η κουζίνα μεταφέρεται δίπλα στην ενιαία σαλο-τραπεζαρία (με ενδιάμεσο, ανοικτό ελαφρύ διαχωριστικό),
 -η προσπέλαση στα υπνοδωμάτια, εξυπηρετείται μέσω κλειστού διαδρόμου (που εξυπηρετεί ταυτόχρονα την κουζίνα, την αποθήκη και το WC),
 -τα υπνοδωμάτια παραμένουν απομονωμένα από τους χώρους κύριας χρήσης, αλλά ένα εξ αυτών αποκτά κοινή μεσοτοιχία με την κουζίνα,
 -η επιφάνεια της κάτοψης είναι εμφανώς μικρότερη (συγκριτικά με τις παλαιότερες), οι διαστάσεις των ανοιγμάτων στους χώρους διημέρευσης αυξάνουν ενώ οι διατομές των εσωτερικών διαχωριστικών ελαττώνονται.



Εικόνα 3.1 Κάτοψη τυπικού ορόφου πολυκατοικίας στην οδό Ναρκίσσου 41, στο Ψυχικό, Αθήνα, [Υπόβαθρο : «Αρχιτεκτονικά Θέματα», τεύχος 1970, σελ. 35].

Τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής διαρρύθμισης στο σύνολο των 13 διαμερισμάτων του δείγματος φαίνονται σχηματικά στον Πίνακα 3.1.

Οι αριθμημένες γραμμές του Πίνακα αντιστοιχούν στα εξής διαμερίσματα :

1. **1951**, Ν. Βαλσαμάκης, Σεμιτέλου 5, Αθήνα
2. **1953**, Κ. Φιλίππου, Τσιμισκή, Θεσσαλονίκη
3. **1955**, Π. Μπακατσέλος, Εγνατία, Θεσσαλονίκη
4. **1955**, Κ. Φιλίππου, Βασ. Όλγας 135, Θεσσαλονίκη
5. **1955**, Ν. Βαλσαμάκης, Βασ. Σοφίας 129, Αθήνα
6. **1961**, Κ. Δεκαβάλλας, Ηροδότου 7, Αθήνα
7. **1963**, Α. Λίγδας, Βασ. Κωνσταντίνου 21, Θεσσαλονίκη
8. **1964**, Δ. Δημητριάδης, Μ. Αλεξάνδρου 95, Θεσσαλονίκη
9. **1964**, Β. Περγάντης, Τσιμισκή 73, Θεσσαλονίκη
10. **1970**, Α. Λαγόπουλος, Εγνατία, Θεσσαλονίκη
11. **1970**, Ζενέτος, Τ. Γεωργακόπουλος, Ναρκίσσου 41, Ψυχικό, Αθήνα
12. **1971**, Ν. Βαλσαμάκης, Οδός Αλωπεκής, Αθήνα
13. **1979**, Ιωάννης Βικέλας, Δρυάδων και Δαβάκη, Π. Ψυχικό, Αθήνα

Οι στήλες του Πίνακα αντιστοιχούν στις παραμέτρους ελέγχου του δείγματος (με τελεία σημειώνεται η θετική εφαρμογή):

Α. προθάλαμος

B. χωλ

Γ. διαχωρισμός χώρων με εσώθυρες

Δ διαχωρισμός τραπεζαρίας από σαλόνι ή Ε. ενιαία σαλο-τραπεζαρία

ΣΤ. γεινίαση της κουζίνας με σαλόνι / τραπεζαρία

Ζ. απομόνωση της κουζίνας και των βοηθητικών χώρων

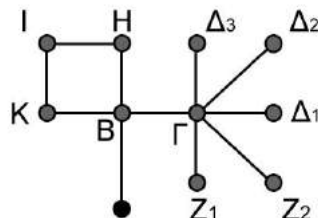
Η. κοινή μεσοτοιχία υπνοδωματίου με κύριο χώρο διημέρευσης ή κουζίνα.

Πίνακας 3.1 Συνοπτική απεικόνιση της εφαρμογής των κριτηρίων ανάλυσης στο δείγμα της περιόδου 1950 – 1970 (13 διαμερίσματα)

ΔΕΚΑΕΤΙΕΣ 1950-1970	A	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H
1	•	•	•		•	•		
2	•	•	•		•		•	•
3	•	•	•		•		•	•
4			•		•		•	•
5	•	•	•	•		•		
6	•	•	•		•		•	•
7	•	•	•	•		•		
8	•	•	•		•		•	•
9	•	•	•		•		•	•
10		•			•		•	•
11	•	•	•		•	•		•
12	•	•	•		•	•		•
13		•	•		•	•		•

Όπως αποκαλύπτει ο Πίνακας 3.1. είναι εμφανής η τάση συρρίκνωσης ορισμένων ενοτήτων κι ανάμιξης των επιμέρους χώρων. Πρόκειται για μια πορεία που στοχεύει στη ρευστότητα μεταξύ των ενοτήτων, αρχικά ως προσπάθεια διασύνδεσης και τελικά ως ενοποίηση της κουζίνας με τους κύριους χώρους διημέρευσης. Ιστορικά, θα αποτελέσει μια κρίσιμη καινοτομία και θα σφραγίσει ανεξίτηλα τις αρχιτεκτονικές αντιλήψεις της επόμενης (και τρέχουσας) οικοδομικής περιόδου.

Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνεται με την εφαρμογή ενός γραφήματος space syntax, στην κάτοψη του παραδείγματος. Οι επιμέρους χώροι του διαμερίσματος συμβολίζονται με γράμματα (και με αύξουσα αρίθμηση) ως : B χωλ - Γ διάδρομος - Δ υπνοδωμάτιο (Δ1, Δ2, Δ3) - Ζ βοηθητικοί χώροι (Ζ1, Ζ2) - Ι τραπεζαρία - Κ κουζίνα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2, το παράδειγμα απεικονίζει μια κάτοψη τυπικά διαρθρωμένη πού διαθέτει εμφανώς τις λειτουργικές διακρίσεις ορισμένων ενοτήτων (όπως συμβαίνει και στις κατόψεις της προπολεμικής περιόδου), αλλά μέσω, συγκριτικά περιορισμένων - απλούστερων συναρτήσεων.

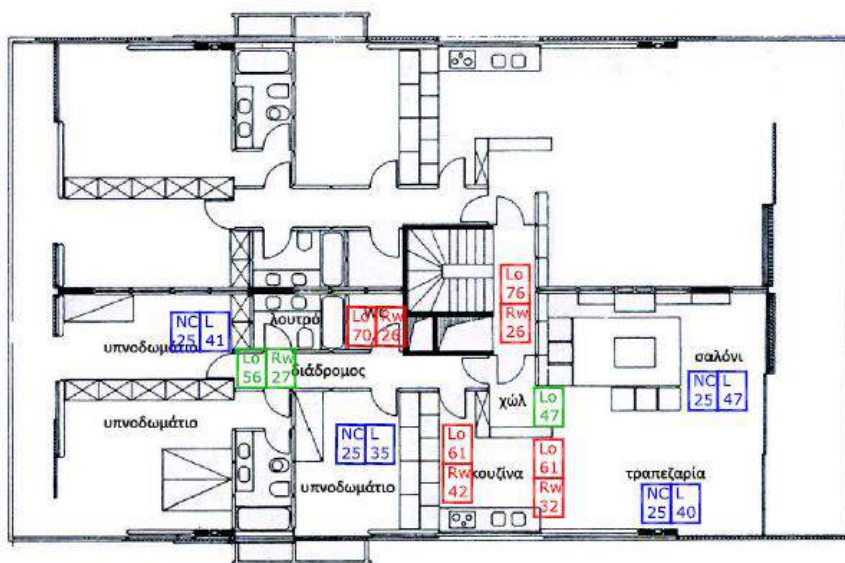


Εικόνα 3.2 Γράφημα ανάλυσης με τη μεθοδολογία *space syntax* διαμέρισμα οδού Ναρκίσσου 41, Αθήνα

Σε επίπεδο ποσοτικής αξιολόγησης, είναι γνωστό πως η ακουστική άνεση στο εσωτερικό ενός χώρου αποτελεί συνάρτηση 3 βασικών παραμέτρων : της εσωτ. ησυχίας, της ηχομονωτικής ικανότητας του κελύφους και των εσωτ. διαχωριστικών, των αναμενόμενων πηγών θορύβου. Στην Εικόνα 3.3, στο διαμέρισμα της οδού Ναρκίσσου στο Ψυχικό, των Ζενέτου – Γεωργακόπουλου δίδονται σχηματικά :

- με κόκκινο χρώμα οι πηγές όχλησης,
- με πράσινο χρώμα η απομείωση στους ενδιάμεσους χώρους
- με μπλε χρώμα οι προστατευόμενοι χώροι

όπου σχετικά συμβολίζονται με L η ησυχία στην προστατευόμενη περιοχή, Lo ο θόρυβος στη θέση της πηγής (ή ότι απομένει σε ενδιάμεσο χώρο) και Rw η προσφερόμενη ηχομόνωση κάθε διαχωριστικού.



Εικόνα 3.3 Σχηματική απεικόνιση των ακουστικών δεδομένων στο παράδειγμα της οδού Ναρκίσσου 41, στο Ψυχικό

Για την αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης πραγματοποιήθηκαν 3 επιμέρους έλεγχοι. Κατά τον 1ο έλεγχο (εσωτερική ησυχία στη σαλο-τραπέζα) ελήφθη υπόψη η ηχομονωτική ικανότητα μιας εξώπορτας (βαρύ φύλλο, αλλά χωρίς

περιμετρική αερο-στεγανότητα) και η καταστολή της όχλησης (με ηχοαπορρόφηση) στον ανοικτό προθάλαμο, σε μια περίπτωση σύνθετης όχλησης (που ορίστηκε ως η μέγιστη συχνοτική περιβάλλουσα από έντονη συζήτηση στο κλιμακοστάσιο και λειτουργία του ασανσέρ, σφαιρικής τιμής 76dB[A]). Όπως αποδεικνύεται, ο σύνθετος δείκτης ηχομονωτικής ικανότητας της εξωτερικής τοιχοποιίας του διαμερίσματος (ως προς το κλιμακοστάσιο) είναι περίπου 26dB[A] (εξαιτίας της μεγάλης αναλογίας ενός κουφώματος χαμηλής απόδοσης) και η συνολική πτώση της όχλησης στο χωλ είναι περίπου 29dB[A]. Δηλαδή, η αναμενόμενη, υπολογισμένη όχληση στη σαλο-τραπεζαρία υπολείπεται σημαντικά (κατά περίπου 12dB[A]) των απαιτήσεων του κριτηρίου ησυχίας NC-25, εμφανίζοντας έντονες υπερβάσεις (5 ως 15dB περίπου) στις μέσες – υψηλές συχνότητες.

Κατά τον 2ο έλεγχο αξιολογείται η ακουστική άνεση του υπνοδωματίου, σε μια περίπτωση σύνθετης όχλησης από το απέναντι, κοινόχρηστο WC (που ορίστηκε ως η μέγιστη συχνοτική περιβάλλουσα από καζανάκι που γεμίζει, λειτουργία ηλεκτρικής ξυριστικής μηχανής και καταιονισμό νερού σε ντουζιέρα, σφαιρικής τιμής 70dB[A]). Όπως αποδεικνύεται, ο σύνθετος δείκτης ηχομονωτικής ικανότητας του διαχωριστικού WC προς το διάδρομο (εσώθυρα από ελαφρό φύλλο, χωρίς περιμετρική αερο-στεγανότητα και δρομική μεσοτοιχία με επικολημένα πλακίδια) είναι περίπου 26B[A] (εξαιτίας της χαμηλής απόδοσης του κουφώματος) και η πτώση της όχλησης στο διάδρομο είναι περίπου 14dB[A]. Με το εσωτερικό διαχωριστικό του διαδρόμου προς το υπνοδωμάτιο να έχει έναν παρόμοιο σύνθετο δείκτη ηχομονωτικής ικανότητας (περίπου 27dB[A]) και μια παρόμοια πτώση της όχλησης στο υπνοδωμάτιο (περίπου 15dB[A]), η αναμενόμενη, υπολογισμένη όχληση στο υπνοδωμάτιο, υπολείπεται αρκετά (> 6dB[A]) των απαιτήσεων του κριτηρίου ησυχίας NC-25, εμφανίζοντας σημαντικές υπερβάσεις (9 ως 15dB περίπου) στις μέσες - υψηλές συχνότητες.

Τέλος, κατά 3ο έλεγχο, η ακουστική άνεση στην σαλο-τραπεζαρία, σε σχέση με τις δραστηριότητες στην κουζίνα (σύνθετη όχληση που ορίστηκε ως η μέγιστη συχνοτική περιβάλλουσα από θόρυβο απορροφητήρα και πλυντήριο πιάτων, σφαιρικής τιμής 61dB[A]), υποθέτει ένα ελαφρύ διαχωριστικό πέτασμα (επιφανειακού βάρους < 25Kg/m²) χαμηλής ηχομονωτικής ικανότητας (περίπου 32dB[A]). Όπως αποδεικνύεται, η πτώση της όχλησης είναι περίπου 21dB[A], με συνέπεια η αναμενόμενη, υπολογισμένη όχληση στην σαλο-τραπεζαρία να μην καλύπτει τις απαιτήσεις του κριτηρίου ησυχίας NC-25 (υπέρβαση περίπου 5dB[A]), εμφανίζοντας σημαντικές ηχομονωτικές ελλείψεις σε όλο το συχνοτικό φάσμα των οχλήσεων (μέχρι 11dB στις χαμηλές - μέσες συχνότητες). Αντίθετα, κατά τον ίδιο έλεγχο, η ακουστική άνεση στο υπνοδωμάτιο (σε σχέση με τις ίδιες δραστηριότητες στην κουζίνα), χάρη στην τυπική διαχωριστική μεσοτοιχία (δρομική με επικολημένα πλακίδια, ηχομονωτικής ικανότητας περίπου 42dB[A]), καλύπτει το κριτήριο ησυχίας NC-25 (με υπέρβαση στις μέσες συχνότητες περίπου 5dB).

Συνολικά, η σαλο-τραπεζαρία και τα υπνοδωμάτια του επιλεγμένου παραδείγματος της περιόδου '50 - '80 δεν εξασφαλίζουν το κριτήριο ησυχίας NC-25 (με σημαντικές και κρίσιμες συχνοτικές υπερβάσεις) ως προς εξωτερικές (κλιμακοστάσιο) και εσωτερικές οχλήσεις (WC – κουζίνα) από αερόφερτο θόρυβο.

3. Συμπεράσματα

Η διερεύνηση των ακουστικών ανέσεων της περιόδου 1950 -1980 δίδεται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1. Υποθέτοντας πως υπερβάσεις μικρής κλίμακας (μέχρι 6dB[A]) θα μπορούσαν να ισορροπηθούν με απλή προσθήκη ηχομονωτικών ενισχύσεων στα υφιστάμενα διαχωριστικά, δεν είναι δυνατό να αγνοήσουμε ότι υπερβάσεις μεσαίας κλίμακας (μέχρι 12dB[A]) απαιτούν συνδυασμένες επεμβάσεις που σήμερα κρίνονται απλά επώδυνες, αλλά τότε ίσως ήταν και τεχνικά ανέφικτες.

Πίνακας 4.1 Υπερβάσεις του κριτηρίου εσωτερικής ησυχίας NC-25 κατά περίπτωση γειννίαςης

Περιστάσεις γειννίαςης	Υπερβάσεις σε dB[A]
σαλόνι από κλιμακοστάσιο	12
σαλόνι από κουζίνα	5
υπνοδωμάτιο από wc	6,5
υπνοδωμάτιο από κουζίνα	0

Γίνεται λοιπόν φανερό πως, από την περίοδο της έρευνας (την περίοδο της αντιπαροχής), άρχισε να δοκιμάζεται η καθημερινή συνύπαρξη των ενοίκων μιας πολυκατοικίας. Οι συνεχείς οχλήσεις στο εσωτερικό ενός διαμερίσματος από διάφορες πηγές δεν διευκολύνουν τη μελέτη, δεν ευνοούν τη χαλάρωση και δεν επιτρέπουν την ηρεμία και την ανάπαυση στους χώρους ησυχίας των κατοικιών.

Πιστεύοντας ότι, η εξασφάλιση της ηχητικής προστασίας όλων των χώρων καθημερινής διαβίωσης είναι επιτακτική ανάγκη, θεωρούμε ότι η προτεινόμενη ποιοτική και υπολογιστική αξιολόγηση της εσωτερικής διαρρύθμισης και της ηχομονωτικής επάρκειας των εσωτερικών οικοδομικών εφαρμογών δίνει ένα εύχρηστο βοήθημα διαχρονικής αξιολόγησης των κατοικιών, αλλά και καθημερινής εξάσκησης του αρχιτεκτονικού έργου κατά το σχεδιασμό της σύγχρονης κατοικίας.

4. Βιβλιογραφία

[1] Ν. Σ. Αντωνόπουλος, «Ο Μεταπολεμικός Μετασχηματισμός της Ελληνικής Οικονομίας και το Οικιστικό Φαινόμενο, 1950-1980», εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα (1991)

[2] Ρ. Θ. Δεληγιαννίδου, «Προβλήματα Ηχοπροστασίας και Ακουστικής Άνεσης στα Κτίρια της Νέο-ελληνικής Κατοικίας του 20^{ου} αιώνα», διδακτορική διατριβή, Ξάνθη (2015)

[3] Α. Χατζοπούλου, «Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός», έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα (2002)

[3] Γ. Λάββας, «19^{ος}-20^{ος} αιώνας. Σύντομη Ιστορία της Αρχιτεκτονικής», έκδοση University Studio Press, Θεσσαλονίκη (1996)

[4] Δ. Φιλιππίδης, «Νεοελληνική Αρχιτεκτονική», εκδ. Μέλισσα, Αθήνα, (1984)

[5] Ρ. Δεληγιαννίδου – Ν. Μπάρκας, «Ηχομόνωση & Διαρρύθμιση της Νεοελληνικής Κατοικίας : οι δεκαετίες 20 – 30», Πρακτικά 6ου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012, Κέρκυρα (2012)

[6] Bafna, S. «Space Syntax. A Brief Introduction to Its Logic and Analytical Techniques», *Environment and Behavior*, (2003)

**Εκπομπή ενοχλητικών ήχων χαμηλών συχνοτήτων (βοή
δαπέδου, drum sound, dröhnender Boden) από πλωτά
δάπεδα κατά την διάρκεια ξυπόλητου βαδίσματος**

Gottfried Schubert
Σύμβουλος Ακουστικής, Απόλλωνος 22, 15351 Κάντζα Παλλήνης
schubert.athens@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πλωτά δάπεδα εφαρμόζονται για την προστασία των διπλανών χώρων από κτυπογενείς ήχους. Ακόμα και στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται πλωτά δάπεδα σε ειδικά κτίρια και σε κατοικίες υψηλών απαιτήσεων. Κάποια από τα πλωτά δάπεδα έχουν όμως μια πολύ δυσάρεστη ιδιότητα. Τα δάπεδα εκπέμπουν ήχους χαμηλών συχνοτήτων τόσο στον χώρο που βρίσκεται ο περιπατητής όσο και στον διπλανό χώρο. Το φαινόμενο περιορίζεται συνήθως στην περίπτωση του ξυπόλυτου βαδίσματος και δεν εμφανίζεται σε όμοιες κατασκευές κάθε φορά. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται το φαινόμενο για μια κατασκευή στην Ελλάδα και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με ανάλογες περιπτώσεις στην Γερμανία, όπου για λόγους πολυάριθμης καθημερινής εφαρμογής πλωτών δαπέδων υπάρχει και πολύ περισσότερη εμπειρία με το φαινόμενο, χωρίς ωστόσο να υπάρχει μέχρι σήμερα μια σαφής λύση του προβλήματος.

**Disturbing low frequency noise effect (drum sound)
caused by barefoot walking on floating floor
constructions**

ABSTRACT

Floating floor constructions are generally applied to rooms in order to protect adjacent areas from impact noise. Even in Greece, we do come across floating floor constructions, mostly in buildings and residences which have to comply with concrete and strict acoustic specifications.

Unfortunately, some of the implementations are followed by a very unpleasant acoustic property: A very low frequency sound emission that can be easily heard in both walkers' and adjacent rooms. The "Drum Sound Effect - dröhnender Boden" is usually limited in the case of barefoot walking and does not always appear in identical design applications. The current study describes the phenomenon for a residence construction in Greece and compares the outcome results with those emerged from similar studies in Germany where floating floor construction is a common practice. However, no evident solution has emerged so far to tackle the described low frequency noise annoyance.

Εισαγωγή

Πλωτά δάπεδα εφαρμόζονται στην σύγχρονη οικοδομή για την προστασία των κατοίκων από κτυπογενείς ήχους. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα δάπεδα εκπέμπουν ενοχλητικούς ήχους χαμηλών συχνοτήτων ("βοή του δαπέδου"), κυρίως όταν σε αυτά πεπατάνε ξυπόλητα. Η ακόλουθη εργασία παρουσιάζει δυο περιπτώσεις σχεδόν παρομοίων κατασκευών με ενδοδαπέδια θέρμανση σε ελαστικό υπόστρωμα όπου στο ένα δάπεδο παρουσιάστηκε το φαινόμενο της "βοής του δαπέδου" και στο άλλο δεν παρατηρήθηκε αυτό το φαινόμενο.

Δάπεδα ενδοδαπέδιας θέρμανσης σε ελαστικό μονωτικό υλικό ως υπόστρωμα, λειτουργούν όπως τα συνηθισμένα πλωτά δάπεδα. Η λειτουργία του πλωτού δαπέδου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Η μάζα της πλωτής πλάκας εδράζεται σε ένα ελαστικό υπόστρωμα. Η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής εξαρτάται από την επιφανειακή μάζα της πλάκας του δαπέδου και την ελαστικότητα του υποστρώματος (δυναμική ακαμψία του μονωτικού υλικού s' [MN/m³]). Για ένα ελαστικό υλικό με δυναμική ακαμψία $s' = 20$ MN/m³, και επιφανειακή μάζα της πλωτής πλάκας $m' = 100$ kg/m², και της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος $m' = 480$ kg/m², η ιδιοσυχνότητα είναι $f_0 = 78$ Hz. Η ηχομόνωση κτυπογενούς ήχου του δαπέδου αρχίζει για συχνότητες $f > 1.41 \cdot f_0 = 110$ Hz. Για χαμηλότερες συχνότητες υπάρχει μια ενίσχυση της μετάδοσης του ήχου. Γενικά έχουμε μια ενίσχυση του κτυπογενούς ήχου για όλα τα πλωτά δάπεδα στην περιοχή της ιδιοσυχνότητας και έτσι έπρεπε να «βοούν» όλα τα πλωτά δάπεδα όταν διεγείρονται από βαρύ βάδισμα με το ξυπόλυτο πόδι. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στην πράξη.

1. Μετρήσεις της κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου σε ένα ιδιωτικό σπίτι και σε ένα σχολείο

Η γεωμετρία του δαπέδου 1, σε ιδιωτικό σπίτι, περιγράφεται ως εξής:

Από επάνω:

Ξύλινο τελικό δάπεδο με πάχος 19mm

Κόλλα

Θερμομονωτήρ με πάχος 70mm

Μεμβράνη

Ελαστικό υλικό EPS T/045 30mm με δυναμική ακαμψία $s' = 20$ MN/m³

Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος 200mm

Κενό 200mm

Ψευδοροφή γυψοσανίδας 12.5mm

Η γεωμετρία του δαπέδου 2, σε σχολείο, περιγράφεται ως εξής:

Θερμομονωτήρ με πάχος 70mm

Μεμβράνη

Ελαστικό υλικό EPS T/045 30mm με δυναμική ακαμψία $s' = 20$ MN/m³

Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος 180mm

Το τελικό δάπεδο του σχολείου θα είναι linoleum και η ψευδοροφή θα είναι με πλάκες ορυκτών ινών. Το τελικό δάπεδο και η ψευδοροφή δεν είχαν τοποθετηθεί κατά την διάρκεια της μέτρησης.

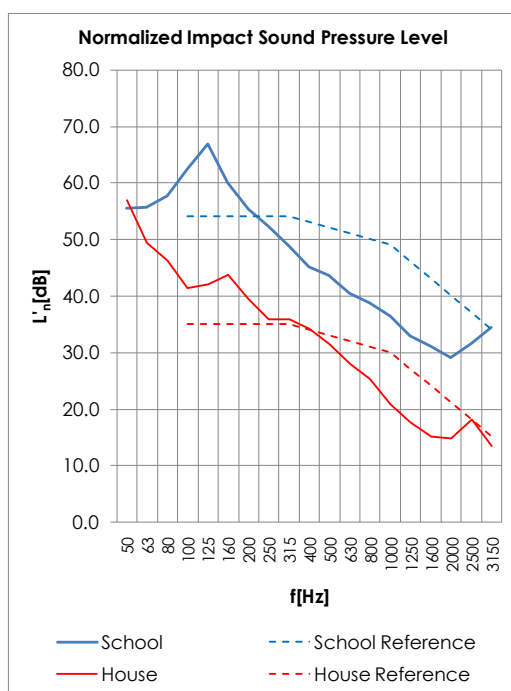
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στο Γράφημα 1. Στο ιδιωτικό σπίτι (δάπεδο 1) παρουσιάστηκε το φαινόμενο της "βοής" ενώ στο σχολείο (δάπεδο 2) δεν παρουσιάστηκε. Η σταθμισμένη κανονικοποιημένη ηχητική πίεση κτυπογενούς ήχου των δαπέδων είναι:

Δάπεδο 1, ιδιωτικό σπίτι	$L'_{n,w} = 33\text{dB}$, $C_{1,50-2500} = 10\text{dB}$
Δάπεδο 2, σχολεία	$L'_{n,w} = 52\text{dB}$, $C_{1,50-2500} = 3\text{dB}$

Η τιμή της σταθμισμένης κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου $L'_{n,w} = 33\text{dB}$ είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη για το δάπεδο 1.

Η σχετικά υψηλή τιμή της σταθμισμένης κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου $L'_{n,w} = 52\text{dB}$ του δαπέδου 2 οφείλεται σε φανερές ηχογέφυρες στην περίμετρο του δαπέδου, στα τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος. Η μέγιστη τιμή της ηχοστάθμης στα 125Hz δημιουργεί υποψίες ότι το ελαστικό υλικό που τοποθετήθηκε είχε μια υψηλότερη δυναμική ακαμψία από την δηλωμένη τιμή.

Γράφημα 1: Μέτρηση της κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου για το δάπεδο 1 και το δάπεδο 2



Η σταθμισμένη κανονικοποιημένη ηχητική πίεση κτυπογενούς ήχου δεν μπορεί να δίνει πληροφορίες σχετικά με την εκπομπή χαμηλών συχνοτήτων, γιατί η

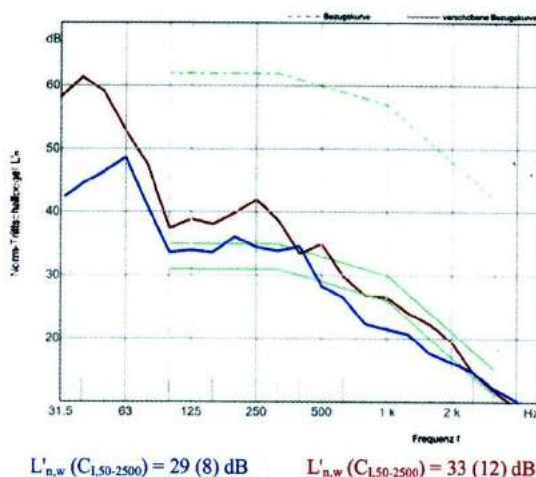
αξιολόγηση του φάσματος δεν λαμβάνει υπόψη συχνότητες κάτω από 100Hz. Πληροφορίες για τις χαμηλές συχνότητες και τυπικούς ήχους βαδίσματος περιέχει ο συντελεστής φασματικής προσαρμογής $C_{1,50-2500}$. Ο συντελεστής είναι για το δάπεδο 1, $C_{1,50-2500} = 10\text{dB}$ και για το δάπεδο 2, $C_{1,50-2500} = 3\text{dB}$.

2. Αναφορές του φαινομένου στην βιβλιογραφία

Τα προβλήματα με πλωτά δάπεδα, τα οποία εκπέμπουν ήχους χαμηλών συχνοτήτων κατά την διάρκεια εντόνου ξυπόλυτου βαδίσματος, αναφέρονται στην βιβλιογραφία από το 1993 [1] έως και σήμερα [2]. Μια σημαντική έρευνα σχετικά με το θέμα δημοσιεύθηκε το 2015 [3]. Από ότι φαίνεται δεν υπάρχει έως σήμερα μια ολοκληρωμένη εξήγηση του φαινομένου και δεν υπάρχουν ασφαλείς οδηγίες για κατασκευές που δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο.

Χαρακτηριστικά φάσματα της στάθμης κτυπογενούς ήχου αναφέρονται στην δημοσίευση του M. Wolf και C. Burkhart [2].

Γράφημα 2: Φάσματα της κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου για δυο δάπεδα στο ίδιο διαμέρισμα, με "βοή δαπέδου" (κόκκινο), χωρίς βοή δαπέδου (μπλε)



Μετρήθηκαν δυο δάπεδα ίδιας κατασκευής στο ίδιο διαμέρισμα όπου το ένα δάπεδο παρουσίασε το φαινόμενο της "βοής" (κόκκινο) ενώ το άλλο δάπεδο δεν το παρουσίασε (μπλε).

Ως πιθανές αιτίες του φαινομένου αναφέρει ο C. Burkhart [4] τις ακόλουθες:

- Συντελεστής απόσβεσης του ελαστικού υλικού
- Ιδιοσυχνότητες του χώρου
- Ιδιοσυχνότητες της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος
- Ιδιοσυχνότητες της πλωτής πλάκας
- Πολύ ομογενή δομικά υλικά

3. Συμπεράσματα

Το χαρακτηριστικό των φασμάτων της ηχοστάθμης κτυπογενούς ήχου των πλωτών δαπέδων, οι οποίοι παρουσιάζουν το φαινόμενο της "βοής", είναι η άνοδος της ηχοστάθμης επάνω από 60dB στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων κάτω από 100Hz. Η μετακίνηση της κάθετης ιδοσυχνότητας του πλωτού δαπέδου σε συχότητες κάτω από 40 έως 50Hz προτείνεται στις εργασίες [2] και [3] για την αποφυγή προβληματικών πλωτών δαπέδων.

Π.χ.:

Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος (200mm) με επιφανειακή μάζα 480kg/m²

Πλωτή πλάκα με επιφανειακή μάζα 100kg/m²

Ελαστικό υλικό με δυναμική ακαμψία 5MN/m³

Η κάθετη ιδοσυχνότητα του πλωτού δαπέδου υπολογίζεται σε $f_0 = 39\text{Hz}$.

Η εκπομπή ενοχλητικών ήχων χαμηλών συχνοτήτων μπορεί να μειώνεται καθοριστικά με την χρήση παπουτσιών ή της παντόφλας εντός του σπιτιού.

4. Αναφορές

[1] B. Kühn, R. Blickle, "Untersuchungen zum Sonderfall des dröhnenden Unterlagbodens", Zeitschrift Wärme-, Kälte-, Schall-, und Brandschutz wksb **32** (1993)

[2] M. Wolf, C. Burkhart, "Vermeidungsstrategien und Ansätze einer Vermeidung des Estrichdröhnens", DAGA (2016)

[3] N. Langner, H.- M. Fischer, M. Schneider, *Ursachen und Verbesserungspotenzial des Phänomens der tieffrequenten Trittschallgeräusche bei klassischen schwimmenden Estrichen auf Stahlbetondecken im Wohnungsbau*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2015)

[4] C. Burkhart, "Tieffrequenter Trittschall - Messergebnisse, Mögliche Ursachen", DAGA (2002)

**Rotunda reloaded - Περιγραφή της ακουστικής της
Ροτόντας στην Θεσσαλονίκη μετά από την αποπεράτωση
των εργασιών αναστύλωσης**

Βασίλειος Ζαφρανάς Ηλεκτρολόγος Μηχανικός zafranas@arch.au th.gr	Παναγιώτης Καραμπατζάκης Αρχιτέκτων Μηχανικός, Σύμβουλος Ακουστικής info@nestos.net	Αιμιλία Καραποστόλη Αρχιτέκτων Μηχανικός, ΜΑ Μουσειολογίας, Υ.Δ. Α.Π.Θ./ emiliearch@gmail .com	Gottfried Schubert Φυσικός, Σύμβουλος Ακουστικής schubert.athens @gmail.com	Γεώργιος Χατζηγεωργίου Πολιτικός Μηχανικός, Σύμβουλος Ακουστικής info@acoustical.gr
---	---	---	---	---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εργασίες αναστύλωσης της Ροτόντας στην Θεσσαλονίκη ολοκληρώθηκαν τον Δεκέμβριο του 2015 και σήμερα, το μνημείο είναι πάλι ανοικτό για το κοινό. Οι εσωτερικές σκαλωσιές που στήριζαν τμήματα του κτιρίου, κατασκευασμένες μετά από τον σεισμό του 1978, αποτελούν πλέον παρελθόν. Έτσι είχαμε την ευκαιρία να πραγματοποιήσουμε εκ νέου μετρήσεις του χρόνου αντήχησης στον χώρο της Ροτόντας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης και γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις του Ε. Τζεκάκη (1972 και 1973). Επίσης συγκρίνονται οι νέες μετρήσεις με αυτές που έκανε ο Π. Καραμπατζάκης το 2008, με τμηματικές σκαλωσιές στον χώρο. Οι μετρήσεις του χρόνου αντήχησης χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον για τη Βαθμονόμηση ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου του χώρου. Από το μοντέλο προκύπτουν ακουστικές παράμετροι πέραν του χρόνου αντήχησης οι οποίες είναι χρήσιμες για την αξιολόγηση της Ροτόντας ως χώρο μουσικών αλλά και καλλιτεχνικών εκδηλώσεων.

Rotunda reloaded – The acoustics of Rotunda in Thessaloniki, after the completion of the restoration works

ABSTRACT

The restoration works on Rotunda were completed on December 2015 and today the monument is once again open to the public. The internal scaffolding used to support parts of the building, installed after the 1978 earthquake, is now gone. Thus we were given a chance to measure the reverberation time of Rotunda once again. In this paper we present the reverberation time measurements and comparisons are made between this and previous measurements (1972 and 1973) by E.Tzekakis. The data is also compared with another previous measurement made by P. Karampatzakis in 2008 with partial scaffoldings in place. The

reverberation time data is then used to “calibrate” a three dimensional digital model of the monument. From the model other acoustic parameters of the space are examined and a full acoustical evaluation of rotunda is performed.

Εισαγωγή

1. Ιστορικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Για το κτίριο της Ροτόντας ή του Αγ. Γεωργίου, όπως ονομάζεται πολλές φορές, Αντλούμε ιστορικά στοιχεία από την περιγραφή που δίνει το ΥΠ.ΠΟ [1]. Η Ροτόντα ανήκει στα περίκεντρα οικοδομήματα, στο κυκλικό της σχήμα άλλωστε οφείλει και την ονομασία της. Κτίστηκε στα χρόνια του καίσαρα Γαλερίου, γύρω στα 306 μ.Χ., ως ναός του Δία ή του Κάβειρου ή κατ' άλλους ως Μουσουλείο του ιδίου. Στον άξονά της κατέληγε πομπική οδός που συνέδεε τη θριαμβική αψίδα του Γαλερίου με το ανακτορικό συγκρότημα, που έχει ανασκαφεί νοτίως της Εγνατίας οδού. Η μετατροπή του σε χριστιανικό ναό συντελέστηκε στη διάρκεια των παλαιοχριστιανικών χρόνων και διανοίχθηκε και διευρύνθηκε η ανατολική κόγχη και κατασκευάστηκε το ιερό βήμα, ένας ορθογώνιος χώρος με ημικυκλική αψίδα στα ανατολικά.

Τα λείψανα από την παλαιοχριστιανική φάση του μνημείου είναι τα εξαιρετικής ποιότητας ψηφιδωτά. Τις φωτιστικές θυρίδες και τα εσωρράχια των καμαρών στη βάση του θόλου κοσμούν ψηφιδωτά, των οποίων ο πλούτος των θεμάτων με φυτικά και γεωμετρικά μοτίβα και η λαμπρότητα των χρωμάτων εντυπωσιάζει. Οι μεγάλης κλίμακας επεμβάσεις που έγιναν στο μνημείο κατά την παλαιοχριστιανική περίοδο επιβάρυναν τη στατική του επάρκεια. Οι σεισμοί των αρχών του 7ου αι. κατέστρεψαν την αψίδα του ιερού και το υπερκείμενο τμήμα του θόλου. Η αψίδα, μετά την αποκατάστασή της, ενισχύθηκε εξωτερικά με δύο αντηρίδες και διακοσμήθηκε τον 9ο αι. με την τοιχογραφία της Αναλήψεως. Το 1590/1 μετατράπηκε σε τζαμί από τον Σεΐχη Σουλεϊμάν Χορτατζή Εφέντη. Οι σεισμοί που έπληξαν την πόλη της Θεσσαλονίκης το 1978, προξένησαν σοβαρές βλάβες στο μνημείο.

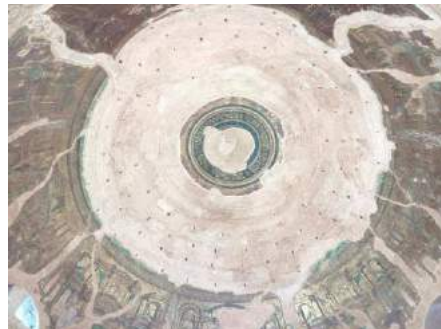
1.2 Αρχιτεκτονικά στοιχεία

Από την ρωμαϊκή αρχιτεκτονική παράδοση οι χριστιανοί πήραν τον τύπο της βασιλικής και τον χρησιμοποίησαν για τις εκκλησίες όπου τελούσαν την ευχαριστιακή λατρεία· χρειάζονταν όμως και κτίρια για τις αναμνηστικές τελετές που γίνονταν σε ιερούς τόπους, όπου είχε συμβεί κάποιο σημαντικό γεγονός της ιστορίας τους, ή πάνω από τους τάφους και τα λείψανα των μαρτύρων. Τα πρότυπα για αυτά τα μαρτύρια τα έδωσαν τα κυκλικά ή οκταγωνικά επιτύμβια μνημεία της ειδωλολατρικής αρχαιότητας όπως τα μανσωλεία της Caecilia Metella. Ο τρούλος, αναπόσπαστο στοιχείο σ' αυτά τα περίκεντρα κτίσματα, έμελλε να καθορίσει το μέλλον της βυζαντινής αρχιτεκτονικής. Αλλά δεν ήταν όλες οι ροτόντες πραγματικά μαρτύρια, στη Θεσσαλονίκη, το κυκλικό μανσωλείο που είχε κτίσει ο Γαλέριος κατά τα τέλη του 3ου αιώνα π.Χ., κοντά στο ανάκτορο του και στην αψίδα του

θριάμβου του, δηλαδή η σημερινή Ροτόντα της Θεσσαλονίκης μετατράπηκε σε εκκλησία, η οποία αφιερώθηκε στην Θεία Δύναμη, σύμφωνα με τη ροπή της εποχής προς τις αφηρημένες έννοιες· αργότερα αφιερώθηκε στους Αγ. Ασωμάτους και τέλος στον Αγ. Γεώργιο [2].



Εικόνα 1.1



Εικόνα 1.2

Σύμφωνα με τον Χ. Μπούρα [3], ο ναός κυκλικού σχήματος, με οκτώ ορθογώνιους σε κάτοψη οίκους, περιμετρικώς στο πάχος του τοίχου, είναι πιθανότερο να μην είχε ολοκληρωθεί ποτέ. Αργότερα, επί αυτοκράτορα Θεοδοσίου, μετατράπηκε σε εκκλησία των ανακτόρων, μετά από τροποποιήσεις μεγάλης κλίμακας, μέρος των οποίων τεκμηριώθηκε με ανασκαφές (Hebrard, Dyggve). Εκτός από τις προσθήκες στα ανατολικά, στη δυτική πλευρά προστέθηκε σκευοφυλάκιο (:) και στη νότια πρόπυλο με δύο οκταγωνικά προκτίσματα, τα οποία επίσης δεν σώζονται. Ο ναός διακοσμήθηκε με άριστης τέχνης ψηφιδωτά, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον γιατί παρουσιάζουν μνημειώδεις προσόψεις υστερορωμαϊκών κτιρίων. Ο ημισφαιρικός θόλος του κτιρίου, ανοίγματος 24 μέτρων, είναι τυφλός και κατασκευασμένος από τούβλα, φαίνεται όμως ότι στους τοίχους, πάχους 6,5 μέτρων, έχει γίνει και χρήση χυτών υλικών κατά την ρωμαϊκή παράδοση και μια ξύλινη κατασκευή διαμορφώνει την σημερινή κωνική στέγη, πάνω από τον θόλο. Κατά την Τουρκοκρατία μετατράπηκε σε τζαμί, και τον πλούσιο σε γλυπτά άμβωνα του ναού βλέπει κανείς στο μουσείο της Κωνσταντινούπολης [3]. Το κτήριο, διαμέτρου 24,50μ καλύπτει ισοδιάστατος θόλος από οπτόπλινθους, που φθάνει σε ύψος τα 29,80μ.. Ο κυλινδρικός τοίχος, πάχους 6,30μ., διασπάται εσωτερικά σε οκτώ ορθογώνιες κόγχες, από τις οποίες η νότια αποτελούσε την κύρια είσοδο [4], [1].

Τον Δεκέμβριο του 2015, τα μέλη του ΚΑΣ έδωσαν ομόφωνα το «πράσινο φως» για την πραγματοποίηση της εκδήλωσης στο μνημείο για την απόδοσή του στο κοινό, 37 χρόνια μετά το «κλείσιμό» του για τις προαναφερθείσες αναστηλωτικές εργασίες [5]. Ενδιαφέρον αποτελεί πως η εκδήλωση που επιλέχθηκε ήταν μια παράσταση φωνητικής μουσικής που συμπεριλάμβανε την απαγγελία του έργου «Άσμα ασμάτων» του Σολομώντα, μέσα από τις φωνές πέντε νέων ποιητών και όχι μια μουσική παράσταση, η οποία ίσως έφερνε στο συλλογικό θυμικό την μουσική εκδήλωση που δεν πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 1995 και το μαχαιρωμένο πιάνο [6]. Όμως, οι σύγχρονες τάσεις στην μουσική σύνθεση και παράσταση, αλλά και στην ίδια την καλλιτεχνική δημιουργία, με το αυξημένο ενδιαφέρον των καλλιτεχνών και των μουσικών συνθετών για τον αρχιτεκτονικό χώρο και το ηχητικό μέσο, δύναται να πρωταγωνιστήσουν στην βιώσιμη λειτουργία του χώρου

της Ροτόντας ως ένα ενεργό αστικό μνημείο, πέρα από τις καθιερωμένες μουσικές παραστάσεις, ως χώρος ηχητικών καλλιτεχνικών περιβαλλόντων και πειραματισμού.

1.3 *Τχνη του ηχοτοπίου της ρωμαϊκής και βυζαντινής περιόδου*

Οι Barry A Blesser και Linda-Ruth Salter μέσα στο πλαίσιο της πρακτικής εφαρμογής της έννοιας της ηχητικής αρχιτεκτονικής, προτείνουν ένα διαθεματικό πλαίσιο για τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς, της ηχητικής αρχιτεκτονικής και της ηχητικής εμπειρίας των αρχιτεκτονικών χώρων παραστάσεων, κυρίως παρελθοντικών χρόνων, πέρα από τις αποκλειστικές ποσοτικές μετρήσεις. Η μεθοδολογία θεωρεί απαραίτητη την ανάδειξη της ηχητικής εξοικείωσης της εποχής, η οποία ενισχύει την υποκειμενική ποιότητα του ηχητικού περιβάλλοντος και τη συμβολική σημασία των ηχητικών ποιοτήτων, πέρα από τα επιστημονικά εργαλεία μέτρησης [7]. Οπότε γίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια σύντομη περιγραφή του ηχητικού περιβάλλοντος της ρωμαϊκής εποχής.

Η κουλτούρα της καθημερινής ζωής στην αρχαιότητα ήταν, ως επί το πλείστον, προφορική. Συγκεκριμένα, από την εποχή των πρώτων προφορικών κοινωνιών, έγινε κατανοητό πως ο πολιτισμός δύναται να υπάρξει όχι μόνο ως γραπτό ή τυπωμένο κείμενο, αλλά και ως κάτι εφήμερο και ελεύθερο, βασισμένο στον ήχο της ανθρώπινης ομιλίας [8]. Ενδιαφέρον αποτελεί πως τα προβλήματα της συνεχούς κυκλοφοριακής κίνησης και της ηχορρύπανσης ήταν καίρια ακόμα και τότε. Σημαντικό ηχητικό στοιχείο της μετέπειτα βυζαντινής περιόδου, αποτελεί η ιδιαίτερη ακουστική συμπεριφορά των μεγάλων πέτρινων κτισμάτων, όπως και στην παρούσα περίπτωση της Ροτόντας, που έρχονταν σε αντίθεση με τις καθημερινές μικρές ξύλινες κατοικίες, με σκοπό τον εντυπωσιασμό του προσκυνητή της εποχής μέσα από μια σειρά από μεγαλειώδη ακουστικά φαινόμενα [9]. Θεωρείται κοινός τόπος πως σε αρκετές εκφάνσεις της καθημερινής ζωής της απώτερης αλλά και ύστερης αρχαιότητας, η ηχητική σφαίρα, και η ενεργή συμμετοχή της στην εμπειρία του αρχιτεκτονικού χώρου, ήταν καταλυτική.

2. Τα δεδομένα της εργασίας

2.1 *Νέες μετρήσεις*

Στην παρούσα εργασία ληφθήκαν δεδομένα ακουστικών παραμέτρων από νέες, σύγχρονες μετρήσεις που διενεργήθηκαν από τους συγγραφείς, τον Μάρτιο του 2016, και στην παρούσα εργασία θα ονομάζονται «Μετρήσεις 2016»

2.2 *Μεθοδολογία για τις νέες ακουστικές μετρήσεις*

Οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα του EN ISO 3382 “Acoustics-Measurement of the reverberation time of room with reference to other acoustical parameters”.

Χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός.

Ηχόμετρο: NTI-Audio XL2 Class1, Type 1 κατά IEC61672, IEC60651

Μικρόφωνο: NTI, MA220 1/2” ελευθέρου πεδίου. Nominal Open-circuit Sensitivity: -34 dBV/Pa ±3 dB(20 mV/Pa) @ 1kHz. Type 1 κατά IEC 61672-1.

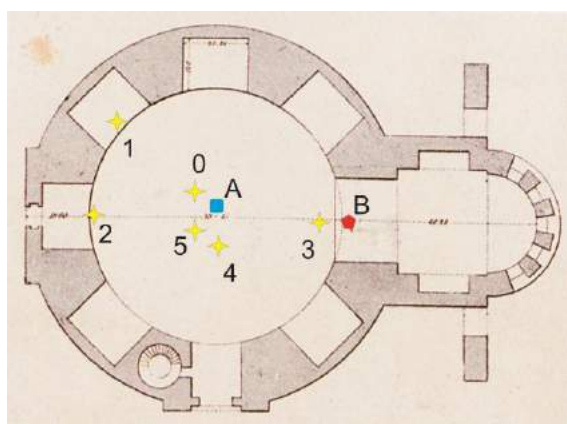
Γεννήτρια θορύβου: NTI-Audio Minirator MR-PRO MR2

Βαθμονομητής: Briel & Kjaer 4231, Class 1 σύμφωνα με IEC 60942(2003)

Ηχείο : Πολυκατευθυντικό δωδεκάεδρο , Briel & Kjaer Type 4224.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι του διακοπτόμενου θορύβου, δηλαδή σήμα ροζ θορύβου και πολύ υψηλή ένταση (SPL@1m = 105dB). Το σήμα διεκόπη ακαριαία και καταγράφηκαν η καμπύλες πτώσης του παλμού, που δημιουργήθηκε εντός του χώρου.

Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις έγινε και εμπειρική διακρίβωση περιοχών, όπου παρουσιάζουν αυξημένη ή μειωμένη ηχώ (A θέση και B θέση αντίστοιχα). Οι θέσεις των πηγών και των δεκτών για τις μετρήσεις 2016 περιγράφονται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 Περιγραφή των θέσεων μέτρησης. Μετρήσεις 0,1,2,3 από θέση ηχείου A και 4,5 από θέση ηχείου B (σε όλες τις θέσεις δεκτών έγιναν τουλάχιστον 6 μετρήσεις)

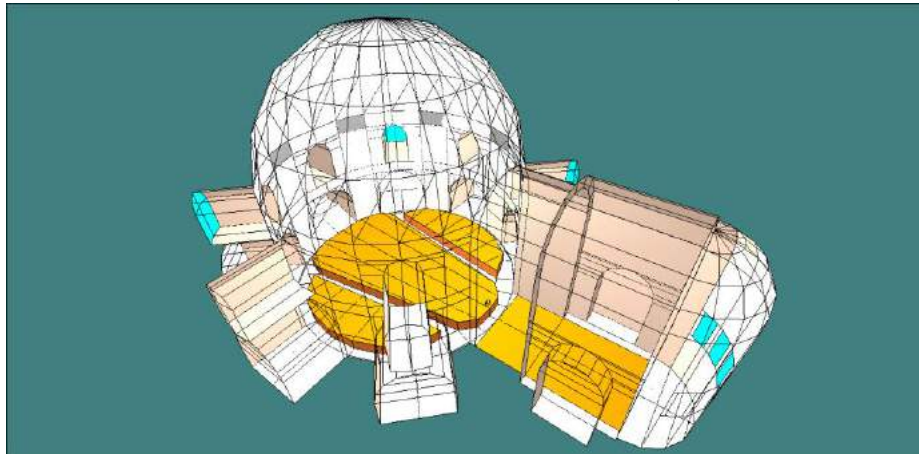
2.3 Παλαιές μετρήσεις

Στην παρούσα εργασία επίσης, ληφθήκαν δεδομένα ακουστικών παραμέτρων από παλαιές εργασίες των Τζεκάκη Ε. [10] και Καραμπατζάκη Π. [11] που διενεργήθηκαν οι μεν μετρήσεις Τζεκάκη το 1972-73, οι δε μετρήσεις Καραμπατζάκη το 2008.

2.4 Τρισδιάστατο μοντέλο εξομοίωσης

Παράλληλα με τις μετρήσεις, δημιουργήθηκε μοντέλο 3^{ων} διαστάσεων, αποτελούμενο από 862 faces και έγινε επεξεργασία στο λογισμικό CATT/TUCT.

Η επεξεργασία περιελάμβανε την βαθμονόμηση του μοντέλου, από τις μετρήσεις 2016. Από την διαδικασία αυτή, προέκυψε η μέση απορροφητική ικανότητα του χώρου, σε φάσμα οκτάβας.

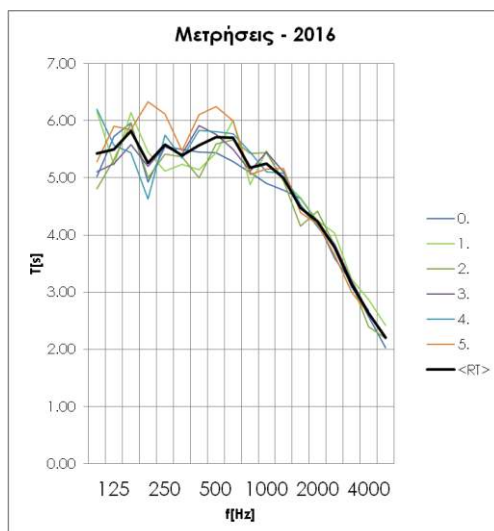


Εικόνα 2.2 Το τρισδιάστατο μοντέλο

3. Τα αποτελέσματα

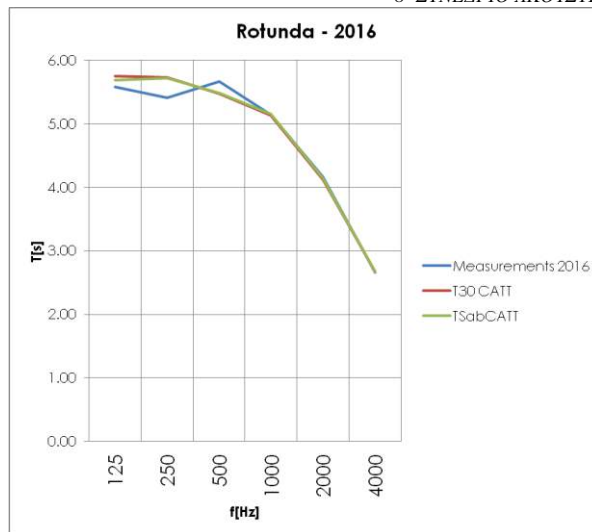
3.1 Αποτελέσματα και 3διάστατο μοντέλο

Τα αποτελέσματα της μέτρησης 2016 παρουσιάζονται στο γράφημα 3.1 ανά θέση και σε 1/3 οκτάβας.



Εικόνα 3.1 Αποτελέσματα μέτρησης χρόνου αντήχησης το 2016.

Με τα δεδομένα της μέτρησης έγινε βαθμονόμηση του 3διάστατου μοντέλου.



Εικόνα 3.2 Σύγκριση μέτρησης 2016 και αποτελεσμάτων CATT/TUCT, μετά την βαθμονόμηση.

Η επιλογή της ηχοαπορροφητικής ικανότητας έγινε με σκοπό τη βαθμονόμηση του μαθηματικού μοντέλου και η όσο αυτό γίνεται καλύτερη σύμπτωση με τις μετρήσεις.

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα των τελικών επιφανειών (τοίχοι, τρούλος, δάπεδο) ορίστηκε ως

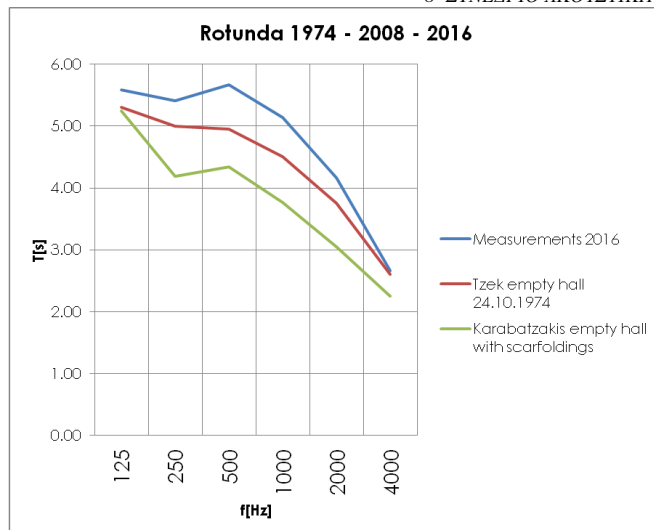
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
a	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10

Η ηχοαπορροφητική ικανότητα βρίσκεται στο αναμενόμενο επίπεδο όπως αυτό αναφέρετε και στην βιβλιογραφία [13].

Ziegelstein (τουβλοδομή χωρίς επίχρισμα)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
a	0.05	0.07	0.10	0.13	0.13	0.08
Saeule (Πεσσοί)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
a	0.06	0.08	0.11	0.13	0.13	0.08

3.2 Σύγκριση των μετρήσεων με παλαιότερες μετρήσεις

Συγκρίνοντας τις τιμές που μετρήθηκαν από τον Τζεκάκη, τον Καραμπατζάκη και τις τιμές των μετρήσεων 2016 προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα



Διάγραμμα 3.3 σύγκριση των αποτελεσμάτων Τζεκάκη, Καραμπατζάκη και μετρήσεων 2016

Σχολιάζοντας το διάγραμμα 3.3, συμπεραίνουμε τα ακόλουθα:

Υψηλότερες τιμές του χρόνου αντήχησης σε σχέση με τις μετρήσεις του Τζεκάκη 1979, παρουσιάζονται στις μετρήσεις του 2016, εξ αιτίας του καθαρισμού των επιφανειών και της αντικατάστασης, σπασμένων υαλοπινάκων, οι οποίοι δημιουργούν οπές απορρόφησης στον χώρο.

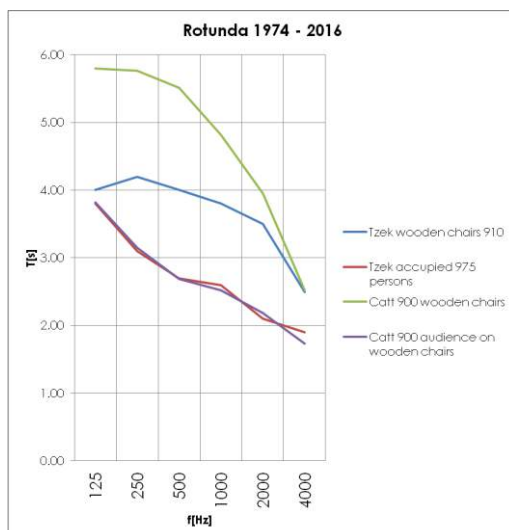
Επίσης είναι φανερό ότι οι πιο χαμηλές τιμές του χρόνου αντήχησης παρατηρούνται το 2008 στις μετρήσεις Καραμπατζάκης, λόγω της αύξησης της ηχοαπορρόφησης και της διάχυσης στο χώρο, εξ αιτίας της παρουσίας της περιμετρικής σκαλωσιάς.



Εικόνα 3.4 Οι σκαλωσιές περιμετρικά στον χώρο, το 2008

3.3 Σύγκριση των υπολογισμών (CATT-TUCT) με τις μετρήσεις του Τζεκάκη

Συγκρίνοντας τις τιμές που μετρήθηκαν από τον Τζεκάκη, με τα αποτελέσματα από το μαθηματικό μοντέλο που αναλύθηκε στο CATT/TUCT προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα



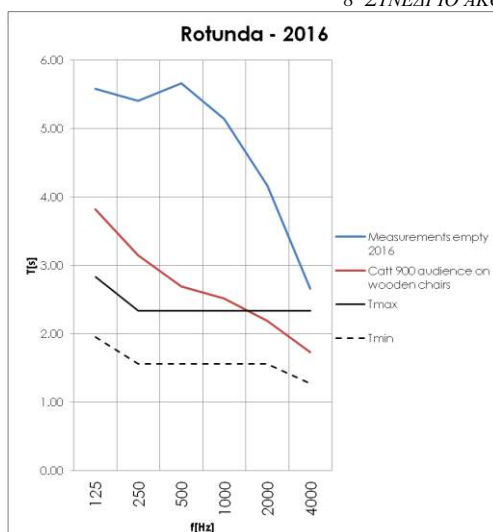
Γράφημα 3.5 Σύγκριση των τιμών που μετρήθηκαν από τον Τζεκάκη, με τα αποτελέσματα από το μαθηματικό μοντέλο που αναλύθηκε στο CATT/TUCT

Στο παραπάνω γράφημα φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών με το Μαθηματικό μοντέλο συγκρινόμενα, με τις μετρήσεις Τζεκάκη. Η σύμπτωση των αποτελεσμάτων για το μοντέλο με ακροατήριο σε καθίσματα είναι πολύ εντυπωσιακή. Από την άλλη, τα αποτελέσματα για το μοντέλο με καρέκλες, χωρίς ακροατήριο, δεν υπάρχει σύμπτωση. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι καρέκλες που υπήρχαν στον χώρο κατά την μέτρηση του Τζεκάκη, είχαν σαφώς μεγαλύτερη ηχοαπορροφητική ικανότητα, συγκρινόμενη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο μαθηματικό μοντέλο και προέρχεται από την βιβλιογραφία, ως ξύλινο κάθισμα.

3.4 Απαιτήσεις για αίθουσες συναυλιών

Ο χρόνος αντήχησης του χώρου με ακροατήριο είναι αρκετά υψηλότερος (της τάξεως του 35% στις χαμηλές συχνότητες, η οποία φθίνει σχετικά ομαλά έως τα 1000Hz) από της ιδανικές τιμές σύμφωνα με το DIN 18041:2004-05, Acoustical Quality in small to medium sized rooms.

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται σύγκριση των τιμών του χρόνου αντήχησης του χώρου, των τιμών των μετρήσεων 2016 (χώρος άδειος ακροατηρίου), τον υπολογισμό στο CATT/TUCT (900m² ακροατήριο σε ξύλινο κάθισμα).



Γράφημα 3.6 Σύγκριση των τιμών των μετρήσεων 2016 και των αποτελεσμάτων από το μαθηματικό μοντέλο που αναλύθηκε στο CATT/TUCT, με τις ιδανικές τιμές του χρόνου αντήχησης κατά το DIN18041:2004-05

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ο χώρος, δύναται, (ελαφρώς, εκτός των ορίων, αλλά κοντά στις απαιτήσεις) να υποστηρίξει παραστάσεις κυρίως Βυζαντινής και γενικότερα εκκλησιαστικής μουσικής, καθώς και έργα συνθετών, παλαιότερων ή σύγχρονων, οι οποίοι λαμβάνουν υπ' όψιν τους, ως δεδομένο, τον υψηλό χρόνο αντήχησης του χώρου εκτέλεσης, κατά την σύνθεση των έργων τους. Τέλος αναφέρεται ότι η ευνοϊκότερη θέση του συνόλου, που εκτελεί μία παράσταση στον χώρο, βρίσκεται, κάτω από την αψίδα, στην ένωση του κυρίως χώρου με την προσθήκη του Πρεσβυτερίου.

4. Αναφορές

- [1] Υπουργείο Πολιτισμού, *Ροτόντα Θεσσαλονίκης*, on line, http://odysseus.culture.gr/h/2/gh251.jsp?obj_id=1812 (επίσκεψη 3/8/2016).
- [2] Charles Delvoe (μτφ Μαντώ Β. Παπαδάκη), *Βυζαντινή Τέχνη*, Εκδόσεις Δημ. Ν. Παπαδήμα, Αθήνα, σελ.62-63 (1968, 1988).
- [3] Χαράλαμπος Θ. Μπούρας, *Ιστορία της Αρχιτεκτονικής Δεύτερος τόμος*, Εκδοτικός Οίκος ΜΕΛΙΣΣΑ, Αθήνα, σελ. 81-82 (1994, 2001).
- [4] Καλλιόπη Θεοχαρίδου, «Η Ροτόντα της Θεσσαλονίκης. Νέα στοιχεία και αποσαφηνίσεις με αφορμή τις αναστηλωτικές εργασίες», *Δελτίον ΧΑΕ 16*, Περίοδος Δ', Αθήνα, σελ. 57-76 (1991-1992).
- [5] Ελένη Μάρκου, «Ντεμπούτο» εκδηλώσεων στη Ροτόντα Θεσσαλονίκης με την απαγγελία του έργου «Άσμα ασμάτων», on line, *archaeology and arts*, <http://www.archaiologia.gr> (επίσκεψη 11/8/2016).
- [6] Άρης Δημοκίδης, *Όταν ένας εξαγριωμένος μοναχός μαχαίρωσε αυτό το πιάνο στην Θεσσαλονίκη. Πέρασαν 20 χρόνια, αλλά η εκκρεμότητα δεν έχει τακτοποιηθεί. Τώρα ήρθε η ώρα.*, on line, <http://www.lifo.gr/articles/mikropragmata/87318> (επίσκεψη 11/8/2016).

- [7] Barry A. Blesser & Linda-Ruth Salter, «Beyond Measurements: A Multi-disciplinary Framework for Aural Experience of Ancient Spaces», *The Acoustics of Ancient Theatres* Conference Patras, September 18-21, 2011.
- [8] David Hendy, *Noise: A Human History of Sound and Listening*, Profile Books, Λονδίνο, σελ.54 (2013).
- [9] Ibid., σελ.125.
- [10] E.G. Tzekakis, Reverberation time of the Rotunda of Thessaloniki, *Acoustica*, 1979, Volume 43, page 275 ff
- [11] Π.Σ. Καραμπατζάκης, Ακουστικές μετρήσεις σε 11 βυζαντινούς ναούς της Θεσσαλονίκης, 4^ο Συνέδριο ΕΛΙΝΑ Ακουστική 2008 - Ξάνθη
- [12] V. Brettschneider, Analyse und Optimierung der Raumakustik in der Marienkirche zu Prenzlau, Magisterarbeit, TU Berlin, 13.07.2007

Scenery design through a geometrical model: An application in the theatre of ancient Tyndaris

Eirini Kostara-Konstantinou (1), kostaraeirini@gmail.com

Federica Lepore (1), federicalepore89@icloud.com

Arianna Astolfi (2), Arianna.astolfi@polito.it

Nikos Barkas (3) nbarkas@arch.duth.gr

(1) School of Architecture, University of Sheffield, United Kingdom

(2) Department of Energy- Politecnico di Torino, Italy

(3) Department of Architecture Engineering D.U.Thrace, Greece

ABSTRACT

The revival of ancient drama prioritized the issues of reversible interventions to ensure proper conditions for current performances. Ancient theatres' fragile situation, often with ruined koilon and without a stage building, is nowadays even more damaged by the contemporary use. This article is focused on the evaluation of the addition of a scene building in the theatre of Tyndaris, aiming to restore the natural acoustic function of the space. The pioneering acoustical research on open air theaters, made by Fr. Canac, guided the study. The dimensions, the position and the acoustic contribution of each scenic element were defined and guidelines useful for the designers were provided via geometric functions.

Σχεδιασμός και ακουστική διερεύνηση σκηνογραφίας με την γεωμετρική μέθοδο στο αρχαίο θέατρο Tyntaris

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διαχρονικές καταστροφές στο χώρο της σκηνής των αρχαίων θεάτρων, θέτουν κρίσιμα προβλήματα στη σύγχρονη επαναλειτουργία τους. Η ανακοίνωση επικεντρώνεται στην ακουστική αξιολόγηση μιας σκηνικής κατασκευής στο αρχαίο θέατρο του Τύνταρι, στη Σικελία, με στόχο την ενεργοποίηση της φυσικής μεγαφωνικής ικανότητας του χώρου. Μέσω μιας σύντομης ιστορικής επισκόπησης των διαδοχικών οικοδομικών φάσεων του θεάτρου, διερευνάται η βέλτιστη μορφή και το μέγεθος της σκηνογραφίας, ακολουθώντας τις έρευνες και τα πορίσματα της μεθόδου ειδώλων – πηγών του Fr. Canac. Μέσω γεωμετρικών συναρτήσεων διερευνάται η αλληλεπίδραση των επιμέρους λειτουργικών στοιχείων του θεάτρου και αξιολογείται η ακουστική συνεισφορά τους στην ακουστική του θεατρικού χώρου

Introduction

The ancient theatre dropped a long run of about 7 centuries and spread to the coast and the hinterland of the wider Mediterranean area. Starting with servicing the Dionysos ritual and drama contests, the ancient theatre followed the political and social transformations of the Greek speaking world of antiquity. [1]

The theatre is, in fact, a scientific field, the limits of which are extended to different scientific areas. As an unfortunate consequence of this prominent location, the interdisciplinary approach of the ancient theatre and the multi-parametric dimension of its problems were neglected by modern research. The revival of ancient drama (from the early 20th century) and the demand for return to its natural space (for about a century) has prioritized the issues of reversible interventions to ensure proper conditions for the performances.

Despite the serious distortions brought about by common Roman interventions or destructions caused by time, in most cases the reuse of the theatres is deemed feasible. However, the restoration efforts are incomplete without corresponding acoustic interference; in fact the various stage-design solutions normally fail to activate the natural (passive) acoustic potential of the theatre space. [2], [3]

The theatre space was generally composed by a small number of distinct elements: an inclined *cavea* guaranteed the appropriate visual and acoustic comfort; the *orchestra* allowing the enforcement of the first reflection of the actor's voice and, finally, the scenography.

Unfortunately today, in most cases, only ruins remain of the constructions in the scene area. Nowadays invasive temporary structures required by the new interpretation of the classic drama replace the lost architectural entities: they usually occupy the *orchestra's* place, which originally had the role of a natural sound amplifier. The purpose of this article is to indicate a methodology for the design of a scenography enabling the natural (passive) acoustic function of the theatrical space. Although the current research was focused on the ancient theatre of Tyndaris in Sicily, general guidelines for the scenery design are provided. [4]

1. The theatre of Tyndaris

The Greek ancient theatre of Tyndaris in its current condition was chosen as a case study for the present research. Nowadays, the theatre constitutes one of the remodeled theatres commonly transformed during the Roman times in amphitheatre. Hellenistic in its origins, the theatre presents many differences from the classic theatre of the 5th century. The construction of the theatre at the end of the 3rd century BC was not completed in a single period. In its last form the theatre of Tyndaris presents itself like a system of three parts: the *cavea*, the *orchestra* and the *scene*, each one, as mentioned, originated in a different period. [5]

The narrow *parodoi* and the form of the lateral walls (*analemma*) of the *koilon* indicate that the *cavea* was built at first and successively the stage building was added (the lateral walls were cut for the construction of *paraskenia* in the edges of the scene). [6] The original wood construction of the scene became a more elaborated architectural construction during the Hellenistic period when the theatrical play and the recitation became the most important artistic manifestation.

Successively, in Roman times (around 22-21 BC), the theatre was transformed into an *arena*. The Greek *koilon* in the natural slope was replaced by the Roman *amphitheatre* supplemented by an artificial embankment. The level of the Greek

orchestra (with a diameter of 20.10m) was lowered by 0.90m and transformed in a *conistra*, a basin almost oval, deep about 3.50m with five openings, mainly used for naval battles. The material from the destroyed *proscenium* and the first four rows of the *koilon*, was used for the construction of the *podium* (2,50m height), around the arena. The corners of the *paraskenia* were truncated in order not to surpass the podium of the arena. Moreover, the Greek-Hellenistic scene collapsed in late-medieval age. [5]. Thus, the parts that last until today come from various interventions and restorations of the original building.

The remains of the footings of the scene allow us to hypothesize a three level monumental building and a podium with three openings. The *cavea* mostly damaged is now covered by wooden panels for seating purposes.

2. The geometrical method of Fr. Canac

In 1967 François Canac published his famous book "*L' Acoustique des théâtres antiques - ses enseignements*" concentrating more than 20 years of acoustic research on the ancient open-air theatres. [7]

The French researcher combined in-situ measurements with simulation experiments in the laboratory. The in-situ measurements consisted of the acknowledgement of the sound intensity distribution and the evaluation of the speech intelligibility in order to assess the overall acoustic quality of a theatre. The laboratory work instead consisted of the acoustic evaluation of various architecture elements with the use of hydraulic and ultrasonic models.

The research, by means of the Image Source Method, concluded to the "*canonical equation*" of a theatre which ensures the identification of the symmetrical images of a source relative to the existing surfaces through the geometrical laws of reflection. The assessment of the effect of each source is obtained by summing the various paths of images-sources according to the distance between the actor and the viewer.

One of the key features for the acoustic comfort in a theatre space is the audition angle (ε), formed by the line connecting the steps of the auditorium to the radius of the sound (direct or reflected). This solid cone, whose minimum angle is quantified equal to 4° , provides visual comfort and prevents the absorption of sound by the spectator's body. [7] The audition angle ε , as function of the inclination of the *cavea* (α), the diameter of the orchestra (D), the size of the *proscenium* (h , height of the *proscenium* level plus the height to the mouth of the actor) and the position of the viewer (height H from the level of the *orchestra*) defines the canonical equation of the ancient theatre:

$$D_0 - h \frac{\cotg \alpha}{\sin \varepsilon} = D_0 + H \frac{\cotg \alpha}{\cos(\alpha - \varepsilon) \sin \alpha} \quad (2.1)$$

where:

D_0 the diameter of the orchestra [m];

α the inclination of the *cavea* [$^\circ$];

H the height of the spectator position from the orchestra level [m];

h the height of the *proscenium* level plus the height of the mouth of the actor [m];

ε the audition angle [$^\circ$]

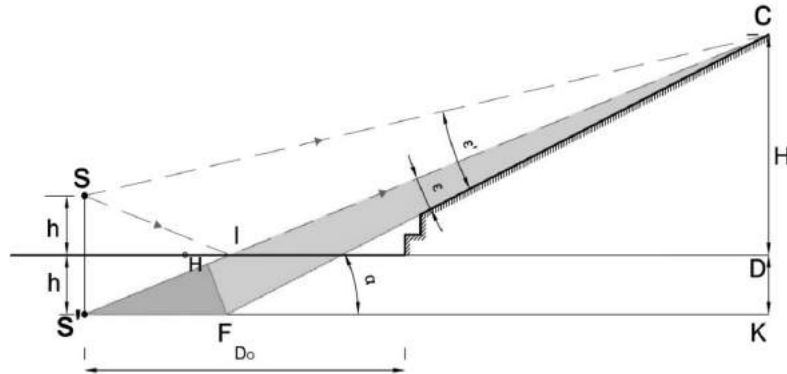


Figure 2.1: Section presenting the canonical equation elements (2.1) in the theatre of Tyndaris

The above mentioned geometrical equation apart from being useful to archaeologists for indicating the likely position of a missing element, it could also be used, in our case, for specifying the place and the dimensions for a contemporary scenography.

3. Application of the geometrical method

3.1 Data collection and general settings

The data collection used for the geometrical model of the ancient theatre of Tyndaris consisted of geometrical information (height and inclination of the cavea, diameter of the orchestra) and sound measurements performed in situ by the Department of Energy of the Politecnico di Torino on 5th-7th September 2015. [8] The measured background noise of the theatre positioned in the middle of a natural ambient was found to be 35 dB(A).

As far as the main performance of the theatre is concerned, the current research focalized on speech requirements in order to be coherent with its historical background. Accordingly, the considered vocal effort by the actor was set at 78 dB at 1m distance (ISO 9921) and the maximum delay of the reflected rays at 35 ms in order to facilitate both hearing and understanding. [3], [7]

Having inserted the above mentioned data into the model, three types of variables were tested:

a) The architectural layout of the theatre (three different configurations of the theatre: only direct sound, direct sound and orchestra reflection, direct sound plus orchestra and scenery reflections). From the “*Only direct*” configuration (without stage building and with a covered orchestra) to a “*Final scenery*” configuration (with a free and reflective orchestra and a narrow stage building), the number of the image sources increased significantly. In particular, the process started from the “*Only direct sound*” case with no reflective surfaces and continued by adding progressively architectural elements: such as the orchestra (+1 image sources) and

the reflection of the background wall combined with the floor of the scenery (+4 image sources)

b) Position of the spectator. In total, calculations were made for eighteen (18) different positions in the amphitheatre (three (3) different rows in six (6) different *kerkides-cunei*).

c) Position of the actor (three (3) different points placed in two (2) different levels on the central axis of the theatre).

3.2 Procedure

Introducing the geometrical data from the theatre of Tyndaris in the formula (2.1) the missing value of different architectural elements was determined.

The first step was the definition of the height of the *proscenium* level. The calculations revealed that by increasing the height, the audition angle ε decreases and so does the acoustic and visual comfort. Furthermore, as it was showed by the calculations the minimum angle ε (4°), that could be accepted, corresponded to a 4.10 m height which was effectively the level of the *logeion* in the Hellenistic scene. Based on these results the height of the scene (1,80 m.) was finally defined as corresponding to a 6° audition angle.

The second geometrical function (3.1) aimed to eliminate the possible echo coming from the orchestra. Through the Image-Source method and the similarity of the triangles OCD, SOA and SOA, SS'B, the difference between the direct and the reflected from the orchestra ray, was calculated.

$$d = (S'C - SC) = S'B = 2h \sin \beta \quad (3.1)$$

$$d = 2h \left(\frac{H}{\sqrt{D^2 + H^2}} \right) \quad (3.2)$$

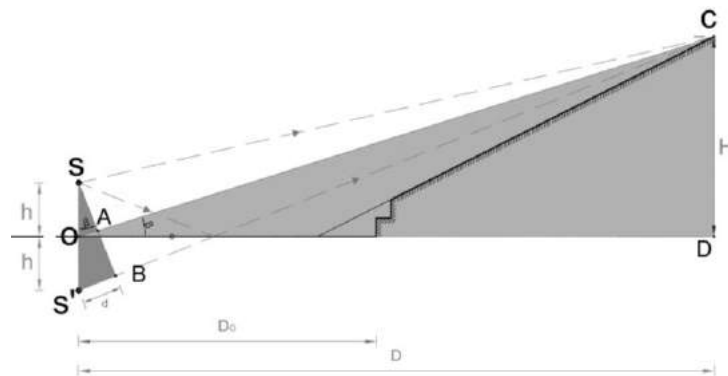


Figure 3.1: Section of the theatre of Tyndaris presenting the variables considered in function 3.1, 3.2

The delay and the final gain of the arriving reflections at the top of the amphitheatre (C worst situation) were calculated (0.4 dB). Applying the laws of the sound propagation, in this case, the addition of the direct and the reflection rays increase the global sound by 3dB.

Subsequently, through the third geometrical function (3.3) the depth of the *proscenium* level was determined. The background wall of the *proscenium* used to play a fundamental role in the acoustic performance of the ancient theatres. Combined to the orchestra level (horizontal), the background wall of the scene building (vertical) constitute the two main sound mirrors of the ancient theatre.

Thus, applying once more the Image-Source method and inserting in the formula the maximum acceptable delay between the direct and reflected sound, the maximum acceptable depth of the scene was calculated (6.5m). Noticed that by decreasing the depth of the *proscenium* level, the distance between the source and its image sources decreases, and so does the delay of the reflected rays, the final proposed depth of the scene (3,5m) was set at the half of the boundary value calculated above.

$$\Delta t = \frac{d}{c} \approx \frac{[2(P-X)\cos\beta]}{c} \tag{3.3}$$

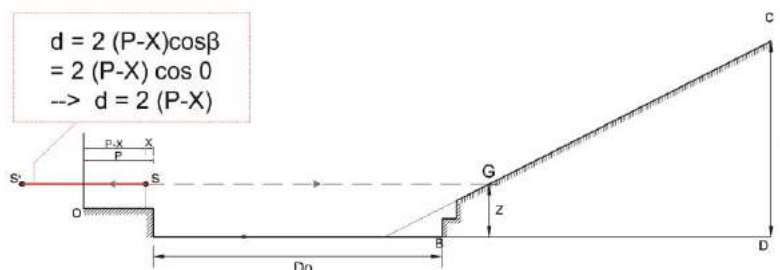


Figure 3.2: Section of the theatre of Tyndaris presenting the variables considered in function 3.3

Finally, a comparison between the contributions of the horizontal sound “mirror” of the orchestra and the vertical sound “mirror” of the *proscenium* back wall was conducted. A 3dB sound increase originated from the orchestra instead of 1.5 dB from the *proscenium* wall underlined further the importance of the orchestra. [4]

Table 3.1 Results

Configuration	First positions [dB]	Last positions [dB]	Divergence (first to last row) [dB]	Raising [dB]	Contribution [dB]
1) Only Direct	51,1 ~ 53,2	45,7 ~ 46,7	6	10,7	-
2) Direct + Orchestra	55 ~ 56,2	48,7 ~ 49,7	6	13,7	3
3) Direct + Orchestra + Scenography	56 ~ 58,3	51,2 ~ 52,9	5	16,2	5,5

3.3 Results

According to the geometrical characteristics of the ancient theatre of Tyndaris the above analysis provided the boundary values and guide lines regarding the basic architectural elements of the scenery. In particular, the height and the depth of the *proscenium* were defined in order to avoid the risk of sound absorption from the spectator's body. Subsequently, using excel files, the acoustic behavior of the whole scenery as well as of each single element were calculated, in order to assess the final effective acoustical function.

The calculations showed that compared to the “*Only direct sound*” configuration, the “*Direct + Orchestra + Scenography*” configuration presented a gain of 5,5 dB. Furthermore, minor divergences (first to last row) (-1 dB) between the sound intensities were noticed after the insertion of the scenery. In fact, a more homogeneous sound distribution was obtained. The results of this part are represented via iso-phonic curves (Figure 3.3) [4]

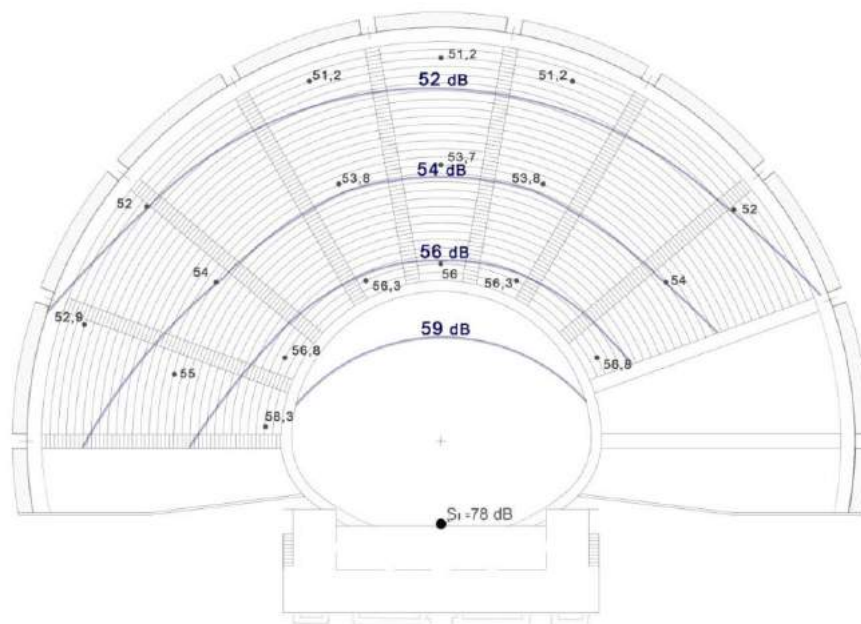


Figure 3.3: Plan presenting through iso-phonic curves the distribution of the direct sound together with the reflections from the orchestra and the final scenery layout.

4. Conclusions

The purpose of the current study was to propose a proper method for the design of contemporary scenery in ancient open-air theatres. After a brief historical review, we defined the most appropriate type of scenery for the theatre in Tyndaris. Specifically, the dimensions and the positions of the scenic elements based on Fr. Canac's study were calculated and the final scenery proposal was tested and validated by means of a geometrical model.

It can be asserted that with the *proscenium* in the lowest level the listening angle is more than 4°, useful to ensure the acoustic as well as the visual comfort of the spectators. By doubling the height of the *proscenium* level in the theatre of Tyndaris, the value of ε would be less than 4°. Thus, the majority of the reflected contribution from the orchestra will be absorbed by the bodies of the audience.

Following that, in speech performances the most appropriate choice is a scenography with a low and narrow *proscenium*. A higher and deeper scene could be proved more appropriate in musical performances, where larger delay and greater sound diffusion is sought.

Finally, the research proved that drama performances could not be held in the theatre of Tyndaris, unless strategies of passive acoustics are applied. The proper design of a temporary and reversible stage set enables the restitution of the natural acoustic capacity of the theatrical space.

5. References

- [1] M. Bieber, *The History of the Greek and Roman Theatre*, Princeton University Press, (1961).
- [2] G. C. Izenour, *Theatre Design*, Mc Graw-Hill New York, (1977).
- [3] N. Barkas «The acoustical parameter of Ancient Greek Theatre Design». *Monument & Environment*, vol. 2, (1994) [in Greek]
- [4] E. Kostara, F. Lepore *Ancient theatres: machines designed for listening. A scenery proposal for the optimization of the passive acoustics for the ancient theatre of Tyndaris*, Master Thesis Polytechnic of Turin, (2015).
- [5] A. Mazzeo, C. Biondo, *La rinascita del teatro antico di Tindari* Dedalo Rome, (2001)
- [6] Fr. Sear, *Roman Theatre_An Architectural Study*, Oxford University Press, (2006)
- [7] Fr. Canac, *L'Acoustique des Theatres Antiques. Ses enseignements*, CNRS Paris, (1967).
- [8] E. Bo, E. Kostara-Konstantinou, F. Lepore, L. Shtrepi, G.E. Puglisi, N. Barkas, A. Astolfi «Acoustic Characterization of the Ancient Theatre of Tyndaris: Evaluation and Proposals for its Reuse» in *23rd International Congress on Sound and Vibration*, Athens, (2016).

Αρχαία Ελληνικά Θέατρα : προβλήματα επαναλειτουργίας και ηχοπροστασίας

Νίκος Μπάρκας
καθηγητής Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.
nbarkas@arch.duth.gr, <http://nikosbarkas.gr/>

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας ανακοίνωσης είναι να καταγράψει την υφιστάμενη κατάσταση και τα προβλήματα επανάχρησης ενός δείγματος είκοσι (20) αρχαίων ελληνικών θεάτρων, με παραμέτρους διερεύνησης το ηχητικό περιβάλλον τους (πηγές και στάθμες οχλήσεις), την οικοδομική κατάσταση τους (κοίλο, ορχήστρα, σκηνή) και τις υφιστάμενες λειτουργικές τους υποδομές. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας μακροχρόνιας έρευνας - παρατηρητηρίου (2004-2016), η οποία επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, με επιχειρούμενο στόχο την ακουστική αξιολόγηση της υφιστάμενης ή δυνητικής επαναλειτουργίας τους. Δίδονται ηχομετρήσεις (από διάφορες περιστάσεις) και προτείνεται η υπολογιστική αξιολόγηση της ακουστικής ποιότητας των θεάτρων, με κριτήριο της ανάδυσση του ωφέλιμου σήματος και εναλλακτικά σενάρια ακουστικής άνεσης των θεατών μιας σύγχρονης παράστασης.

Ancient Greek Theatre: sound protection and current operation

ABSTRACT

The ancient theater is a scientific field, the limits of which are dispersed into different scientific areas. Despite the serious distortions brought about by Roman interventions or destructions caused by time, in most cases the reuse of the theatres is deemed feasible. The paper is part of a broader research aiming at monitoring the contemporary status of the ancient theatres in Greece. The whole survey sample includes a sum of twenty (20) spaces (Athenian Dionysus Elefthereus, Zeas of Piraeus, Thorikos, Amphiarraion at Oropos, Argos, Epidaurus, Mantinea, Megalopolis, Messene, Eretria, Delphi, Orhomenos of Boeotia, Larisa, Dodoni, Dion, Philippi, Thasos, Delos, Thira and Maronia). The parameters of the research include the integration of the theatres into the contemporary urban reality, the operational infrastructure, the sound environment and the acoustic evaluation of their current or potential reuse.

Εισαγωγή

Η ιδιαίτερη ακουστική συμπεριφορά των αρχαίων ελληνικών θεάτρων προσδιορίζεται από τις βασικές αρχές σχεδιασμού των υπαίθριων χώρων ανοικτής κάτοψης :

-ηχοπροστασία του θεατρικού χώρου (εκμηδενισμός των εξωτερικών, ηχητικών οχλήσεων),

-ευχερής ανάδειξη του κατευθείαν ήχου και ανάπτυξη του θεατρικού χώρου στα μέτρα της ανθρώπινης φωνητικής και ακουστικής κλίμακας,

-εξασφάλιση ενός αυτοδύναμου (παθητικού) μεγαφώνου με την πρόβλεψη έγκαιρων ανακλάσεων (από ορχήστρα, σκηνογραφία και το συνδυασμό τους),

-υποβάθμιση των καθυστερημένων ανακλάσεων (έλλειψη οροφής, συστηματική κατάργηση των πλευρικών τοιχωμάτων ή επιμελημένη ενίσχυση της διαχυτικής συμπεριφοράς των υπολοίπων, συμπαγών οικοδομικών στοιχείων). [1]

Η ονομαστή ακουστική του αρχαίου ελληνικού θεάτρου οφείλεται στην επιτυχημένη αναλογία της απόκρισης του χώρου ως προς την αρχική ένταση του αυθεντικού μηνύματος. Σύμφωνα με τον Fr.Canac, είναι μια διαδικασία που, σε συνθήκες χαμηλής αντήχησης (κατάλληλης για την υψηλή καταληπτότητα του θεατρικού λόγου), εξασφαλίζει την αναπλήρωση των ενεργειακών απωλειών, χάρη στις ολιγάριθμες (αλλά ισχυρές) ηχοανακλάσεις, ιδίως προς τις ψηλότερες και πλέον απομακρυσμένες βαθμίδες του κοίλου (ομογενής κατανομή των εντάσεων). [2]

Όπως εξηγήσαμε αναλυτικά σε προηγούμενες δημοσιεύσεις, η ευχερής “ανάδυση” του θεατρικού μηνύματος (όταν εκφέρεται από φωνητικά εκπαιδευμένους και υποκριτικά έμπειρους ηθοποιούς) προϋποθέτει δύο ανεξάρτητες, αλλά στενά συνδεδεμένες ακουστικές συνθήκες : την εμφανή διαφορά ηχητικής στάθμης μεταξύ του ωφέλιμου σήματος και του θορύβου βάθους, καθώς και τη σαφή διάκριση των διαδοχικών τμημάτων της γλωσσικής αλυσίδας. Η ανάδυση συναρτάται με τα βασικά μεγέθη της απόκρισης ενός χώρου, που με τη σειρά τους συνδέονται με τα γνωστότερα υποκειμενικά κριτήρια ακουστικής ποιότητας. [3]

Ο θόρυβος βάθους καλύπτει ένα τμήμα του ωφέλιμου σήματος παρεμβάλλοντας μόνιμα ή ευκαιριακά ένα είδος ηχητικής “μάσκας”. Η βαρύτητα του φαινομένου εξαρτάται από το συχνοτικό φάσμα και την ηχητική έντασή του παρασιτικού σήματος : ειδικά κατά τη θεατρική επικοινωνία, το μασκάρισμα του μηνύματος είναι μια σύνθετη ψυχο-ακουστική διαδικασία, που συναρτάται και με την οπτική άνεση ή την γωνία ακρόασης κάθε θεατή. Έχει αποδειχτεί ότι τα παρασιτικά σήματα με ευρύ ή συνεχές φάσμα τείνουν να εκμηδενίζουν την καταληπτότητα της ομιλίας ακόμη κι όταν απέχουν σχετικά της στάθμης του μηνύματος (έως -20 dB από την ένταση του ωφέλιμου σήματος). Σύμφωνα με αυτή την διαπίστωση, για την αξιολόγηση των θεατρικών χώρων έχει υιοθετηθεί η παρακάτω κατηγοριοποίηση των αριθμητικών τιμών ανάδυσης : εξαιρετική συμπεριφορά (> 25 dB), πολύ καλή συμπεριφορά (20 - 25 dB), μέτρια συμπεριφορά (15 - 20 dB), μη ικανοποιητική συμπεριφορά (< 15 dB). [3], [4], [5]

1. Η έρευνα στα αρχαία ελληνικά θέατρα

Η παρούσα ανακοίνωση αποτελεί μέρος μιας έρευνας παρατηρητηρίου με στόχο την καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης των αρχαίων θεάτρων του ελλαδικού χώρου (αλλοιώσεις, καταστροφές, εργασίες προστασίας) και την αξιολόγηση της ακουστικής τους ποιότητας (πηγές και στάθμες περιβαλλοντικού θορύβου), σε συνθήκες σύγχρονης επαναλειτουργίας. Το δείγμα της έρευνας περιλαμβάνει πλέον

είκοσι (20) αρχαία ελληνικά θέατρα (αλφαβητικά): Αθηναϊκό Διόνυσου Ελευθερέα, Άργους, Αμφιαράειο Ωρωπού, Δελφών, Δήλου, Δίου, Δωδώνης, Επιδάυρου, Ερέτριας, Ζέας, Θάσου, Θήρας, Θορικού, Μαντινείας, Μαρώνειας, Μεγαλόπολης, Μεσσήνης, Λάρισας Α, Ορχομενού Βοιωτίας και Φιλίππων.

Για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους, η έρευνα έχει διετή περίοδο, στην διάρκεια της οποίας τα αρχικά / νέα θέατρα του συνεχώς διευρυνόμενου δείγματος καταγράφονται και συγκρίνονται αναφορικά με τις προηγούμενες παρατηρήσεις και μετρήσεις. Οι αρχικές ηχομετρήσεις / παρατηρήσεις (σε 6 από τα θέατρα του δείγματος) ανάγονται στην προ-διδασκαρική έρευνα μου (περίοδος 1985 - 88, με υποτροφία του ΙΚΥ). Η συστηματική έρευνα παρατηρητηρίου βρίσκεται σε εξέλιξη από το 2004, οπότεν διάφορες φοιτητικές ομάδες του Τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ πραγματοποίησαν ηχομετρήσεις / παρατηρήσεις στο πλαίσιο των προπτυχιακών τους ερευνών :

- Θωμ. Νικάκη - Δημ. Σακούλης (συνολικό δείγμα 10 θεάτρων),
- Ηλ. Αντωνιάδου - Ν. Βαρδαζής - Αν. Μουσή (2 νέα θέατρα, συνολικό δείγμα 4 θεάτρων),
- Αλεξ. Τσατσάκη (3 νέα θέατρα στη Πελοπόννησο),
- Μαρ. Κατσαφάδου - Χρ. Λαγούδας (1 νέο θέατρο, συνολικό δείγμα 4 θεάτρων),
- Μελ. Βυζικά (1 νέο θέατρο, συνολικό δείγμα 3 θεάτρων).

Από το 2009, τα προσωπικά μου έξοδα για τις ετήσιες περιόδους του παρατηρητηρίου χρηματοδοτήθηκαν από το ερευνητικό πρόγραμμα ΤΣΜΕΔΕ (3 νέα θέατρα, συνολικό δείγμα 20 θεατρικών χώρων).

Τα δεδομένα της έρευνας καταγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 1, ο οποίος περιλαμβάνει:

- στη στήλη Α την ονομασία / τοποθεσία κάθε θεάτρου,
- στη στήλη Β την τρέχουσα χρήση του θεατρικού χώρου, με επιμέρους ενδείξεις : Β1 διοργάνωση φεστιβάλ ή ευκαιριακές παραστάσεις, Β2 προσωρινή απαγόρευση για εργασίες στερέωσης, Β3 σε αχρησία ή απαγόρευση παραστάσεων,
- στη στήλη Γ την κατάσταση του κοίλου, με επιμέρους ενδείξεις : Γ1 εξυπηρέτηση θεατών, Γ2 εργασίες στερέωσης, Γ3 απαγόρευση παραστάσεων / απαξίωση,
- στη στήλη Δ την κατάσταση της ορχήστρας, με επιμέρους ενδείξεις : Δ1 εξυπηρέτηση θιάσου, Δ2 εργασίες αποκατάστασης, Δ3 εκτενείς καταστροφές,
- στη στήλη Ε την κατάσταση της σκηνής, με τυπικές ενδείξεις : Ε1 ερείπια θεμελίων, Ε2 τμήμα προσκηνίου ή υποσκηνίου, Ε3 έλλειψη κτίσματος ή υποδομή κινητής σκηνής,

-στη στήλη Ζ την ελάχιστη καταγεγραμμένη στάθμη θορύβου βάρους (min SPL).

Επίσης καταγράφεται συνοπτικά το σύγχρονο περιβάλλον του θεατρικού μνημείου (αστικό / ημι-αστικό, φυσικό) και το είδος / οι τιμές των επιμέρους μόνιμων, περιοδικών ή ευκαιριακών οχλήσεων.

2. Πρόσφατες παρατηρήσεις

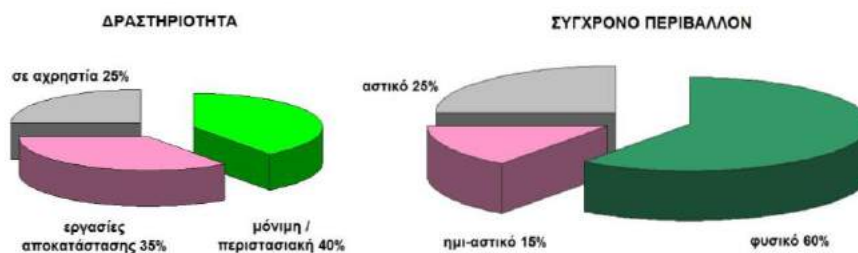
Όπως φαίνεται (Εικ. 2.1), χαρακτηριστικό της τελευταίας περιόδου είναι η πύκνωση των εργασιών συντήρησης σε διάφορους θεατρικούς χώρους (7/20, ποσοστό 35%).

Πίνακας 1. Τα είκοσι (20) αρχαία θέατρα του δείγματος

ΘΕΑΤΡΟ	Β	Γ	Δ	Ε	min SPL
A1 Διόνυσου ΕΛ.	B2	Γ2	Δ2	E2	38
Περιβάλλον - οχλήσεις	αστικό : δραστηριότ. 50-54, απόηχος 41-45				
A2 Θορικού	B1	Γ1	Δ1	E3	34
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : φύση 37 – άνεμος 48-54				
A3 Αμφ. Ωρωπού	B1	Γ3	Δ1	E2	33
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : άνεμος 45 – απόηχος 38-40				
A4 Ερέτριας	B2	Γ3	Δ2	E2	39
Περιβάλλον - οχλήσεις	ημι-αστικό : κυκλοφορία 42-47, δραστηρ. 41				
A5 Δελφών	B3	Γ2	Δ1	E1	34
Περιβάλλον - οχλήσεις	ημι-αστικό : κυκλοφορία 44-46, δραστ. 48-52				
A6 Ορχομενού Β.	B2	Γ3	Δ3	E1	38
Περιβάλλον - οχλήσεις	αστικό : κυκλοφορία 51-56, δραστηρ. 41-43				
A7 Αργους	B1	Γ1	Δ1	E2	37
Περιβάλλον - οχλήσεις	αστικό : κυκλοφορία 46, δραστηριότητες 43				
A8 Επιδαύρου	B1	Γ1	Δ1	E1	29
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : δραστηριότητες 46, άνεμος 36				
A9 Μεγαλόπολης	B2	Γ3	Δ2	E3	39
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : εργασίες 53, άνεμος 41				
A10 Μαντινείας	B3	Γ3	Δ1	E1	36
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : κυκλοφορία 47, δραστηριότητες 52				
A11 Μεσσήνης	B1	Γ3	Δ1	E1	35
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : άνεμος 40, δραστηριότητες 46				
A12 Λάρισας Α	B2	Γ2	Δ1	E2	43
Περιβάλλον - οχλήσεις	αστικό : δραστηρ. 41-43, κυκλοφορία 63-70				
A13 Δίου	B1	Γ3	Δ1	E1	38
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : δραστηριότητες 46, άνεμος 42				
A14 Δωδώνης	B2	Γ2	Δ2	E2	27
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : εργασίες 36, άνεμος 34				
A15 Φιλίππων	B1	Γ1	Δ1	E1	40
Περιβάλλον - οχλήσεις	ημι-αστικό : κυκλοφορία 52, άνεμος 44				
A16 Θάσου	B2	Γ2	Δ2	E1	37
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : απόηχος δραστηριοτήτων 38-44				
A17 Μαρώνειας	B1	Γ1	Δ1	E1	37
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : απόηχος 64-72, άνεμος 45				
A18 Ζέας	B3	Γ2	Δ2	E1	44
Περιβάλλον - οχλήσεις	αστικό : κυκλοφορία 50-53, απόηχος αερ. 67				
A19 Θήρας	B3	Γ3	Δ3	E1	29
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : άνεμος 34-38, απόηχος αερ. 54-58				
A20 Δήλου	B3	Γ3	Δ2	E1	27
Περιβάλλον - οχλήσεις	φυσικό : άνεμος 38-40				

Αυτή η θετική, σε πρώτη προσέγγιση, εξέλιξη ενέχει έναν διπλό κίνδυνο :

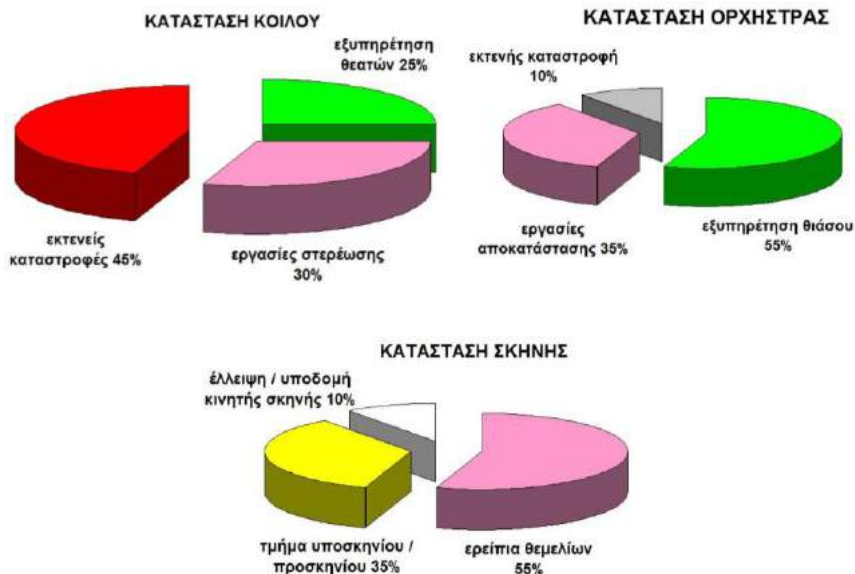
-μια πιθανή επιμήκυνση (ή και επ' αόριστον παράταση) των εργασιών, εξαιτίας της οικονομικής κρίσης, που θα περιορίσει το πλήθος των εν δυνάμει ενεργών θεατρικών χώρων (8/20, ποσοστό 40% του δείγματος),
 -σε σημαντικό ποσοστό (3/9), οι εργασίες στοχεύουν σε αποκατάσταση της οικοδομικής φάσης των ρωμαϊκών επεμβάσεων, που ήταν καταστρεπτικές για την θεατρική και ακουστική λειτουργία του χώρου.



(αριστερά) Εικόνα 2.1 και (δεξιά) Εικόνα 2.2

Ωστόσο, σε γενικές γραμμές, κατά την τελευταία περίοδο καταγράφεται ελαφρά βελτίωση ή στασιμότητα στην οικοδομική, λειτουργική και ακουστική κατάσταση των θεάτρων του δείγματος :

-το υφιστάμενο περιβάλλον τους παραμένει φυσικό (12/20, ποσοστό 6%, Εικ. 2.2),
 -δύνανται να εξυπηρετούν τη συγκέντρωση θεατών στο κούλο, με πλήρη ή περιορισμένη ασφάλεια (11/20, ποσοστό 55%, Εικ 2.3), αλλά και την κίνηση θιάσων στην ορχήστρα (18/20, ποσοστό 90%, Εικ 2.4),



(αριστερά επάνω) Εικόνα 2.3, (δεξιά επάνω) Εικόνα 2.4 και (κάτω) Εικόνα 2.5

-είναι εφικτό να δεχθούν ανακλητές κατασκευές σκηνογραφίας στο χώρο των ερειπίων της σκηνής (11/20), αλλά και σκηνική υποδομή πίσω από την ορχήστρα (συνολικά 13/20, ποσοστό 65%, Εικ 2.5)

3. Η μεθοδολογία της ακουστικής αξιολόγησης

Για την ακουστική αξιολόγηση της σύγχρονης ή εν δυνάμει μελλοντικής επαναλειτουργίας των αρχαίων ελληνικών θεάτρων του δείγματος έχει εκπονηθεί ένα μοντέλο υπολογισμών με τις εξής παραδοχές [6] :

-ο ηθοποιός στέκεται στο βάθος της ορχήστρας (1,7m πάνω από τη στάθμη της, επί του κεντρικού άξονα, στη νοητή ευθεία της προβολής των παρασκηνίων)

-η ένταση της ανθρώπινης φωνής είναι $L_0 = 87 \text{ dB} / 1\text{m}$ και η διάδοση της ακολουθεί τις συνθήκες σφαιρικού κύματος (χωρίς ηλεκτρακουστική ενίσχυση),

-η απομείωση του κατευθείαν ήχου (L_d) συναρτάται από τη απόσταση ηθοποιού – θεατή,

-ο θεατής, ανάλογο με το υφιστάμενο ανάπτυγμα του κοίλου, βρίσκεται σε κεντρική ή πλάγια θέση (1,1m πάνω τη στάθμη της βαθμίδας), σε απόσταση που αντιστοιχεί στο 75% που μέγιστου αξονικού αναπτύγματος του κοίλου (ακτίνα που αναλογεί σε περίπου 85% των υφιστάμενων, θέσεων του κοίλου, με εξαίρεση τις περιπτώσεις τρίτου διαζώματος),

-το ανάκλαστρο της ορχήστρας είναι ενεργό (τελική επίστρωση χωρίς ηχοαπορρόφηση) και ο παράγων παθητικής μεγαφωνικής ενίσχυσης του χώρου είναι $F_{pr} = +3\text{dB}$,

-ο κατά περίπτωση μόνιμος ή περιστασιακός θόρυβος βάθους N_{bf} αυξάνει $+5\text{dB}$, εξαιτίας της παρουσίας κοινού κατά τη διάρκεια της παράστασης,

-οι τελικές τιμές της ανάδυσης R_a δίδονται σε σφαιρικές τιμές decibel σύμφωνα με τον τύπο

$$R_a = L_0 - L_d + \{ F_{pr} \} - \{ N_{bf} + 5 \}$$

-η αποδεκτή στάθμη ανάδυσης του ωφέλιμου σήματος είναι $\min 20\text{dB}$ ($R_a \geq 20 \text{ dB}$).

Μια εναλλακτική προσέγγιση, για συνθήκες περιορισμένης ακουστικής άνεσης, αλλά και με ενεργό το ανάκλαστρο της σκηνογραφίας (ένα ανακλητό σκηνικό πλαίσιο για τις ανάγκες της παράστασης, περίπου 3m πίσω από τον ηθοποιό), το μοντέλο υπολογισμού της ανάδυσης τροποποιείται ως εξής :

-ο θεατής βρίσκεται σε απόσταση που αντιστοιχεί στο 60% που μέγιστου αξονικού αναπτύγματος του κοίλου (ακτίνα που αναλογεί σε περίπου 70% των υφιστάμενων, θέσεων του κοίλου),

-ο παράγων παθητικής μεγαφωνικής ενίσχυσης F_{pr} είναι $+5,5\text{dB}$ (χάρη σε θετικές ηχο-ανακλάσεις από την ορχήστρα, τη σκηνογραφία και το συνδυασμό τους),

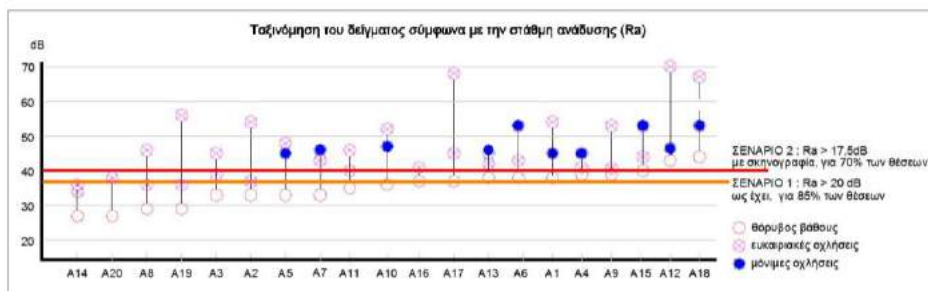
-η αποδεκτή ανάδυση του ωφέλιμου σήματος περιορίζεται σε $17,5\text{dB}$ ($R_a \geq 17,5 \text{ dB}$).

4. Η ακουστική αξιολόγηση του δείγματος

Με βάση το βέλτιστο όριο ανάδυσης ($R_a \geq 20 \text{ dB}$, κίτρινη γραμμή στην Εικ. 4.1) τα θέατρα του δείγματος διαβαθμίζονται ως εξής :

-δύο (2) σε εξαιρετικές ακουστικές συνθήκες ($R_a > 25\text{dB}$) : Δήλος και Θήρα (φυσικό περιβάλλον με περιστασιακές τουριστικές δραστηριότητες)

-επτά (7) σε πολύ καλές ακουστικές συνθήκες ($R_a > 20$ dB) : Αμφιαράειο Ωρωπού, Δωδώνη, Επίδαυρος, Θορικός, Μαντινεία, Μαρώνεια, Μεσσήνη (φυσικό περιβάλλον με περιστασιακές δραστηριότητες ή / και κυκλοφορία),
 -οκτώ (8) σε μέτριες συνθήκες ($R_a > 15$ dB) : Αθηναϊκό Διονύσου, Άργος, Δελφοί, Δίον, Ερέτρια, Θάσος, Μεγαλόπολη, Ορχομενός Βοιωτίας,
 -τρία (3) σε μη αποδεκτές συνθήκες ($R_a < 15$ dB) : Ζέα, Λάρισα, Φίλιπποι (αστικό ή ημιαστικό περιβάλλον με αστικές / αγροτικές δραστηριότητες και κυκλοφορία).



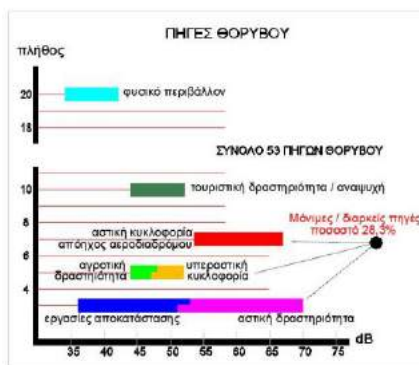
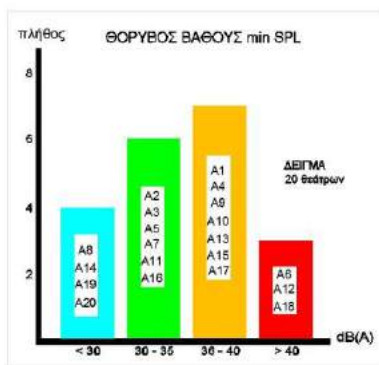
Εικόνα 4.1. Εναλλακτικά σενάρια για την ακουστική αξιολόγηση του δείγματος

Με την εναλλακτική αποτίμηση ($R_a \geq 17,5$ dB, κόκκινη γραμμή στην Εικ. 4.1) η διαβάθμιση των θεάτρων του δείγματος βελτιώνεται ως εξής :

-δεκατρία (13) σε εξαιρετικές ως πολύ καλές ακουστικές συνθήκες ($R_a \geq 20$ dB)
 -πέντε (5) σε ανεκτές / αποδεκτές συνθήκες : Αθηναϊκό Διονύσου, Δίον, Ερέτρια, Μεγαλόπολη, Φίλιπποι (αστικές / αγροτικές δραστηριότητες, κυκλοφορία),
 -δύο (2) σε μη αποδεκτές συνθήκες ($R_a \ll 17,5$ dB) : Ζέα, Λάρισα (αστικό περιβάλλον, κυκλοφορία και δραστηριότητες).

5. Συμπεράσματα

Κατά την τελευταία περίοδο της έρευνας μας εντοπίστηκαν έντονες αστικές πιέσεις (δραστηριότητες, κυκλοφοριακοί θόρυβοι, απόηχοι αεροδιαδρόμων) στο εγγύς περιβάλλον των θεάτρων του δείγματος, (Εικ 5.1 και 5.2).



(αριστερά) Εικόνα 5.1 και (δεξιά) Εικόνα 5.2

Η συστηματική παρατήρηση και καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης των αρχαίων ελληνικών θεάτρων και των θορύβων στο εγγύς περιβάλλον τους μας επιτρέπουν να αξιολογήσουμε τη δυνατότητα εξυπηρέτησης σύγχρονων θεατρικών παραστάσεων, καθώς επίσης και την καταληπτότητα του θεατρικού μηνύματος στις διάφορες θέσεις του κοίλου. Επειδή στις δεδομένες συνθήκες, σημαντικό πρόβλημα της επαναλειτουργίας συνιστά η συστηματική καταστροφή της σκηνής, επιβάλλεται αντισταθμιστικά η πρόβλεψη ενός χαμηλού/ λιτού σκηνικού βάθους (ενός αισθητικά ουδέτερου και κατασκευαστικά ανακλητού φόντου, σε σωστή θέση και κατάλληλο ανάπτυγμα κατά την περίοδο των παραστάσεων). Μια τέτοια εφαρμογή θα μπορούσε να συνεισφέρει κυρίως θετικά (+1,5 ως 3dB, σε συνεργασία με το ενεργό ανάκλαστο της ορχήστρας), αλλά και δευτερευόντως αποθετικά (ως ηχώφραγμα περιορισμένης αποτελεσματικότητας, + 1 ως +2dB) στο εκτεθειμένο τμήμα της ανοικτής κάτοψης των αρχαίων ελληνικών θεάτρων. [3]

Τα παραπάνω υπολογιστικά συμπεράσματα, είναι συντηρητικά. Συχνά οι ηθοποιοί μιας σύγχρονης παράστασης στην προσπάθειά τους να αναπληρώσουν τις ηχητικές απώλειες από την έλλειψη αποτελεσματικού σκηνικού βάθους κινούνται προς το κοίλο, με αποτέλεσμα να ακυρώνεται και το ανάκλαστο της ορχήστρας. Γίνεται λοιπόν φανερό πως, τα γεωμετρικά μεγέθη των αρχαίων ελληνικών θεάτρων του δείγματος, σε συνδυασμό με τα φυσιολογικά, φωνητικά και ακουστικά δεδομένα μιας θεατρικής παράστασης δεν επιτρέπουν την εύρυθμη θεατρική λειτουργία σε συνθήκες ευδιάκριτων οχλήσεων (> 35dB). Η προστασία των αρχαίων θεάτρων και ο στόχος της σύγχρονης επαναλειτουργίας τους, επιβάλλει στην Ελληνική Πολιτεία τη θέσπιση ενός κριτηρίου ησυχίας (ανάλογου των διεθνών ορίων σε μνημεία και χώρους πολιτισμού), την επιβολή αναγκαστικών μέτρων ηχοπροστασίας (για τις υφιστάμενες αστικές ή βιομηχανικές δραστηριότητες) και την υιοθέτηση μέτρων (προσωρινών ή ευκαιριακών) απαγόρευσης της κυκλοφορίας σε μία ευρύτερη πολεοδομική ζώνη, μέχρι την οριστική απομάκρυνση του κυκλοφοριακού φόρτου από την περιοχή.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Μπάρκας, «Η Ακουστική ως παράμετρος σχεδιασμού του Αρχαίου Ελληνικού Θεάτρου», *Μνημείο & Περιβάλλον*, τεύχος 2, σελ. 39 - 56, (1994)
- [2] Fr. Canac, *L'Acoustique des Théâtres Antiques*, éditions CNRS, Paris (1967)
- [3] Ν. Μπάρκας, «Ακουστική άνεση κατά τη σύγχρονη χρήση των αρχαίων ελληνικών θεάτρων : ηχοπροστασία & εφαρμογές σκηνογραφίας», Πρακτικά 1ου Συνεδρίου *Ήπιες Επεμβάσεις & Προστασία Ιστορικών κατασκευών*, τόμος 2ος, σελ. 376 - 390, Θεσσαλονίκη (2004)
- [4] R. Lehmann, *Elements de Physio et de Psychoacoustique*, Dunod, 1969, Paris
- [5] E. Liepp, *Qualités Acoustiques des Lieux d'Ecoute*, CNRS, 1981, Paris
- [6] N. Barkas – N. Vardaxis, “Current operation in Ancient Greek Theatres: the problem of environmental noise”, Proceedings of International Conference EAA “*The Acoustics of Ancient Theatres*”, Patra, (2011).

Συνεδρία Β6: Υποβρύχια ακουστική

Αυτόνομο σύστημα υποβρύχιας ακουστικής καταγραφής*

Π. Παπαδάκης, Γ. Πιπεράκης, Εμμ. Σκαρσουλής, Εμμ. Ορφανάκης
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών,
Ν. Πλαστήρα 100 Βασιλικά Βουτών 70 013 Ηράκλειο Κρήτη,
panos@iacm.forth.gr, piperak@iacm.forth.gr, eskars@iacm.forth.gr
morf@iacm.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο Εργαστήριο Υποβρύχιων Ακουστικών Μετρήσεων του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών του ΙΤΕ αναπτύσσεται ένα χαμηλού κόστους αυτόνομο σύστημα ακουστικής καταγραφής για χρήση στο εσωτερικό της θάλασσας. Το σύστημα αυτό θα αποτελείται από υδρόφωνο και αυτόνομη μονάδα ελέγχου και καταγραφής στο εσωτερικό υδατοστεγούς κελύφους που θα επιτρέπει πόντιση σε βάθη μέχρι 70 m. Το σύστημα ελέγχου και καταγραφής θα είναι προγραμματιζόμενο ώστε να μπορεί να υλοποιήσει διάφορα σχήματα καταγραφής. Το συνολικό σύστημα θα είναι βαθμονομημένο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μετρήσεις θορύβου περιβάλλοντος. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος και περιγράφεται η λειτουργία του και τα χαρακτηριστικά του. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αρχικών δοκιμών στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου.

An autonomous underwater acoustic recorder

ABSTRACT

In the laboratory of Underwater Acoustic Measurements of the Institute of Applied and Computational Mathematics of FORTH a low-cost autonomous system for underwater acoustic recordings is being developed. This system consists of a hydrophone and autonomous control and recording unit inside a waterproof shell allowing operation at depths up to 70 m. The control and recording system will be programmable so it can implement various recording schedules and log formats. The total system will be calibrated so that it can be also used for measurements of ambient noise. The duration of operation will depend on the characteristics of the recording, the battery capacity and the available storage space. In this paper the individual system components are presented and its operation and features are described. Results of initial tests in the experimental laboratory tank are presented and discussed.

* Η εργασία πραγματοποιείται στα πλαίσια της Συμφωνίας Ελληνικού Δημοσίου – Siemens που χρηματοδοτείται εν μέρει από την Προγραμματική Συμφωνία μεταξύ Ερευνητικών Κέντρων -ΓΓΕΤ 2015-2017.

Εισαγωγή

Η παρακολούθηση του θορύβου στο εσωτερικό του θαλάσσιου περιβάλλοντος έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία τα τελευταία χρόνια τόσο στα πλαίσια της βελτίωσης της λειτουργίας ηχοεντοπιστικών συσκευών, όσο και σε σχέση με τη βελτίωση της ποιότητας του θαλάσσιου περιβάλλοντος [1-3]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αυτόνομες συσκευές ακουστικής καταγραφής [4-5].

Συσκευές καταγραφής που διατίθενται στο εμπόριο είναι ακριβές, με τιμές περί τα 10Κ€, ο πηγαίος κώδικας προγραμματισμού τους δεν είναι διαθέσιμος, ενώ είναι δύσκολο να γίνουν αλλαγές στα επί μέρους τμήματα και υποσυστήματά τους. Αν και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας (συχνότητα δειγματοληψίας, μέγιστο βάθος, αποθηκευτικός χώρος κλπ) εξαρτώνται από τον κατασκευαστή, τα αυτόνομα καταγραφικά συνήθως αποτελούνται από τουλάχιστο ένα υδρόφωνο τοποθετημένο έξω από ένα υδατοστεγές κέλυφος. Το αναλογικό σήμα του υδροφώνου μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω μιας κάρτας καταγραφής και τα δεδομένα αποθηκεύονται σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο (σκληρός δίσκος, κάρτα SD, κλπ). Μπαταρίες που συνήθως τοποθετούνται μέσα στο ίδιο κέλυφος τροφοδοτούν το σύστημα. Ο προγραμματισμός του συστήματος γίνεται από έναν μικροϋπολογιστή.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η κατασκευή ενός πρωτοτύπου αυτόνομου προγραμματιζόμενου καταγραφικού για επιστημονική χρήση που θα έχει χαμηλό κόστος και θα χαρακτηρίζεται από ευελιξία, δίνοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και χρήσης συσκευών και υλικών που είναι διαθέσιμα στην αγορά. Στην συνέχεια θα παρουσιασθούν τα επιμέρους στοιχεία του καταγραφικού, τα χαρακτηριστικά τους και η λειτουργία τους και θα παρουσιασθούν αρχικά πειράματα στο Εργαστήριο του ΙΥΜ που αφορούν στις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος και στη βαθμονόμηση του.

1. Περιγραφή των στοιχείων του αυτοκαταγραφικού συστήματος

Τα στοιχεία που αποτελούν το υπό μελέτη σύστημα είναι ένα υδρόφωνο, ένας μικροϋπολογιστής, μια κάρτα ήχου, μια συσκευή διαχείρισης της ενέργειας και ένα πακέτο τροφοδοσίας (μπαταρίες). Παρακάτω αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

1.1 Υδρόφωνο H2c

Πρόκειται για ένα πυκνωτικό υδρόφωνο κατάλληλο για καταγραφές στο ακουστικό φάσμα, χαμηλού κόστους, χαμηλού θορύβου που έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά σύμφωνα με τον κατασκευαστή (*Aquarian Audio Products*):

- **Εναισθησία:** -180 dB re 1 V/μPa (+/- 4dB, 20 Hz - 4 KHz). Η εναισθησία του υδροφώνου στις υψηλές συχνότητες είναι περίπου -220 dB re 1V/μPa.
- **Εύρος συχνότητας:** 10 Hz -100 kHz
- **Μέγιστο βάθος λειτουργίας:** 80 m

1.2 Μητρική Raspberry Pi 3 Model B

Το Raspberry Pi 3 Model B αποτελεί την τρίτη γενιά των mini PC εξαιρετικά μικρού μεγέθους της Raspberry. Συγκριτικά με την πρωταρχικό Raspberry Pi, προσφέρει ταχύτερο επεξεργαστή και διπλάσια μνήμη, που φτάνει συνολικά το 1 GB. Έχει υποδοχή Micro-SD, 4 USB ports, HDMI και Ethernet και λειτουργικό Linux. Τροφοδοτείται μέσω USB θύρας (5V). Διαθέτει 40 GPIO ακίδες στις οποίες μπορούν να συνδεθούν κάρτες που επιτελούν εξειδικευμένες εργασίες όπως οι παρακάτω:

1.3 Κάρτα ήχου Cirrus Logic.

Η κάρτα ήχου της Cirrus Logic, κατάλληλη για τις μητρικές Raspberry Pi έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απόδοση και καταγραφή ήχου HD, 16-bit ή 24-bit, συχνότητα δειγματοληψίας μέχρι 192 kHz
- Υποδοχή 3,5 mm (4-pole) για ακουστικά / μικρόφωνο
- Υποδοχή 3,5 mm (Stereo Line Input) για εγγραφή ήχου υψηλής ποιότητας με δυνατότητα ενίσχυσης από 0 έως 31 dB.
- Υψηλό SNR (Λόγος σήματος προς θόρυβο) για αναπαραγωγή υψηλής ποιότητας και εγγραφής

1.4 Κάρτα Witty Pi: Realtime Clock + Power Management for Raspberry Pi

Πρόκειται για μία κάρτα που συνδέεται στη μητρική Raspberry Pi και μπορεί να προσθέσει λειτουργία ρολογιού πραγματικού χρόνου καθώς και διαχείριση τροφοδοσίας της μητρικής. Γενικά δίνει την δυνατότητα:

- Ενεργοποίησης/απενεργοποίησης του Raspberry Pi μέσω ενός διακόπτη.
- Λειτουργίας ρολογιού στο Raspberry Pi – το Raspberry Pi από μόνο του δεν περιλαμβάνει ρολόι και παίρνει δεδομένα χρόνου μόνο όταν είναι συνδεδεμένο στο Internet.
- Επακριβούς προγραμματισμού της εκκίνησης/τερματισμού του Raspberry Pi και όλων των συνδεδεμένων καρτών/περιφερειακών σε τακτά χρονικά διαστήματα ή μέσω αρχείου χρόνων έναρξης/ τερματισμού (script).

2. Αρχικές δοκιμές στη δεξαμενή του εργαστηρίου του IYM

Πριν την συναρμολόγηση του καταγραφικού και την τοποθέτηση του σε υδατοστεγές κέλυφος, έγιναν αρχικές δοκιμές για να ελεγχθεί η λειτουργία των στοιχείων του συστήματος και να βαθμονομηθεί το υδρόφωνο. Στην αρχή διαπιστώθηκε ο τρόπος λειτουργίας της κάρτας ήχου και μετά βαθμονομήθηκε το υδρόφωνο σε σύγκριση με το υδρόφωνο TC4032 της RESON, ένα χαμηλού θορύβου και αξιόπιστο υδρόφωνο του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά.

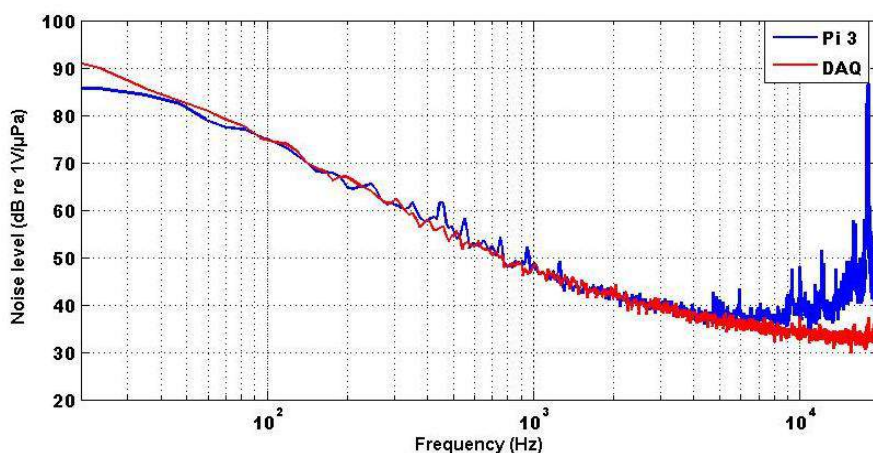
2.1 Λειτουργία της κάρτας ήχου

Η κάρτα ήχου εμπεριέχει ενισχυτή, με εύρος ενίσχυσης από 0 έως 31dB. Η ακριβής ενίσχυση καθορίζεται μέσω εντολής του λειτουργικού συστήματος της

μητρικής. Για να διερευνηθεί η λειτουργία της συνδέθηκε η κάρτα στη μητρική και στην είσοδο μικροφώνου συνδέθηκε μία γεννήτρια κυματομορφών (TGA1241 της TTI). Ένα συνεχές (CW) σήμα σε επιλεγμένες συχνότητες στο ακουστικό φάσμα στάλθηκε από την γεννήτρια και καταγράφηκε σαν WAV αρχείο στο Pi 3. Παρατηρήθηκε ότι η απόκριση του ενισχυτή ήταν σταθερή και ανεξάρτητη της συχνότητας για συχνότητες 100 Hz – 20 kHz. Εν τούτοις για συχνότητες μικρότερες των 100 Hz παρατηρήθηκαν αποκλίσεις που έφθασαν έως 1.5 dB

Επίσης ελέγχθηκε η απόκριση του ενισχυτή καθώς η τάση της μπαταρίας που τροφοδοτεί το Pi 3 μεταβάλλεται. Πραγματοποιήθηκε έλεγχος κατά τον οποίο η τάση μειωνόταν σταδιακά από τα 5 volts μέχρι τα 3.3 volts, τάση στην οποία το σύστημα παύει να λειτουργεί. Διαπιστώθηκε ότι η απόκριση του ενισχυτή παρέμεινε αμετάβλητη σε όλο το εύρος τάσεων τροφοδοσίας.

Τέλος έγιναν συγκριτικές καταγραφές θορύβου στο εργαστήριο με το TC4032 συνδεδεμένο στην αρχή με ενισχυτή (EC6081 της Reson) - με ενίσχυση 30dB - και με μια υψηλής ταχύτητας κάρτα καταγραφής (Spectrum Mi2), και κατόπιν με το Pi 3 και την κάρτα ήχου Cirrus Logic - με ενίσχυση 30dB. Ο σκοπός αυτού του ελέγχου ήταν η σύγκριση του υπό εξέταση συστήματος καταγραφής (κάρτα ήχου Cirrus Logic και Raspberry Pi 3) με ένα κλασικό σύστημα καταγραφής DAQ υψηλής αξιοπιστίας (EC6081 και Spectrum Mi2). Και οι δύο καταγραφές έγιναν με συχνότητα δειγματοληψίας 96 kHz. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Επίπεδα θορύβου από μετρήσεις με το TC4032 με δύο διαφορετικές κάρτες καταγραφής: Με την Spectrum Mi2 (κόκκινη γραμμή) και την Cirrus Logic (μπλε)

Παρατηρούμε ότι οι καταγραφές είναι σχεδόν ταυτόσημες εκτός από μια περιοχή κοντά στα 20kHz. Η διαφορά αυτή μάλλον οφείλεται σε aliasing – στις καταγραφές με την κάρτα Spectrum υπήρχε φίλτρο (anti-aliasing) στα 25 kHz.

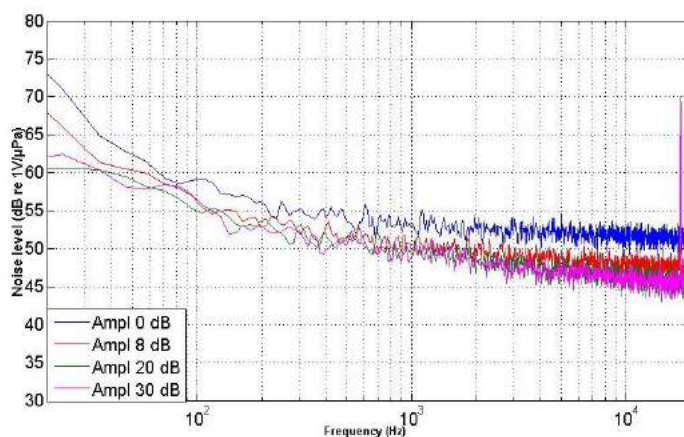
Παρατήρηση 1: Επειδή τα αρχεία καταγραφής (WAV) είναι κανονικοποιημένα με τιμές από -1 έως 1, υπολογίστηκε για κάθε επίπεδο ενίσχυσης ο αντίστοιχος συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι τιμές του WAV αρχείου ώστε να αντιστοιχούν σε mVolts. Για παράδειγμα, για ενίσχυση 30dB προέκυψε συντελεστής 229.

Παρατήρηση 2: Σε όλες της καταγραφές η ανάλυση της κάρτας τέθηκε στα 24 bit, η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 96kHz και χρησιμοποιήθηκε ένα κανάλι καταγραφής. Η διάρκεια καταγραφής ήταν 4 δευτερόλεπτα αποθηκευμένα σε δύο αρχεία WAV των 2 δευτερολέπτων το καθένα, ενώ για τις αναλύσεις και χρησιμοποιήθηκε μόνο το δεύτερο αρχείο. Ο λόγος ήταν ένα έντονο παρασιτικό σήμα που εμφανιζόταν στην αρχή της καταγραφής - στο πρώτο δηλαδή αρχείο - και το οποίο χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Η τροφοδοσία του συστήματος γινόταν από συστοιχία μπαταριών με ονομαστική τάση 4.5V.

2.2 Βαθμονόμηση του υδροφώνου H2c

Για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του υδροφώνου έγινε σύγκριση των σημάτων από το H2c με εκείνα του υδροφώνου TC4032 το οποίο είναι χαμηλού θορύβου και βαθμονομημένο.

Κατ' αρχάς έγιναν πειράματα για να διαπιστωθεί πάνω από ποιο επίπεδο ενίσχυσης το σήμα που καταγράφεται από το H2c δεν περιέχει ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο (EMI). Ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος είναι αθροιστικός θόρυβος που δεν υπόκειται σε ενίσχυση. Όταν η ενίσχυση είναι αρκούντως υψηλή και το ενισχυμένο ακουστικό σήμα είναι δυνατότερο από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο τότε η μετέπειτα αφαίρεση της ενίσχυσης αναδεικνύει το σήμα, με φασματική πυκνότητα που δεν εξαρτάται από το βαθμό ενίσχυσης. Διαφορετικά, αν η ενίσχυση είναι μικρή και ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος υπερκαλύπτει το σήμα τότε η μετέπειτα αφαίρεση της ενίσχυσης δημιουργεί ψευδή εικόνα της φασματικής πυκνότητας η οποία μάλιστα εξαρτάται από την ενίσχυση (όσο μικρότερη η ενίσχυση τόσο μεγαλύτερη η φασματική πυκνότητα). Έγιναν λοιπόν καταγραφές θορύβου με το H2c συνδεδεμένο με την κάρτα ήχου στο Pi 3 με διαφορετικές ενισχύσεις. Τα αποτελέσματα των καταγραφών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Καταγραφή θορύβου με το H2c για διάφορες τιμές ενίσχυσης

Παρατηρούμε ότι ήδη με ενίσχυση 20 dB και πάνω η τελική φασματική πυκνότητα (μετά την αφαίρεση της ενίσχυσης) δεν μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει ότι ενίσχυση της τάξης των 20 ή 30 dB είναι απαραίτητη. Να σημειωθεί ότι οι τιμές θορύβου στο σχήμα 2.2 δεν είναι οι ακριβείς εφόσον η ευαισθησία του H2c δεν

είναι ακόμα γνωστή και για στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε μια τυπική τιμή (-180 dB).

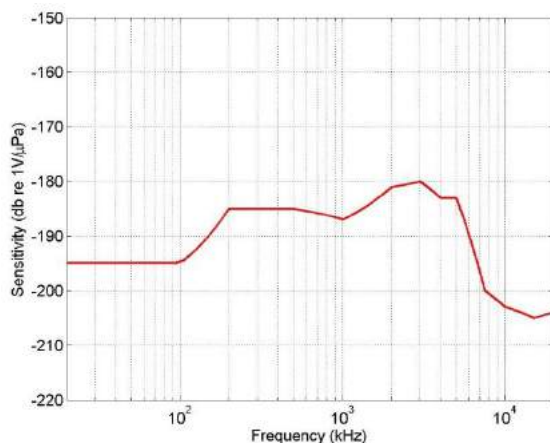
Για τον υπολογισμό της ευαισθησίας του H2c χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της σύγκρισης με την ευαισθησία του TC4032 του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά. Συγκεκριμένα το υδρόφωνο του οποίου εξετάζεται η ευαισθησία τοποθετείται στη δεξαμενή σε μικρή απόσταση από μία πηγή η οποία εκπέμπει ένα συνεχές σήμα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτό γίνεται και για άλλες συχνότητες στο ακουστό φάσμα. Κατόπιν στη θέση του υδροφώνου τοποθετείται το TC4032 και επαναλαμβάνονται οι καταγραφές. Στο τέλος συγκρίνονται τα σήματα και υπολογίζεται η ευαισθησία του υδροφώνου για κάθε μία από τις συχνότητες εκπομπής.

Στη περίπτωση μας έγιναν καταγραφές με δύο διαφορετικές πηγές, το TC4033 της Reson και το P3s και σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή. Το P3s είναι ένας πιεζοηλεκτρικός μορφοτροπέας αποτελούμενος από 3 πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και ο οποίος κατασκευάστηκε στο εργαστήριο του ΙΥΜ. Με το P3s ήταν δυνατόν να σταλεί σήμα σε χαμηλότερες συχνότητες από ότι με το TC4033. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Ευαισθησία υδροφώνου H2c

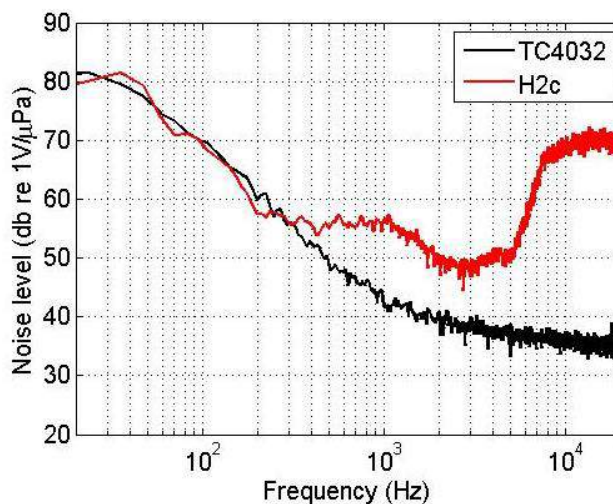
Συχνότητα εκπομπής πηγής (Hz)	Ευαισθησία (dB) του H2c	
	Με πηγή το P3s	Με πηγή το TC4033
20000	-204	-205
15000	-205	-208
10000	-203	-204
7500	-200	-200
5000	-183	-184.5
4000	-183	-185
3000	-180	-183.5
2000	-181	-181
1000	-187	-183.5
500	-185	
200	-185	

Παρατηρούμε ότι η ευαισθησία του H2c είναι συγκρίσιμη και με τις δύο πηγές. Στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκε η ευαισθησία που υπολογίστηκε με πηγή το P3s και που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή απόκλιση από τις τιμές που δίνονται από τον κατασκευαστή η οποία μπορεί να οφείλεται στη χρήση επιπλέον καλωδίου (περίπου 10 μέτρα) για την σύνδεση του με το Pi 3.



Σχήμα 2.3 Ευαισθησία του υδροφώνου H2c

Τέλος έγιναν καταγραφές του θορύβου της δεξαμενής με το TC4032 και το H2c, για το τελευταίο λαμβάνοντας υπόψη τη συνάρτηση ευαισθησίας που μόλις υπολογίστηκε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Καταγραφή θορύβου με το TC4032 (μαύρη γραμμή) και το H2c (κόκκινη)

Παρατηρούμε ότι στις χαμηλές συχνότητες (μέχρι τα 300 Hz) και τα δύο υδρόφωνα καταγράφουν το ίδιο επίπεδο θορύβου. Για μεγαλύτερες συχνότητες παρατηρούμε ότι το H2c υπερεκτιμά τον θόρυβο της δεξαμενής. Αυτό οφείλεται στον αυτοθόρυβο του υδροφώνου (self-noise). Άρα το H2c μπορεί να καταγράψει θόρυβο αν αυτός υπερβαίνει το επίπεδο θορύβου που ορίζεται από την κόκκινη γραμμή του σχήματος 2.4

Σε όλες τις ανωτέρω μετρήσεις η μητρική Pi 3 χρησιμοποιήθηκε με την κάρτα ήχου Cirrus Logic αλλά χωρίς την κάρτα Witty Pi. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν και

οι δύο κάρτες πάνω στη μητρική και δοκιμάστηκαν οι δυνατότητες της κάρτας χρόνου με την διενέργεια καταγραφών με τροφοδοσία σε αυτήν και όχι στο Pi 3, ούτως ώστε να ελέγχει η κάρτα αυτή το πότε θα ανοίγει και κλείνει ο μικροϋπολογιστής. Για να δοκιμασθεί αυτή η δυνατότητα έγιναν τρεις καταγραφές σήματος διάρκειας 4 δευτερολέπτων ανά 3 λεπτά. Μετά από κάθε καταγραφή η κάρτα χρόνου Witty Pi είχε προγραμματιστεί να κλείνει την μητρική για ένα λεπτό και να την επανεκκινεί μετά για 2 λεπτά. Αυτό επαναλήφθηκε 3 φορές αλλά μπορούσε να επαναληφθεί και περισσότερες. Γενικά οι δυνατότητες διαχείρισης και προγραμματισμού της τροφοδοσίας μέσω του Witty Pi δίνουν στο χρήστη του καταγραφικού τον πλήρη έλεγχο του τρόπου χρήσης του.

Παρατήρηση: Όταν έγινε προσπάθεια να τοποθετηθεί η κάρτα Witty Pi για πρώτη φορά υπήρξαν προβλήματα συμβατότητας των δύο καρτών λόγω χρήσης της ίδιας ακίδας (pin) και από τις δύο κάρτες. Μετά από επικοινωνία με τον κατασκευαστή (Witty Pi) βρέθηκε λύση με την μεταφορά της σύνδεσης της συγκεκριμένης ακίδας σε άλλη ελεύθερη υποδοχή στο Pi 3. Μετά την επίλυση του προβλήματος έγιναν καταγραφές και με τις δύο κάρτες πάνω στο μητρική χωρίς κανένα πρόβλημα.

3. Συμπεράσματα

Οι αρχικές δοκιμές του συστήματος έδειξαν ότι είναι δυνατή η κατασκευή ενός αυτοκαταγραφικού χαμηλού κόστους με συνδυασμό οικονομικών συστημάτων και αισθητήρων που υπάρχουν στην αγορά – στην προκειμένη περίπτωση το κόστος της μητρικής και των δύο καρτών (ήχου και ρολογιού) είναι της τάξης των 100 € ενώ του υδροφώνου H2c 250 €. Με βάση το επίπεδο αυτοθορύβου που καταγράφηκε για το συγκεκριμένο σύστημα, και το οποίο αντιστοιχεί περίπου σε κατάσταση θάλασσας 1 (μέχρι τα 3 kHz), μπορεί να γίνει καταγραφή θορύβου περιβάλλοντος για κατάσταση θάλασσας 2 ή μεγαλύτερη. Αυτό θα μπορούσε να βελτιωθεί με τη χρήση ενός καλύτερης ποιότητας υδροφώνου. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και την τοποθέτηση του αυτοκαταγραφικού σε υδατοστεγές κέλυφος θα πραγματοποιηθούν ανάλογες δοκιμές για την τελική καταγραφή των χαρακτηριστικών του όλου συστήματος.

4. Αναφορές

[1] K. Luckel, et al “International harmonization of approaches to define underwater noise exposure criteria” J. Acoust. Soc. Am. **135**, 2404 (2014).

[2] T. B. Gabrielson “Underwater acoustics at the Naval Air Development Center” J. Acoust. Soc. Am. **137**, 2307 (2015)

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

[4] Develogic GmbH. Sono. Vault Acoustic Recorder and Signal Analyzer. Available from: <http://www.develogic.de/wp-content>

[5] Multi-Électronique (MTE) Inc. AURAL-M2. Specification Sheet. Available from: http://www.multi-electronique.com/files/AURALspecsheets_EN.pdf

Ανάπτυξη μεθόδων αντιστροφής για την ανάκτηση γεωακουστικών χαρακτηριστικών από ηχητικές ανακλάσεις*

Π. Παπαδάκης, Γ. Πιπεράκης
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ν. Πλαστήρα 100, Βασιλικά
Βουτών, 70 013 Ηράκλειο Κρήτη,
panos@iacm.forth.gr , piperak@iacm.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει την ανάπτυξη μεθόδων αντιστροφής για την ανάκτηση των ιδιοτήτων του θαλάσσιου πυθμένα με δεδομένα τον συντελεστή ανάκλασης επιπέδων κυμάτων για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι αντιστροφές βασίστηκαν στη μελέτη του ευθέως προβλήματος του υπολογισμού του συντελεστή ανάκλασης επίπεδου κύματος από πυθμένα με δυο μη παράλληλα στρώματα. Ο καθορισμός περιοχών για κάθε παράμετρο και η αναζήτηση της καλύτερης προσέγγισης των παραμέτρων με λεπτομερή διαμερισμό κάθε περιοχής είναι η απλούστερη μορφή αντιστροφής. Όμως ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων του προβλήματος κάνει απαγορευτική υπολογιστικά μια τέτοια γενική μέθοδο. Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία αυτή «διαίρει» το πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα με μικρότερο αριθμό αγνώστων ώστε η αναζήτηση προσεγγιστικής λύσης να είναι εφικτή σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Inverse methods for estimation of geoaoustic characteristics from sound reflections

ABSTRACT

This work includes the development of inversion methods for retrieving the properties of a seabed using as data the reflection coefficient of a plane wave for different angles of incidence from a sea floor consisting of two non-parallel layers. The definition of areas for each parameter and the systematic search of their best approximation with detailed partition of each area is the simplest form of inversion. But the number of unknown parameters of the problem makes computationally prohibitive such a method. The method proposed in this paper 'divides' the problem into individual problems with smaller number of unknowns so that the search of an approximate solution to be feasible within a reasonable period of time.

* Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΦΥΚΑ της Δράσης ΚΡΗΠΙΣ της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα.

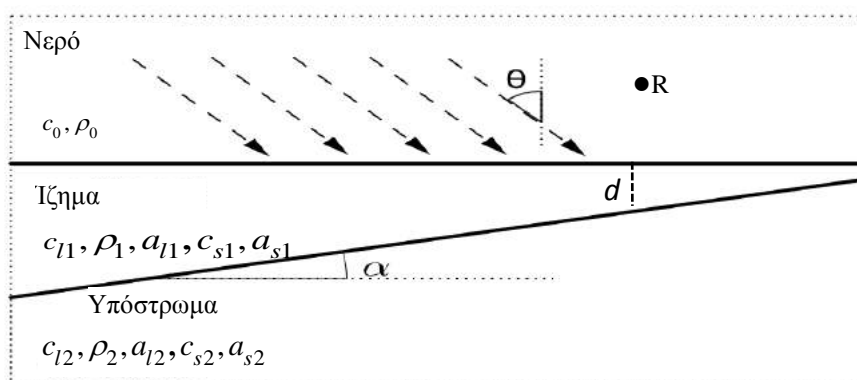
Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη μελέτη περιλαμβάνει την ανάπτυξη μεθόδων αντιστροφής για την ανάκτηση των ιδιοτήτων του θαλάσσιου πυθμένα με δεδομένα τον συντελεστή ανάκλασης επιπέδων κυμάτων για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Οι αντιστροφές βασίστηκαν στη μελέτη του ευθέως προβλήματος του υπολογισμού του συντελεστή ανάκλασης επίπεδου κύματος από πυθμένα που αποτελείται από δύο στρώματα των οποίων η διεπιφάνεια δεν είναι παράλληλη στην διεπιφάνεια μεταξύ του νερού και του πρώτου στρώματος. Επίσης ελήφθη υπ όψιν το γεγονός ότι οι αντιστροφές πρέπει να είναι κατάλληλες ώστε με μικρές αλλαγές να μπορούν να εφαρμοστούν σε δεδομένα από εργαστηριακά πειράματα ανάκλασης ή και από πειράματα in-situ. Δοκιμάστηκαν ντετερμινιστικές μέθοδοι και στοχαστικές μέθοδοι. Το πλήθος των αγνώστων και το γεγονός ότι οι κάποιες από τις παραμέτρους εξαρτώνται από κάποιες άλλες, είχαν σαν αποτέλεσμα στοχαστικές μέθοδοι να είναι πολύ χρονοβόρες και να μην οδηγούν σε ακριβή αποτελέσματα.

Ο καθορισμός περιοχών για κάθε παράμετρο και η συστηματική αναζήτηση της καλύτερης προσέγγισης των παραμέτρων με λεπτομερή διαμερισμό κάθε περιοχής είναι η απλούστερη μορφή αντιστροφής. Όμως ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων του προβλήματος (12 στην γενική περίπτωση) κάνει απαγορευτική υπολογιστικά μια τέτοια γενική μέθοδο. Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία αυτή «διαιρεί» το πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα με μικρότερο αριθμό αγνώστων ώστε η αναζήτηση προσεγγιστικής λύσης να είναι εφικτή σε εύλογο χρονικό διάστημα.

1. Σύντομη περιγραφή του ευθέως προβλήματος

Το μοντέλο του προβλήματος δίνεται στο Σχήμα 1.1. Ένα επίπεδο κύμα συχνότητας f , με γωνία πρόσπτωσης θ διαδίδεται μέσα στο νερό και ανακλάται από τον πυθμένα ο οποίος αποτελείται από δύο στρώματα: Ένα ίζημα και ένα ημίαιπρο υπόστρωμα που η διεπιφάνεια τους δεν είναι παράλληλη με την διεπιφάνεια νερού – ιζήματος.



Σχήμα 1.1: Το μοντέλο του ευθέως προβλήματος.

Στην ανάλυση που ακολουθεί τα υλικά του πυθμένα θεωρούνται ελαστικά. Ο δέκτης θεωρείται τοποθετημένος είτε μέσα στη στήλη του νερού είτε πάνω στην διεπιφάνεια νερού - ιζήματος στο σημείο R . Η επικλινή διεπιφάνεια μπορεί να έχει είτε θετική κλίση (όπως στο Σχήμα 1.1) είτε αρνητική ανάλογα αν η γωνία α είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα. Το πάχος του ιζήματος κάτω από τον δέκτη είναι d .

Ο συντελεστής ανάκλασης δίνεται από τον τύπο:

$$RC = \sum_{N=0}^{NMAX} R_n \exp(i\omega D_N) \quad (1.1)$$

όπου $NMAX$ είναι ο μέγιστος αριθμός κυμάτων που φθάνουν στον δέκτη και D_N είναι η διαφορά φάσης κάθε κύματος. Οι συντελεστές R_n εξαρτώνται από τις παραμέτρους των υλικών και την γωνία πρόσπτωσης του κύματος στο σημείο υπολογισμού τους [1].

Γενικά ο συντελεστής ανάκλασης RC εξαρτάται από:

1. Την συχνότητα του επιπέδου κύματος f και την γωνία πρόσπτωσης θ .
2. Την θέση του δέκτη, (x_R, y_R) την ταχύτητα του ήχου στο νερό c_0 και την πυκνότητα του νερού ρ_0 .
3. Τις ταχύτητες των ακουστικών και ελαστικών κυμάτων στο ιζήμα και στο υπόστρωμα $c_{11}, c_{12}, c_{s1}, c_{s2}$, τις αντίστοιχες πυκνότητες ρ_1, ρ_2 , τους συντελεστές απορρόφησης στα δύο υλικά $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{s1}, \alpha_{s2}$, το πάχος του ιζήματος κάτω από τον δέκτη d και την γωνία α της διεπιφάνειας των δύο υλικών.

Σε ένα τυπικό πρόβλημα αντιστροφής, οι παράμετροι της λίστας 1 και 2 είναι συνήθως γνωστές ενώ εκείνες της λίστας 3 όχι. Συμβολίζουμε με \bar{u} το διάνυσμα των παραμέτρων της λίστας 2 και με \bar{x} το διάνυσμα αυτών της λίστας 3.

$$\bar{u} = (c_0, \rho_0, x_R, y_R), \quad \bar{x} = (c_{11}, c_{12}, c_{s1}, c_{s2}, \rho_1, \rho_2, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{s1}, \alpha_{s2}, d, \alpha)$$

Άρα ο συντελεστής ανάκλασης είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$RC = RC(\theta, f, \bar{u}, \bar{x}) \quad (1.2)$$

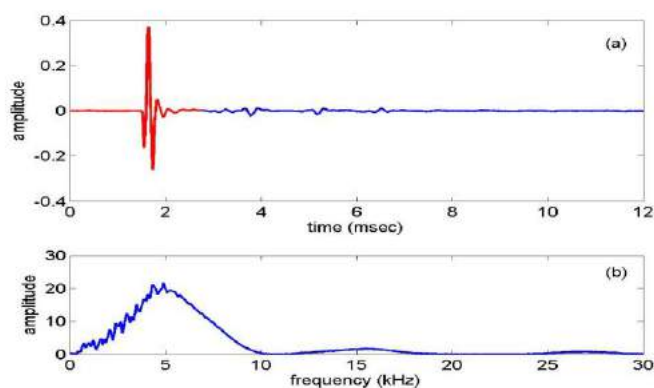
και συνήθως είναι γνωστός για διάφορες τιμές της γωνίας θ . Το αντίστροφο λοιπόν πρόβλημα είναι ή εύρεση τιμών του \bar{x} έτσι ώστε οι τιμές του RC όπως υπολογίζονται από την (1.2) να είναι κοντά στις γνωστές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για όλες τις τιμές της θ όπου έχει μετρηθεί. Η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο αντιστροφής δίνεται από τον τύπο:

$$CF(\bar{x}) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N (|RC_{metr}(\theta_k, f, \bar{u})| - |RC(\theta_k, f, \bar{u}, \bar{x})|)^2} \quad (1.3)$$

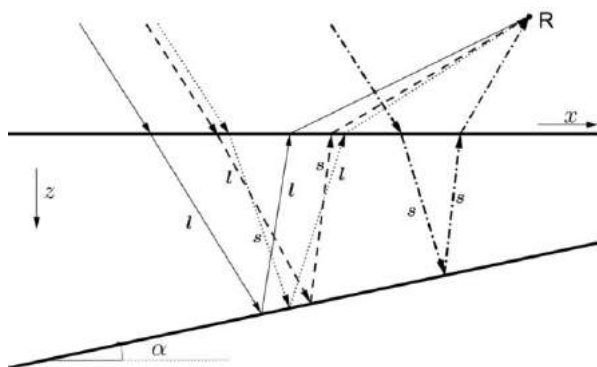
όπου RC_{metr} είναι οι γνωστές τιμές του συντελεστή ανάκλασης. Ο συντελεστής ανάκλασης είναι μιγαδικός αριθμός. N είναι ο αριθμός των γωνιών.

2. Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές σχετικές με την μορφή των δεδομένων που την καθιστούν ικανή να χρησιμοποιηθεί με δεδομένα από εργαστηριακά και in-situ πειράματα. Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως παλμοί μικρής διάρκειας, που εκπέμπονται είτε από σημειακή πηγή ή παραμετρική συστοιχία πηγών, και οι οποίοι μετά την ανάκλαση τους από τον πυθμένα καταγράφονται από έναν ή περισσότερους δέκτες. Στο Σχήμα 2.1 παρατηρούμε μια τυπική καταγραφή ενός τέτοιου σήματος. Η πηγή εξέπεμψε παλμό διάρκειας 0.5 msec με κεντρική συχνότητα 5 kHz. Το σήμα αποτελείται από μία σειρά παλμών που αντιστοιχούν στις ανακλάσεις από τον πυθμένα (Σχήμα 2.2). Ο πρώτος παλμός (κόκκινο χρώμα) είναι η ανάκλαση του εκπεμπόμενου παλμού στην διεπιφάνεια νερού και ιζήματος και οι επόμενοι στην ανάκλαση από την διεπιφάνεια ιζήματος και υποστρώματος των ακουστικών (ll), συνδυασμό ακουστικών και ελαστικών (ls και sl) και ελαστικών κυμάτων (ss).



Σχήμα 2.1: (a) Καταγραφή σήματος σε εργαστηριακό πείραμα. (b) Το φάσμα του.



Σχήμα 2.2: Οι συνδυασμοί των ακουστικών (l) και των ελαστικών (s) μετά από μία ανάκλαση στη διεπιφάνεια ιζήματος και υποστρώματος.

Είναι προφανές (σχήμα 2.1) ότι παλμοί που αντιστοιχούν σε πάνω από μία ανακλάσεις δεν έχουν καταγραφεί οπότε στην αναλυτική μορφή του συντελεστή ανάκλασης που θα χρησιμοποιηθεί (Τύπος 1.1) το NMAX είναι το πολύ 1.

Επίσης παρατηρούμε ότι αν χρησιμοποιηθεί μόνο ο πρώτος παλμός από το σχήμα 2.1 (κόκκινο χρώμα) που αντιστοιχεί στην ανάκλαση από την διεπιφάνεια νερού και ιζήματος, αυτό αντιστοιχεί στον πρώτο όρο του αθροίσματος (N=0) στο τύπο 1.1. Στη περίπτωση αυτή το RC περιέχει μόνο τις παραμέτρους του πρώτου στρώματος (πυκνότητα ρ_1 , ταχύτητα ακουστικών κυμάτων c_{1l} , ταχύτητα ελαστικών κυμάτων c_{s1} , και οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης a_{1l} και a_{s1}).

Τέλος η παραμετρική ανάλυση που έγινε [2], έδειξε ότι κάποιες από τις παραμέτρους επηρεάζουν περισσότερο την τιμή του συντελεστή ανάκλασης από κάποιες άλλες. Για παράδειγμα ο συντελεστής απορρόφησης των ελαστικών κυμάτων δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τον συντελεστή ανάκλασης. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η εξάρτηση του συντελεστή ανάκλασης από κάποιες παραμέτρους αλλάζει ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης του επίπεδου κύματος.

Με γνώμονα αυτές τις παρατηρήσεις η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 4 βήματα που θα εξετασθούν παρακάτω σε ένα παράδειγμα. Θα γίνει προσπάθεια να προσεγγισθούν οι παράμετροι που φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Αυτό το παράδειγμα πυθμένα που αποτελείται από δύο στρώματα που επιτρέπουν την διάδοση ελαστικών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [1] και προσομοιάζει ένα ρεαλιστικό θαλάσσιο πυθμένα αποτελούμενο από ένα στρώμα αργιλούχου πηλού πάνω από ένα υπόστρωμα χονδρής άμμου. Η πυκνότητα του νερού (1000 Kgr/cm³) και η ταχύτητα των ακουστικών κυμάτων (1450 m/sec) του νερού θεωρούνται γνωστά. Επίσης γνωστή είναι και η θέση του δέκτη 5 μέτρα πάνω από τον πυθμένα.

Πίνακας 2.1. Οι άγνωστοι παράμετροι του πυθμένα.

	Στρώματα Πυθμένα	
	Αργιλούχος πηλός	Χονδρή άμμος
ρ (Kgr / cm ³)	1300	2000
c_l (m / sec)	1485	1800
a_l (dB / λ)	0.1	0.9
c_s (m / sec)	125	470
a_s (dB / λ)	0.1	0.2
Γωνία της κλίσης της διεπιφάνειας		$\alpha=5^\circ$
Πάχος ιζήματος κάτω από τον δέκτη		d=1m

Επίπεδο κύμα συχνότητας 5 kHz σε μορφή παλμού μικρής διάρκειας προσπίπτει στον πυθμένα για γωνίες πρόσπτωσης από 0 έως 90 μοίρες ανά μισή μοίρα. Τα δεδομένα είναι ο συντελεστής ανάκλασης για όλες αυτές τις γωνίες και για N=0 και N=1 (τύπος 1). Δεδομένα θεωρούνται όχι οι ακριβείς τιμές του συντελεστή ανάκλασης R_{exact} , για τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 2.1, αλλά οι τιμές με την εισαγωγή τυχαίων σφαλμάτων στις ακριβείς τιμές R_{pert} σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_{pert} = R_{exact} + v \cdot eps \cdot R_{exact} \quad (2.1)$$

όπου ν είναι τυχαία μεταβλητή στο διάστημα $[-1,1]$, και ϵ_{ps} αριθμός από 0 έως 1. Η εισαγωγή των σφαλμάτων γίνεται στην απόλυτη τιμή του συντελεστή ανάκλασης. Στο παράδειγμα που ακολουθεί $\epsilon_{ps} = 0.1$ που αντιστοιχεί σε τυχαίο 10% σφάλμα στις ακριβείς τιμές.

Βήμα 1

Θεωρούμε $N=0$ και ψάχνουμε για τις τιμές των παραμέτρων που φαίνονται στον πίνακα 2.2. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται τα όρια των περιοχών, τα βήματα της αναζήτησης, οι σταθερές τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων και οι γωνίες. Η παραμετρική ανάλυση έδειξε ότι ο συντελεστής απορρόφησης των ακουστικών κυμάτων επηρεάζει τον συντελεστή ανάκλαση σε γωνίες πρόσπτωσης πάνω από τις 70 περίπου μοίρες ενώ ο συντελεστής απορρόφησης των ελαστικών κυμάτων επηρεάζει ελάχιστα τον συντελεστή ανάκλασης και γι αυτό δεν μπορεί να εκτιμηθεί (το ίδιο και για τον συντελεστή απορρόφησης ελαστικών κυμάτων στο δεύτερο στρώμα). Τα αποτελέσματα της αναζήτησης φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Οι τιμές των παραμέτρων προς αναζήτηση στο Βήμα 1.

	Ελάχιστη	Μέγιστη	Βήμα	Ακριβής	Προσεγγιστική
ρ_1 (Kgr / m ³)	1000	2000	20	1300	1300
c_{11} (m / sec ²)	1455	1599	1.5	1485	1486.5
c_{s1} (m / sec ²)	100	400	5	125	165
θ (deg)	0	70	0.5		
a_{11} (dB / λ)	Σταθερό με τιμή 0				
a_{s1} (dB / λ)	Σταθερό με τιμή 0				

Βήμα 2

Κρατώντας τώρα σταθερές τις τιμές των παραμέτρων του Βήματος 1 αναζητείται ο συντελεστής απορρόφησης a_{11} σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (από 70 έως 90 με βήμα 0.5). Η ελάχιστη τιμή του a_{11} ήταν 0.0 και η μέγιστη 2.0 και το βήμα της αναζήτησης 0.1. Η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους επιτεύχθηκε για $a_{11} = 0.16$ dB/λ.

Βήμα 3

Για να προσεγγισθούν οι τιμές του δεύτερου στρώματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο τύπος 1 με $N=1$. Λαμβάνοντας πάλι υπ όψιν την παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους αυτές παρατηρήθηκε ότι για μικρές γωνίες πρόσπτωσης οι τιμές της ταχύτητας των ακουστικών και ελαστικών κυμάτων c_{12} και c_{s2} και του συντελεστή απορρόφησης των ακουστικών κυμάτων a_{12} δεν επηρεάζουν τον συντελεστή ανάκλασης. Αναζητήθηκαν λοιπόν προσεγγίσεις των παραμέτρων που φαίνονται στον πίνακα 2.3 στις περιοχές και με βήματα που φαίνονται στον πίνακα για μικρές γωνίες πρόσπτωσης. Για τις παραμέτρους του πρώτου στρώματος χρησιμοποιήθηκαν αυτές που προέκυψαν από τα δύο πρώτα βήματα και για τις άλλες τρεις παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν σταθερές τιμές ($c_{12}=1600$ $c_{s2}=0$, $a_{12}=0$ και $a_{s2}=0$). Οι τιμές που ελαχιστοποιούν την συνάρτηση κόστους φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Οι τιμές των παραμέτρων προς αναζήτηση στο Βήμα 3.

	Ελάχιστη	Μέγιστη	Βήμα	Ακριβής	Προσεγγιστική
d (m)	0.5	2.5	0.1	1	1
α (deg)	3	7	0.2	5	5.1
ρ_2 (Kgr / m ³)	1000	3000	100	2	2.3
θ (deg)	0	30	0.5		
c_{12} (m / sec ²)	Σταθερό με τιμή 1600				
c_{s2} (m / sec ²)	Σταθερό με τιμή 0.0				
a_{12} (dB / λ)	Σταθερό με τιμή 0.0				
a_{s2} (dB / λ)	Σταθερό με τιμή 0.0				

Βήμα 4

Στο τελευταίο βήμα της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες γωνίες και αναζητήσαμε προσεγγιστικές τιμές για τις παραμέτρους του πίνακα 2.4. Η αναζήτηση μας έδωσε τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα 2.5. Στο πίνακα αυτό συμπεριλήφθησαν όλες οι παράμετροι του προβλήματος. Από αυτές τις παραμέτρους δεν έγινε αναζήτηση μόνο για τους συντελεστές απορρόφησης στα δύο στρώματα επειδή δεν επηρεάζουν σχεδόν καθόλου τον συντελεστή ανάκλασης. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται η απόλυτη τιμή του συντελεστή ανάκλασης για τις ακριβείς τιμές του Πίνακα 2.5 (πράσινη γραμμή), για τις προσεγγιστικές τιμές του ίδιου πίνακα (κόκκινη γραμμή) και οι τιμές με τυχαίο σφάλμα από τον τύπο (2.1) (μπλε γραμμή) και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη συνάρτηση κόστους.

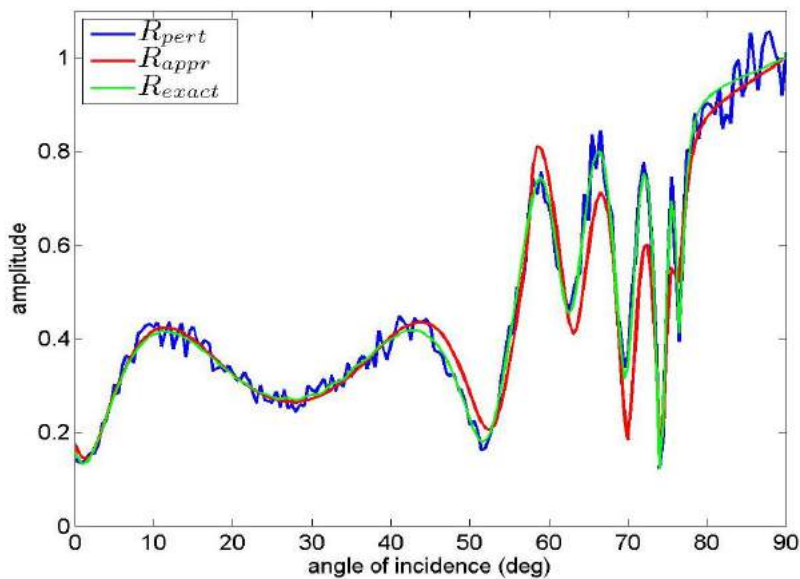
Πίνακας 2.4 Οι τιμές των παραμέτρων προς αναζήτηση στο Βήμα 4.

	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βήμα
c_{12} (m / sec ²)	1600	2000	4
c_{s2} (m / sec ²)	0	1000	25
a_{12} (dB / λ)	0	2	0.1
θ (deg)	31	90	0.5
a_{s2} (dB / λ)	Σταθερό με τιμή 0		

Πίνακας 2.5 Οι τελικές προσεγγιστικές τιμές όλων των παραμέτρων μετά το Βήμα 4.

	Ακριβής τιμή	Προσεγγιστική τιμή
d (m)	1	1
α (deg)	5	5.1
ρ_1 (Kgr / m ³)	1300	1300
c_{11} (m / sec ²)	1485	1486.5
c_{s1} (m / sec ²)	125	165
a_{11} (dB / λ)	0.1	0.16

a_{s1} (dB/λ)	0.1	0
ρ_2 (Kgr/m ³)	2	2.3
c_{l2} (m/sec ²)	1800	1808
c_{s2} (m/sec ²)	470	350
a_{l2} (dB/λ)	0.9	0
a_{s2} (dB/λ)	0.2	0



Σχήμα 2.3: Σύγκριση του συντελεστή ανάκλασης για $N=1$ (μπλε) με τον συντελεστή ανάκλισης, υπολογισμένο από τις ακριβείς τιμές (πράσινο) και με τον συντελεστή ανάκλισης, (κόκκινο) υπολογισμένο με τις προσεγγιστικές τιμές και με $N=1$ στο τύπο (2.1), μετά το Βήμα 4.

3. Αναφορές

[1] P.I. Papadakis, G. S. Piperakis and M. A. Kalogerakis « Reflection of a plane wave from a two-layered seafloor with non-parallel interface between the layers » J. Acoust. Soc. Am. 137 (2), pp. 1001-1011 (2015).

[2] Π. Παπαδάκης, Γ. Πιπεράκης, Μ. Καλογεράκης, «Παραμετρική Ανάλυση του Συντελεστή Ανάκλασης από Στρωματοποιημένο Πυθμένα Δύο Στρωμάτων με Επικλινή Διεπιφάνεια» Πρακτικά Συνεδρίου Ακουστική 2014, Σελίδες 293-298 (2014).

Πρόβλεψη θορύβου ναυσιπλοΐας στην Ανατολική Μεσόγειο¹

Εμμ. Σκαρσουλής, Γ. Πιπεράκης, Εμμ. Ορφανάκης, Π. Παπαδάκης

Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών
Ν. Πλαστήρα 100 Βασιλικά Βουτών, 70 013 Ηράκλειο, Κρήτη
eskars@iacm.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα μοντέλο πρόβλεψης του θορύβου ναυσιπλοΐας στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα σε πραγματικό χρόνο. Αξιοποιώντας δεδομένα AIS σε συνδυασμό με τυπικές στάθμες εκπομπής διαφόρων τύπων πλοίων, καθώς και δεδομένα βαθυμετρίας, και λαμβάνοντας υπόψη τις εποχιακές κατανομές θερμοκρασίας και ταχύτητας διάδοσης του ήχου, υπολογίζεται η κατανομή ακουστικής έντασης – επιπέδων θορύβου με τη βοήθεια κατάλληλων κωδίκων ακουστικής διάδοσης. Τα αποτελέσματα/προβλέψεις γεωγραφικής κατανομής θορύβου σε διάφορα βάθη είναι προσβάσιμα μέσω του διαδικτύου (www.iacm.forth.gr/shipnoise).

Prediction of shipping noise in the Eastern Mediterranean

ABSTRACT

A prediction model for shipping noise in the Eastern Mediterranean Sea in real time is presented combining AIS data for ship locations, typical acoustic emission characteristics of ships, environmental data and acoustic propagation codes. Taking into account prevailing temperature and sound-speed distributions, as well as the exact bathymetry in the area, range-dependent propagation calculations are carried out. Results for the geographical distribution of noise levels at various depths are published on the internet (www.iacm.forth.gr/shipnoise).

Εισαγωγή

Ο θόρυβος ναυσιπλοΐας αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό συστατικό του θορύβου περιβάλλοντος στο εσωτερικό της θάλασσας, καθώς δεσπόζει στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων (< 500 Hz). Οι μηχανές και έλικες των πλοίων παράγουν ακουστικά κύματα χαμηλής συχνότητας που διαδίδονται αποτελεσματικά μέσω της μάζας του νερού με αποτέλεσμα στην ανοικτή θάλασσα να παρατηρούνται σημαντικά επίπεδα θορύβου ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις από τις κύριες θαλάσσιες οδούς.

Η διάδοση του ήχου στο νερό επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης (και τις μεταβολές της αλατότητας σε πολύ μικρότερο βαθμό). Οι μεταβολές επιδρούν στην κατανομή ταχύτητας διάδοσης του ήχου και προκαλούν φαινόμενα διάθλασης. Για παράδειγμα η ύπαρξη θερμών επιφανειακών στρωμάτων κατά τους θερινούς μήνες προκαλεί διάθλαση του ήχου προς τα μεγαλύτερα βάθη και άρα μπορεί να μειώσει τα επίπεδα θορύβου κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Η περίπλοκη βαθυμετρία στην Ανατολική Μεσόγειο θάλασσα διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ακουστική διάδοση προκαλώντας πρόσθετες απώλειες στην ακουστική διάδοση, μέχρι και οριστική ακουστική αποκοπή.

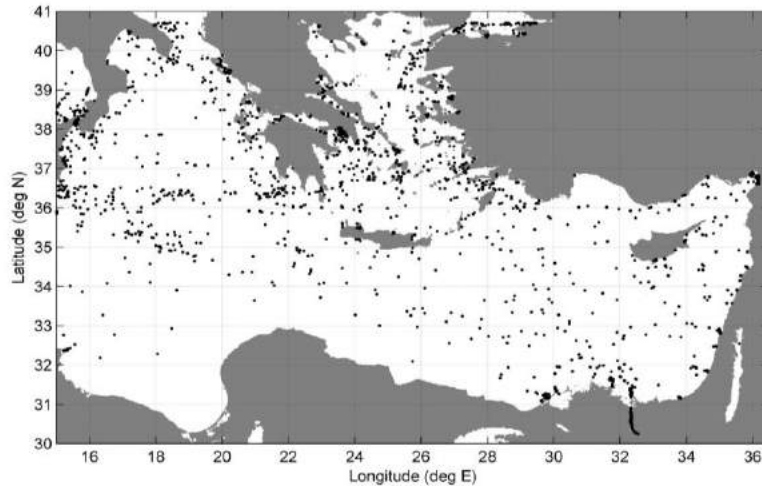
Η μέτρηση της κατανομής του θορύβου περιβάλλοντος σε θαλάσσιες περιοχές μεγάλης έκτασης και πολύπλοκης βαθυμετρίας και ακτογραμμής, όπως είναι η Ανατολική Μεσόγειος, και της μεταβολής της κατανομής αυτής με το χρόνο θέτει σοβαρές προκλήσεις, καθώς θα απαιτούσε πόντιση μεγάλου αριθμού καταγραφικών οργάνων για μεγάλο διάστημα. Η ακουστική μοντελοποίηση της διάδοσης σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα δεδομένων AIS μπορούν να προσφέρουν έναν εναλλακτικό αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος.

1. Δεδομένα AIS

Το σύστημα AIS (Automatic Identification System) βασίζεται σε εξειδικευμένους πομπούς και δέκτες VHF εγκατεστημένους σε πλοία με κύριο σκοπό την αποφυγή συγκρούσεων. Όλα τα πλοία ολικής χωρητικότητας 300 κόρων και άνω, και όλα τα επιβατηγά πλοία ανεξάρτητα από το μέγεθος, απαιτείται να έχουν εγκαταστημένη και λειτουργική μια μονάδα VHF εκπομπής/λήψης AIS [1]. Τα δεδομένα AIS περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τον τύπο, τη θέση, την κατάσταση και την ταχύτητα του σκάφους.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί υπηρεσίες εντοπισμού πλοίων οι οποίες βασίζονται σε χειρσαίους και δορυφορικούς σταθμούς λήψης AIS. Με αυτό τον τρόπο οι θέσεις των πλοίων που ταξιδεύουν σε οποιαδήποτε περιοχή του πλανήτη είναι διαθέσιμες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα AIS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των επιπέδων ηχητικής εκπομπής του κάθε πλοίου. Συνδυάζοντας αυτά τα δεδομένα με τα χαρακτηριστικά βαθυμετρίας και τις επικρατούσες συνθήκες διάδοσης στην περιοχή ενδιαφέροντος και εφαρμόζοντας υπολογιστικούς κώδικες ακουστικής διάδοσης μπορούμε να εκτιμήσουμε την κατανομή του θορύβου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε εγκατάσταση στο ΙΤΕ (Ηράκλειο, Κρήτη) ενός δέκτη AIS. Ο δέκτης αυτός εντάχθηκε στο δίκτυο της MarineTraffic, μιας διαδικτυακής υπηρεσίας παροχής δεδομένων AIS (www.marinetraffic.com), η οποία παρέχει στην ομάδα του έργου σε συνεχή βάση το σύνολο των δεδομένων AIS που συλλέγονται από επίγειους και δορυφορικούς δέκτες AIS για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου, βλ. σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.5 Στίγματα πλοίων στην Ανατολική Μεσόγειο (ενδεικτικά δεδομένα AIS).

2. Μοντελοποίηση θορύβου

2.1 Επίπεδα εκπομπής

Τα πλοία που βρίσκονται σε κίνηση αποτελούν πηγές υποβρύχιου θορύβου. Ο θόρυβος παράγεται από τους κινητήρες, τα βοηθητικά μηχανήματα, τις δονήσεις της μεταλλικής κατασκευής και τις έλικες. Τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ήχου εξαρτώνται από τον τύπο, το σχεδιασμό και την κατασκευή του πλοίου, την κατάσταση συντήρησής του αλλά και τις συνθήκες πλεύσης (ταχύτητα, κατάσταση φόρτωσης, κλπ.) και περιγράφονται από την φασματική πυκνότητα εκπομπής ως συνάρτηση της συχνότητας (ακουστική υπογραφή) η οποία μετριέται σε $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \text{Hz} @ 1\text{m}$.

Στη βιβλιογραφία περιγράφονται τυπικές ακουστικές υπογραφές για διάφορους τύπους πλοίων. Πρόσφατες μελέτες [2] [3] βασίζονται στο συνδυασμό υποβρύχιων ακουστικών μετρήσεων και δεδομένων AIS. Τα αποτελέσματα της δεύτερης μελέτης [3] βασίζονται στην ανάλυση μετρήσεων από μεγάλο αριθμό πλοίων (άνω των 1500) και χρησιμοποιούνται ως βάση για τις παρούσες προβλέψεις. Με βάση την εργασία αυτή, για τη συχνότητα των 100 Hz τα μέσα επίπεδα εκπομπής είναι τα εξής: Δεξαμενόπλοια και φορτηγά 145 $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \text{Hz} @ 1\text{m}$, επιβατηγά 140 $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \text{Hz} @ 1\text{m}$, αλιευτικά 135 $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \text{Hz} @ 1\text{m}$, βοηθητικά σκάφη 130 $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa} / \text{Hz} @ 1\text{m}$.

2.2 Ακουστική διάδοση

Για τον υπολογισμό του πεδίου θορύβου τα πλοία θεωρούνται σημειακές ακουστικές πηγές σε βάθος 10 m, ένα αντιπροσωπευτικό βάθος λαμβάνοντας υπόψη ότι το βύθισμα ενός πλοίου μπορεί να κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι περίπου 20 m για τα μεγάλα πλοία υπό πλήρες φορτίο. Πλοία που βρίσκονται σε απόσταση

μικρότερη των 2 km ομαδοποιούνται και το συνιστάμενο επίπεδο εκπομπής τους υπολογίζεται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ακουστικές εντάσεις (που προκύπτουν με απολογαριθμοποίηση των επιπέδων εκπομπής) και στη συνέχεια λογαριθμοποιώντας το άθροισμα. Η βαθυμετρία της Ανατολικής Μεσογείου λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων ΕΤΟΡΟ1 με ακρίβεια 1 λεπτό της μοίρας που αντιστοιχεί σε χωρική ανάλυση περίπου 1.8 km.

Για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου χρησιμοποιείται κώδικας κανονικών ιδιομορφών με εφαρμογή της αδιαβατικής προσέγγισης [4]. Θεωρώντας ότι η θερμοκρασία της θάλασσας μεταβάλλεται με το βάθος, οι μεταβολές κατά την οριζόντια έννοια οφείλονται στη βαθυμετρία. Θεωρώντας επιπλέον ότι τα γεωακουστικά χαρακτηριστικά του πυθμένα δεν μεταβάλλονται από θέση σε θέση, αυτό που διακρίνει την κάθε θέση σε σχέση με τις γειτονικές της είναι το βάθος του νερού. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το βάθος του νερού. Αυτό επιτρέπει την ομαδοποίηση των αρχικών ακουστικών υπολογισμών για την εκτίμηση των ιδιοτιμών και ιδιοσυναρτήσεων για τις περιοχές ίδιου βάθους.

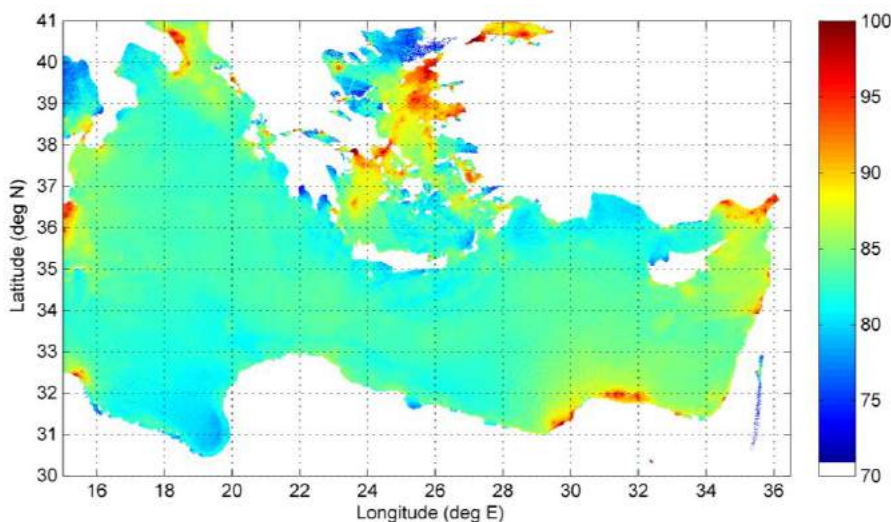
Αρχικά λοιπόν γίνεται υπολογισμός και αποθήκευση των ιδιοτιμών και ιδιοσυναρτήσεων για διαφορετικά βάθη νερού, ώστε να καλύπτονται όλες οι περιοχές ενδιαφέροντος, από τις ρηχότερες έως τις βαθύτερες. Στη συνέχεια για κάθε θέση που επιθυμούμε τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου (θέση δέκτη) υπολογίζονται οι συμβολές από κάθε σημειακή ακουστική πηγή συνδυάζοντας ιδιοτιμές και ιδιοσυναρτήσεις στη θέση πηγής και δέκτη, και λαμβάνοντας μόνο τόσες από αυτές όσες αντιστοιχούν στο ελάχιστο βάθος κατά μήκος της διαδρομής που συνδέει πηγή και δέκτη. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα ακουστικής αποκοπής που προκαλούνται από παρεμβολή ξηράς ή αβαθών. Οι ακουστικές εντάσεις από τις επιμέρους ηχητικές πηγές αθροίζονται και στη συνέχεια το άθροισμα λογαριθμοποιείται για να δώσει τη φασματική ένταση σε dB.

Η εποχιακή μεταβολή της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στα επιφανειακά στρώματα λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός παραμετρικού μοντέλου που συνδυάζει ένα γραμμικό προφίλ ταχύτητας για όλη τη θάλασσα στήλη, 1510 m/s στην επιφάνεια και 1570 m/s σε 4000 m βάθος (τυπικό προφίλ για τη Μεσόγειο το χειμώνα), και ένα προφίλ γραμμικής θέρμανσης για το επιφανειακό στρώμα των 150 m, το οποίο από μηδέν στα 150 m γίνεται μέγιστο στην επιφάνεια. Η διακύμανση της ταχύτητας στην επιφάνεια είναι μεταξύ 1510 m/s (χειμώνας – μηδενική θέρμανση) και 1545 m/s (καλοκαίρι – μέγιστη θέρμανση).

3. Αριθμητικά αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά αριθμητικά αποτελέσματα για την πρόβλεψη επιπέδων θορύβου ναυσιπλοΐας στην Ανατολική Μεσόγειο. Οι ακουστικές πηγές αντιστοιχούν στα στίγματα που φαίνονται στο σχήμα 1.1. Ο πυθμένας σε κάθε θέση μοντελοποιείται ως ακουστικό υπόστρωμα με ταχύτητα διάδοσης του ήχου 1800 m/s και πυκνότητα 1.8 gr/cm³. Για να καταστεί σαφής η επίδραση του θαλάσσιου προφίλ ταχύτητας στη διάδοση και κατ' επέκταση στην κατανομή θορύβου μελετώνται δύο ακραία προφίλ, το χειμερινό γραμμικό προφίλ και το θερινό προφίλ που παρουσιάζει τη μέγιστη θέρμανση στην επιφάνεια. Το δεύτερο αυτό προφίλ παρουσιάζει ελάχιστο της ταχύτητας διάδοσης (γνωστό και ως

άξονας) σε βάθος 150 m ενώ για μικρότερα βάθη χαρακτηρίζεται από έντονη αύξηση της ταχύτητας διάδοσης καθώς μειώνεται το βάθος.



Σχήμα 3.1 Πρόβλεψη κατανομής θορύβου, σε dB re 1 μ Pa / Hz, στη συχνότητα των 100 Hz και σε βάθος 40 m – Χειμώνας.

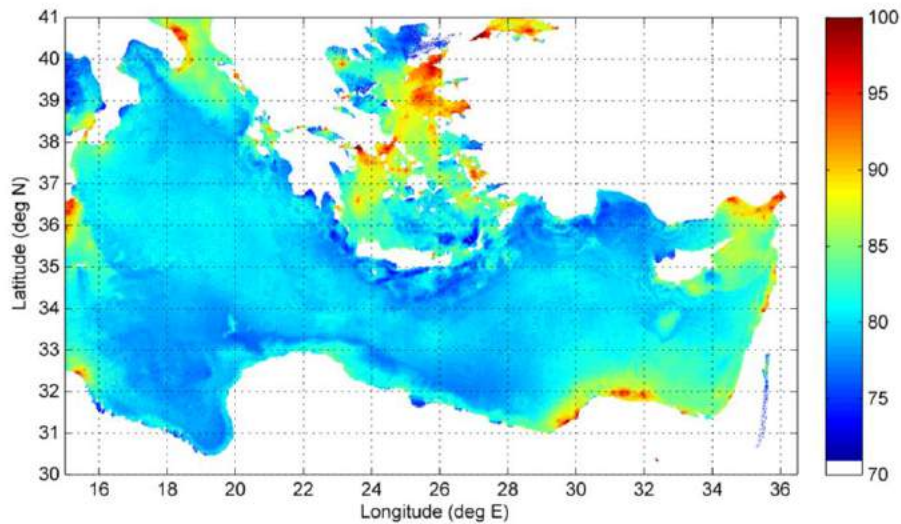
Το σχήμα 3.1 απεικονίζει την πρόβλεψη της κατανομής θορύβου στη συχνότητα των 100 Hz και σε βάθος 40 m για το χειμερινό προφίλ ταχύτητας. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η αντίστοιχη πρόβλεψη για το θερινό προφίλ ταχύτητας. Κατ' αρχήν συγκρίνοντας τα δύο σχήματα βλέπουμε ότι το καλοκαίρι προβλέπονται πολύ χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Αυτό οφείλεται στην έντονη μείωση της ταχύτητας διάδοσης με το βάθος στο επιφανειακό στρώμα, εντός του οποίου βρίσκονται οι ηχητικές πηγές, πράγμα που προκαλεί διάθλαση/οδήγηση του ήχου προς τα μεγαλύτερα βάθη και άρα μείωση των ακουστικών εντάσεων στο επιφανειακό στρώμα. Πέραν τούτου παρατηρούμε σημαντικά επίπεδα θορύβου σε περιοχές με βαριά κυκλοφορία όπως είναι το κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος. Αποτελέσματα σαν και αυτά παράγονται σε συστηματική και συνεχή βάση και ανανεώνονται ανά ώρα και είναι προσβάσιμα στη διεύθυνση www.iacm.forth.gr/shipnoise.

4. Συμπεράσματα

Η ακουστική μοντελοποίηση σε συνδυασμό με τη χρήση δεδομένων AIS επιτρέπει την πρόβλεψη επιπέδων θορύβου ναυσιπλοΐας σε πραγματικό χρόνο.

Εφαρμογές των αποτελεσμάτων περιλαμβάνουν τον περιβαλλοντικό χαρακτηρισμό συγκεκριμένων θαλάσσιων περιοχών, την ανάλυση της συμπεριφοράς υποβρύχιων ηχοεντοπιστικών συστημάτων, κ.ά. Όσον αφορά τον περιβαλλοντικό χαρακτηρισμό βρίσκεται σε ισχύ σχετική οδηγία της ΕΕ (MSFD) η οποία περιλαμβάνει το θόρυβο στις βασικές θαλάσσιες περιβαλλοντικές παραμέτρους που πρέπει να αποτιμηθούν στις θάλασσες της ΕΕ. Ο συνδυασμός μοντέλων πρόβλεψης με μετρήσεις σε

επιλεγμένες θέσεις αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη προσέγγιση για την αποτύπωση και παρακολούθηση των επιπέδων θορύβου σε θαλάσσιες περιοχές μεγάλης έκτασης και περίπλοκης βαθυμετρίας όπως η Ανατολική Μεσόγειος.



Σχήμα 3.2 Πρόβλεψη κατανομής θορύβου, σε dB re 1 μPa / Hz, στη συχνότητα των 100 Hz και σε βάθος 40 m – Καλοκαίρι.

5. Αναφορές

[1] IMO. International convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), Chapter V Safety of Navigation, Regulation 19, 1974, amended Dec 2000.

[2] M.F. McKenna, D. Ross, S.M. Wiggins, J.A. Hildebrand «Underwater radiated noise from modern commercial ships» J Acoust Soc Am. **131** pp 92-103 (2012).

[3] S. Veirs, V. Veirs, J.D. Wood «Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales» PeerJ 4:e1657; DOI 10.7717/peerj.1657 (2016).

[4] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt *Computational Ocean Acoustics* American Institute of Physics, Melville, NY (1994).

**Αντιστροφή των παραμέτρων ενός ακουστικού σήματος
με χρήση ενός πιθανοθεωρητικού σχήματος
αντιστροφής τριών-βημάτων**

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε ένα πιθανοθεωρητικό σχήμα αντιστροφής τριών-βημάτων για την ανάκτηση των άγνωστων παραμέτρων θαλάσσιων περιβαλλόντων μεταβαλλόμενων με την απόσταση χαρακτηριστικών. Το μοντέλο αρχικά χαρακτηρίζει υποβρύχια ακουστικά σήματα χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Wavelet Packet, στη συνέχεια ένα σύνολο από Hidden Markov Models (HMMs) για ομαδοποίηση, και τέλος ένα κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο του οποίου οι έξοδοι περιγράφουν τις εκ των υστέρων στατιστικές κατανομές των άγνωστων παραμέτρων. Στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη τα ακολουθιακά πρότυπα των σημάτων με στόχο να λάβουμε ένα αποδοτικότερο και περισσότερο ανεκτικό στο θόρυβο σχήμα αντιστροφής.

Ocean acoustic tomography using a three-phased probabilistic model-based inversion scheme.

ABSTRACT

This work presents an application of a three-phased probabilistic inversion scheme to range-dependent (R-D) environments. This model characterizes underwater acoustic signals in shallow water environments using Wavelet Packet Transform for feature extraction, Hidden Markov Models (HMMs) for clustering, and a Mixture Density Network for visualizing the inversion results via network output which describes the posterior distributions of the unknown parameters. The sequential patterns of the signals are taken into account in order to obtain a better and a more noise tolerant inversion scheme.

Εισαγωγή

Τα αντίστροφα προβλήματα στην υποβρύχια ακουστική είναι συσχετισμένα με μετρήσεις του ακουστικού πεδίου στο πεδίο του χρόνου. Ένα ζεύγος παρατηρήσεων \mathbf{d} και οι αντίστοιχες παράμετροι \mathbf{m} σχηματίζουν αντίστοιχα τις εισόδους και τις εξόδους του αντίστροφου προβλήματός. Η γενική μορφή ενός μη-γραμμικού αντίστροφου προβλήματος περιγράφεται από τη σχέση:

$$T(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = 0 \quad (1.1)$$

όπου T είναι μια κατάλληλη μη-γραμμική συνάρτηση.

Στη παρούσα εργασία, επεκτείνουμε το νέο μας σχήμα αντιστροφής [1] το οποίο συνδυάζει τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών σημάτων, τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, υλοποιώντας ένα σχήμα τριών βημάτων.

Στο πρώτο βήμα, μια καταγεγραμμένη κυματομορφή από ένα υδρόφωνο αντιστοιχίζεται με ένα φάσμα του Wavelet Packet Transform. Στο δεύτερο βήμα, ένα σχήμα ομαδοποίησης (clustering) αποτελούμενο από κόμβους Hidden Markov Models δημιουργείται και εκπαιδεύεται ώστε ο χαρακτηρισμός του σήματος να γίνει με ένα μοναδικό διάνυσμα εκ των υστέρων πυκνοτήτων πιθανότητας. Στο τελευταίο βήμα του σχήματος αντιστροφής το παραπάνω χαρακτηριστικό διάνυσμα αποτελεί την είσοδο ενός νευρωνικού δικτύου που μας δίδει ως έξοδο τις δεσμευμένες εκ των υστέρων στατιστικές κατανομές $p(\mathbf{m} | \mathbf{d})$ για τις άγνωστες παραμέτρους \mathbf{m} του μοντέλου.

Ως δοκιμή της αποδοτικότητας του σχήματος αντιστροφής χρησιμοποιούμε την ανάκτηση των χαρακτηριστικών που περιγράφουν μια απλή υποθαλάσσια ανύψωση (sea mount).

1. Χαρακτηρισμός ακουστικών σημάτων και σχήμα αντιστροφής

1.1 Εξαγωγή χαρακτηριστικών ακουστικών σημάτων χρησιμοποιώντας μετασχηματισμό Wavelet Packet

Θεωρούμε ένα σύνολο από διανύσματα των άγνωστων περιβαλλοντικών παραμέτρων $\{\mathbf{m}^{(1)}, \dots, \mathbf{m}^{(I)}\}$ και το αντίστοιχο σύνολο από συνθετικά σήματα που προκύπτει από εφαρμογή του ευθέως προβλήματος διάδοσης. Συμβολίζουμε με \mathbf{D} το σύνολο των ζευγών παραμέτρων-σημάτων, δηλαδή

$$\mathbf{D} = \{(\mathbf{m}^{(1)}, \mathbf{s}^{(1)}), \dots, (\mathbf{m}^{(I)}, \mathbf{s}^{(I)})\}. \quad (1.2)$$

Αναλύουμε κάθε ένα από τα σήματα στο \mathbf{D} χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Wavelet Packet [2] με επιλογή του φίλτρου Daubechies 4 (db4) έτσι ώστε να προκύψει ανάλυση L επιπέδων. Στη συνέχεια παράγουμε το φάσμα χρόνου-συχνότητας χρησιμοποιώντας σε κάθε επίπεδο φιλτράρισμα με ένα βαθυπερατό και ένα υψιπερατό φίλτρο.

Θεωρούμε ως χαρακτηριστικά του σήματος $\mathbf{s}^{(i)}$ τη χρονική σειρά που σχηματίζεται από τις στήλες $\{\mathbf{x}_1^{(i)}, \dots, \mathbf{x}_N^{(i)}\}$ του υποπίνακα του φάσματος στο οποίο παρουσιάζει σημαντική ενέργεια το σήμα. Άρα κάθε σήμα $\mathbf{s}^{(i)}$ στο \mathbf{D} μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξής:

$$\mathbf{s}^{(i)} \leftrightarrow \mathbf{X}^{(i)} = \{\mathbf{x}_1^{(i)}, \dots, \mathbf{x}_N^{(i)}\}, \quad i \in I. \quad (1.3)$$

Συμβολίσουμε με \mathbf{D} τη μετασχηματισμένη βάση δεδομένων που προκύπτει μετά την εξαγωγή των χαρακτηριστικών των σημάτων. Ενωμένος,

$$\mathbf{D} = \{(\mathbf{m}^{(1)}, \mathbf{X}^{(1)}), \dots, (\mathbf{m}^{(I)}, \mathbf{X}^{(I)})\}. \quad (1.4)$$

1.2 Ομαδοποίηση σημάτων χρησιμοποιώντας Hidden Markov Models (HMMs)

Συμφώνα με τους Elliot et al. [3] κατασκευάζουμε μια Μαρκοβιανή αλυσίδα από κρυφές μεταβλητές (Hidden Markov Model) και την συμβολίζουμε με το γράμμα λ έτσι ώστε κάθε χαρακτηριστικό διάνυσμα να εξαρτάτε από τις τιμές μιας κρυφής μεταβλητής. Για χάρη συντομίας θα αναφερόμαστε σε αυτές τις αλυσίδες ως HMM.

Συμφώνα με την γενική ιδέα των κρυφών μεταβλητών επεκτείνουμε το σύνολο δεδομένων προκυμμένου να λαμβάνει υπόψη την επιπλέον εξάρτηση που υποθέτουμε για κάθε $\mathbf{X}^{(i)}$ από το αντίστοιχο $\mathbf{Z}^{(i)}$.

Ονομάζουμε την οικογένεια των συνόλων δεδομένων $C = \{D_1^*, \dots, D_J^*\}$ ως μια συλλογή αποτελούμενη από J σύνολα δεδομένων εάν και μόνον εάν ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες:

1. Η ένωση των μελών στο C ισούται με το D^* .
2. Κάθε μέλος του D^* ανήκει σε ένα και μόνο ένα σύνολο δεδομένων στο C .
3. Κάθε σύνολο δεδομένων στο C περιέχει τουλάχιστον ένα μέλος του D^* .

Γράψουμε κάθε ομάδα στη μορφή $D_j^* = (M_j, X_j, Z_j)$ όπου, M_j, X_j, Z_j συμβολίζουν τις συλλογές από $\mathbf{m}, \mathbf{X}, \mathbf{Z}$ που ανήκουν στη συγκεκριμένη ομάδα, αντιστοίχως. Η εκ των υστέρων λογαριθμική πιθανότητα των παρατηρούμενων χαρακτηριστικών που περιγράφουν το πόσο καλά τα χαρακτηριστικά X_j χαρακτηρίζεται από το λ_j , μπορούν να υπολογισθούν αναλυτικά ως :

$$\ln p(X_j | \lambda_j) = \sum_{Z_j} \ln p(X_j, Z_j | \lambda_j) \quad (1.5)$$

Για την μεγιστοποίηση της (1.5) ως προς το λ_j της προηγούμενης σχέσης στη διαδικασία εκπαίδευσης γίνεται χρήση του αλγορίθμου Expectation-Maximization [4].

Για τη διαδικασία ομαδοποίησης εφαρμόζουμε μια τεχνική παρόμοια με τον απλό αλγόριθμο k-means [4] τα βήματα της οποίας περιγράφονται από τα παρακάτω πέντε βήματα:

1. Επιλέγουμε τυχαία μια συλλογή C από J ομάδες του συνόλου δεδομένων D^* και αντιστοιχίζουμε κάθε μέλος της σε ένα κόμβο λ_j .
2. Υπολογίζουμε τις λογαριθμικές συναρτήσεις πιθανότητας για κάθε ομάδα παρατηρούμενων δεδομένων $\mathbf{X}^{(i)}$ στο D^* σε κάθε κόμβο λ_j ως

$$d_j^{(i)} = \ln p(\mathbf{X}^{(i)} | \lambda_j) \quad (1.6)$$

3. Αναθέτουμε εκ νέου (εφόσον χρειάζεται) κάθε μέλος του D^* στη ομάδα $D_{j'}$ της συλλογής C , όπου $j' = \arg \max_j (d_j^{(i)})$.
4. Αναπροσαρμόζουμε τους J κόμβους με βάση τα χαρακτηριστικά διάνυσμα που τους έχουν ανατεθεί.
5. Εάν νέες αναθέσεις συνεχίζουν να πραγματοποιούνται επιστρέφουμε στο βήμα 2.

Έχοντας δημιουργήσει και εκπαιδεύσει το σύνολο των J - HMMs κόμβων είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε και αντιστοιχίσουμε σε κάθε σήμα ένα μοναδικό διάνυσμα χαρακτηριστικών το οποίο θα αποτελείται από τις J εκ των υστέρων τιμές πιθανότητας για κάθε κόμβο. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό διάνυσμα λαμβάνει πλέον υπόψη τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος με το χρόνο. Συνοψίζοντας τη διαδικασία που έχουμε ακολουθήσει έως εδώ περιγράφεται καλά από τη παρακάτω σχέση.

$$\mathbf{m}^{(i)} \rightarrow \mathbf{s}^{(i)} \rightarrow (\mathbf{X}^{(i)}, \mathbf{Z}^{(i)}) \rightarrow \mathbf{d}^{(i)} = \{d_1^{(i)}, \dots, d_J^{(i)}\}, i \in I. \quad (1.7)$$

Πλέον μπορούμε να μετασχηματίσουμε το σύνολο δεδομένων D^* ώστε να ορίσουμε ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης G που θα χρησιμοποιηθεί στο τελευταίο στάδιο του σχήματος που περιλαμβάνει την ανάκτηση των άγνωστων παραμέτρων.

$$G = \{(\mathbf{m}^{(1)}, \mathbf{d}^{(1)}), \dots, (\mathbf{m}^{(I)}, \mathbf{d}^{(I)})\}. \quad (1.8)$$

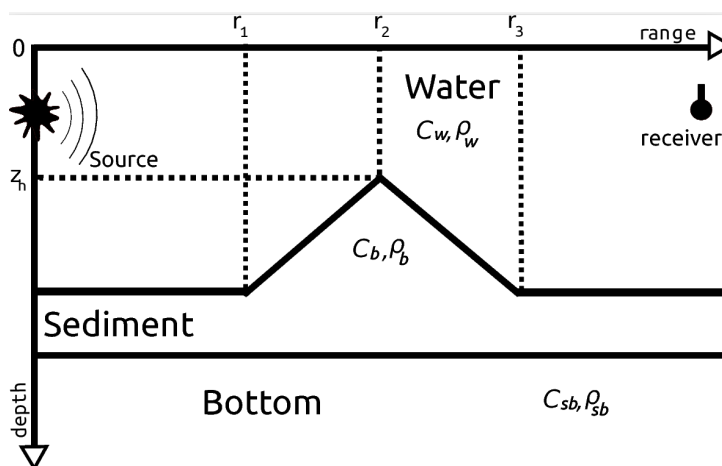
1.3 Εκ των υστέρων συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας.

Στο τρίτο βήμα του μοντέλου μας χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων **G** εκπαιδεύουμε ένα νευρωνικό δίκτυο με 2 κρυφά επίπεδα δομημένο έτσι ώστε ως έξοδο να δίδει τις παραμέτρους για ένα αριθμό *A* κανονικών κατανομών. Εάν για χάρη συντομίας αναφερόμαστε στα βάρη (weights) του νευρωνικού δικτύου με **W** και στις τιμές κατωφλίου (biases) με **b** μπορούμε να εκφράσουμε την έξοδο του δικτύου ως:

$$p(\mathbf{m} | \mathbf{d}) = \sum_{a=1}^A \pi_a(\mathbf{d}) N(\mathbf{m} | \mu_a(\mathbf{d}, \mathbf{W}, \mathbf{b}), \Sigma_a(\mathbf{d}, \mathbf{W}, \mathbf{b})) \quad (1.9)$$

2. Παράδειγμα αντιστροφής : Υποθαλάσσια ανύψωση

Ως παράδειγμα αντιστροφής, θεωρούμε ένα περιβάλλον με μια υποθαλάσσια ανύψωση δι-γραμμικής μορφής (Σχήμα 2.1). Ο πίνακας 2.1 περιέχει τις γνώστες περιβαλλοντικές παραμέτρους.



Σχήμα 2.1 Το θαλάσσιο περιβάλλον

Επομένως, η ανύψωσή θα περιγράφεται επαρκώς από τις εξής παραμέτρους :

1. Την οριζόντια απόσταση της πηγής από την αρχή της ανύψωσης r_1 .
2. Το βάθος της κορυφής της ανύψωσης z_h .
3. Την οριζόντια απόσταση της πηγής από τη κορυφή της ανύψωσης r_2 .
4. Την οριζόντια απόσταση από το τέλος της ανύψωσης r_3 .

Το σύνολο εκπαίδευσης αποτελείται από το σύνολο συνθετικών σημάτων για τους διάφορους συνδυασμούς των αγνώστων παραμέτρων. Στο παράδειγμα μας χρησιμοποιούμε 14641 συνδυασμούς που προκύπτουν από τις παρακάτω τιμές των παραμέτρων.

$$\begin{aligned} r_1 &\in \{2900, 2920, \dots, 3100\} \text{ m} \\ z_h &\in \{40, 42, \dots, 60\} \text{ m} \\ r_2 &\in \{4900, 4920, \dots, 5100\} \text{ m} \\ r_3 &\in \{6900, 6920, \dots, 7100\} \text{ m} \end{aligned} \quad (1.10)$$

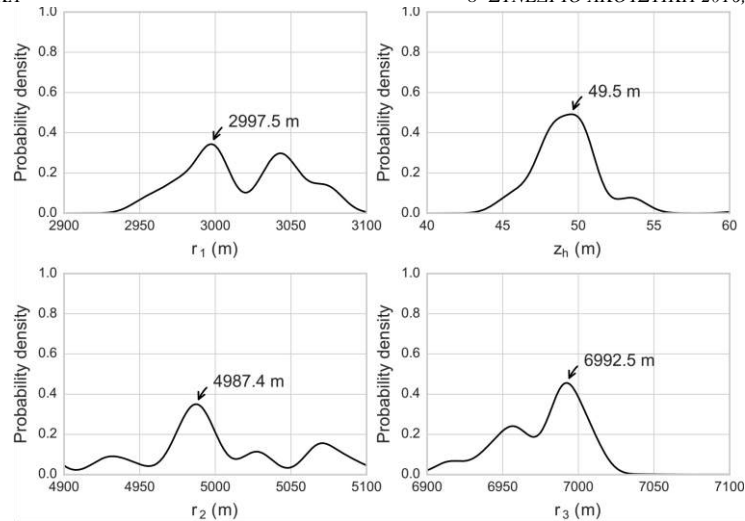
Στο συνθετικό μετρούμενο σήμα προσθέσαμε αρκετά ισχυρό θόρυβο (SNR = 10dB).

Πίνακας 2.1 Γνωστές παράμετροι του περιβάλλοντος

Παράμετροι	Τιμές
Βάθος νερού	100 m
Βάθος πηγής	25 m
Βάθος δέκτη	25 m
Κεντρική συχνότητα πηγής	50 Hz
Εύρος συχνοτήτων	60 Hz
Απόσταση πηγής-δέκτη	8000 m
Ταχύτητα του ήχου στο νερό	1500 m/s
Ταχύτητα του ήχου στο ίζημα	1600 m/s
Πυκνότητα ιζήματος	1200 kg / m ³
Ταχύτητα του ήχου στο πυθμένα	1800 m/s
Πυκνότητα πυθμένα	1400 kg / m ³

Οι πραγματικές και οι ανακτώμενες τιμές εμφανίζονται στο Πίνακα 2.2. Επίσης στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι εκ των υστέρων συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που παράγονται από το σχήμα αντιστροφής.

Για λόγους σύγκριση παρέχουμε και αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση του στατιστικού χαρακτηρισμού μαζί με τεχνικές αποθορυβοποίησης (SCS) που έχει χρησιμοποιηθεί από τους συγγραφείς κατά το παρελθόν [5,6].



Σχήμα 2.2 Εκ των υστέρων στατιστικές κατανομές για τις άγνωστες παραμέτρους του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Πίνακας 2.2 Αποτελέσματα των αντιστροφών

Παράμετροι	Πεδίο τιμών	Πραγματικές τιμές	SCS (CD+SD)	Προτεινόμενο σχήμα
r_1 (m)	[2900, 3100]	3000	2948.2	2997.5
z_h (m)	[40, 60]	50	56.1	49.5
r_2 (m)	[4900, 5100]	5000	4982.5	4987.4
r_3 (m)	[6900, 7100]	7000	7048.3	6992.5

3. Ευχαριστίες

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της Συμφωνίας Ελληνικού Δημοσίου–Siemens που χρηματοδοτείται εν μέρει από την Προγραμματική Συμφωνία μεταξύ Ερευνητικών Κέντρων –ΓΓΕΤ 2015-2017.

4. Αναφορές

[1] Smaragdakis C., Taroudakis M «Hidden Markov Models feature extraction for Inverting underwater acoustic signals using Wavelet Packet coefficients» Proceedings of EuroRegio 2016, Porto (Portugal), June 13-15 (2016).

[2] Mallat S. F. A «Wavelet Tour of Signal Processing», Academic Press, San Diego (USA), 2nd edition (1999).

[3] Elliot R, Aggoun L, Moore «J. Hidden Markov Models: Estimation and Control», Springer, New York (USA) (1995).

[4] Bishop, C. «Pattern recognition and machine learning» Springer International Edition, New Delhi (India) (2006).

[5] Taroudakis M., Tzagkarakis G., Tsakalides «P. Classification of shallow water acoustic signals via alpha stable modeling of the one dimensional wavelet coefficients» J. Acoust. Soc. Am. **Vol 119**, pp 1396-1405 (2006).

[6] Taroudakis M., Smaragdakis C. «Denoising procedures for inverting underwater acoustics signals in applications of acoustical oceanography» EuroNoise 2015, Maastricht, pp 1393-1398, 31 May – 3 June (2015).

Συνεδρία Α7: Κτιριακή-αρχιτεκτονική ακουστική (III)**ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΝΕΟΚΛΑΣΙΚΩΝ
ΑΙΘΟΥΣΩΝ ΔΙΑΛΕΞΕΩΝ ΜΝΗΜΙΑΚΟΥ
ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ****Σπυριδούλα Γκέκα**

Σπουδ. Σχ. Πολ. Μηχ. ΕΜΠ

spuridoula_08@hotmail.com**Γιάννης Καραγιάννης**

Υ/Δ, Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Σχ. Αρχ/νων ΕΜΠ

mediumswing@hotmail.com**Αντώνης Πάνος**

Υ/Δ, Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Σχ. Αρχ/νων ΕΜΠ

adonispanos@gmail.com**Γιώργος Παπαϊωάννου**

Αρχιτέκτων, Αθήνα

g.d.papaioannou@gmail.com**Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου**

Αν. Καθ., Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Σχ. Αρχ/νων ΕΜΠ

alexiasotirop@gmail.com**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Προβλήματα στην ακουστική νεοκλασικών αιθουσών διαλέξεων, επισημαίνονται χρησιμοποιώντας τέσσερα παραδείγματα τέτοιων αιθουσών στην Αθήνα. Παρ' όλα τα χαρίσματα των αιθουσών, ακουστικές μετρήσεις τεκμηριώνουν ευρύ φάσμα σφαλμάτων. Επισημαίνονται περιορισμοί στον ακουστικό επανασχεδιασμό των αιθουσών, ενώ προτείνεται μέσα από εφαρμογές ότι οι περιορισμοί μπορεί να αμβλύνονται χάρις σε ευέλικτα ακουστικά υλικά προηγμένης τεχνολογίας. Η ηλεκτροακουστική θεωρείται απαραίτητο συμπλήρωμα του διορθωτικού σχεδιασμού.

Remedial acoustics in monumental lecture auditoria of neoclassicism in Athens**ABSTRACT**

Four auditoria of the above type, in Athens, were used to illustrate typical acoustical faults. Despite merits of neoclassical auditoria, acoustic measurements confirmed their need for remedial acoustics. Limitations in the remedial acoustic design are acknowledged, which are associated with the historic character of the auditoria. It is demonstrated that it is possible to cope with some of these

limitations, thanks to versatile modern acoustic materials. Electroacoustics is also considered necessary.

Εισαγωγή

Ο νεοκλασικισμός στην Ελλάδα καθιερώθηκε και κυριάρχησε στο δεύτερο ήμισυ του 19ου αιώνα. Εκείνη την εποχή οικοδομούνται αρκετά νεοκλασικά δημόσια κτίρια τα οποία περιλαμβάνουν αίθουσες διαλέξεων, όπως τα παλαιά Ανάκτορα (νυν κτίριο του Ελληνικού Κοινοβουλίου), το κτίριο «Αβέρωφ» του Ε. Μ. Πολυτεχνείου, το Πανεπιστήμιο Αθηνών, κ.α. Οι αίθουσες αυτής της κατηγορίας, διακρίνονται για την αρτιότητα των αναλογιών τους, τη σωστή τους κλίμακα, το ευγενικό ύψος και τον γλυπτικό και όχι μόνον διάκοσμο τους. Παρ' όλα αυτά παρουσιάζεται ένα κοινό πρόβλημα, που είναι η προβληματική ακουστική των. Αυτό σχετίζεται με τις αρχιτεκτονικές επιλογές των αιθουσών που συλλήβδην αγνοούν τους κανόνες ακουστικού σχεδιασμού, αφού όπως είναι γνωστό η αρχιτεκτονική ακουστική έγινε επιστήμη μεταγενέστερα, δηλαδή μόλις στη στροφή του 19^{ου} αιώνα. Εκείνο δε που επιτείνει το πρόβλημα, είναι ότι η δυνατότητα επέμβασης με στόχο τον ακουστικό επανασχεδιασμό των αιθουσών, είναι εξαιρετικά περιορισμένη λόγω της αναγκαιότητας διατήρησης / σεβασμού του ιστορικού των χαρακτήρα.

Η παρούσα μελέτη χρησιμοποιεί τέσσερα παραδείγματα νεοκλασικών αιθουσών, δηλ., την αίθουσα «Καυταντζόγλου» του κτιρίου «Αβέρωφ» του Ε. Μ. Πολυτεχνείου [1], την «Αίθουσα τελετών» και την «Ανατολική αίθουσα» της Ακαδημίας Αθηνών, καθώς και την Αίθουσα του Ελληνικού κοινοβουλίου. Με βάση ακουστικές μετρήσεις που έγιναν εκεί, παρουσιάζονται και σχολιάζονται προβλήματα καθώς και λύσεις που υιοθετήθηκαν με στόχο τη διόρθωση της ακουστικής των.

1. Προβλήματα στην ακουστική νεοκλασικών αιθουσών διαλέξεων

Χαρακτηριστικό πρόβλημα αιθουσών αυτού του είδους είναι ο δυσανάλογα μεγάλος όγκος τους σε σχέση με το εμβαδόν και την χωρητικότητα των, που συνδέεται με το μνημειώδες ύψος τους (Πιν. 1.1, Σχ. 1.1–1.4). Αυτό έχει ως επακόλουθο αφ' ενός την σχετικά υψηλή αντήχηση (Σχ. 2.1) και αφ' ετέρου εξαιρετικά καθυστερημένες έντονες ανακλάσεις (ηχώ) από την οροφή (Σχ. 1.1–1.4) που μειώνουν δραστικά την καταληπτότητα της ομιλίας στο χώρο [2]. Ηχώ μπορεί επίσης να προέρχεται από απομακρυσμένες παρειές του χώρου, όπως π.χ. συμβαίνει στην αίθουσα «Καυταντζόγλου» με τις πτέρυγες εκατέρωθεν του ομιλητού (Σχ. 1.1), στην «Αίθουσα τελετών» της Ακαδημίας Αθηνών με τον πίσω τοίχο της (Σχ. 1.2), κλπ. Μάλιστα, όταν η μορφή των ανακλαστικών επιφανειών είναι καμπύλη στο πρόβλημα της ηχούς προστίθεται και ο εστιασμός (τομές Σχ. 1.1).

Οι παραπάνω αστοχίες στο σχεδιασμό αιθουσών του νεοκλασικισμού είναι αισθητές λόγω του ιδιαίτερα ανακλαστικού εσωτερικού κελύφους των. Αυτό συνήθως συνίσταται σε πέτρα, είτε επιχρισμένη (Σχ. 1.1) είτε επενδεδυμένη με μάρμαρο (Σχ. 1.2, 1.4), ή ακόμη σε υαλοστάσια στην οροφή με σκοπό την ενίσχυση του χώρου σε φυσικό φωτισμό (Σχ. 1.4). Όμως, παρ' όλο το ανακλαστικό τους κέλυφος, οι αίθουσες αυτές κατά κανόνα δεν διαθέτουν επιφάνειες εγγύς στο ακροατήριο (ανακλαστήρες) που να στέλνουν απ' ευθείας εκεί πρώιμες ανακλάσεις

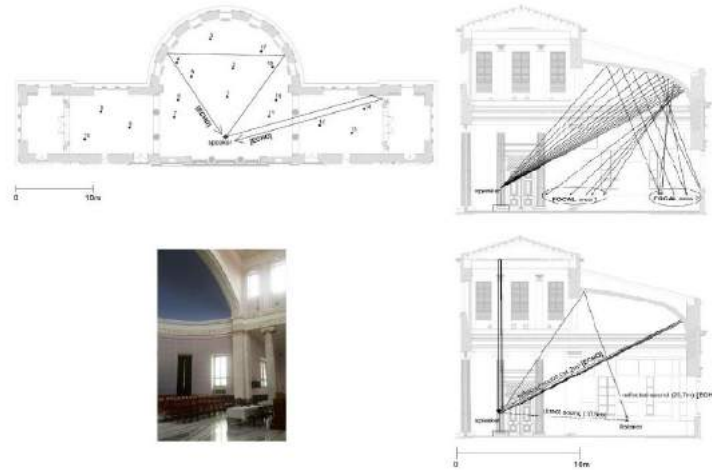
(Σχ. 1.1, 1.4). Η αποψίλωση αυτή των αιθουσών επιβεβαιώνεται και από τις επιτόπιες μετρήσεις του Κλάσματος πρώτων ανακλάσεων (Σχ. 2.2). Αλλά ούτε για τον απ' ευθείας ήχο υπάρχει μέριμνα να φθάσει ακέραιος στο ακροατήριο, π.χ. καθίσματα εκτός στερεάς γωνίας 140° από τον ομιλητή, μειονεκτούν λόγω της περιορισμένης εκεί κατευθυντικότητας του ήχου (Σχ. 1.1, 1.4). Επίσης, στην εν λόγω κατηγορία αιθουσών (που συνήθως σχεδιάζονται ευρύτερα και ως αίθουσες τελετών) κατά κανόνα δεν υπάρχει κλίση στο δάπεδο του ακροατηρίου για προφανείς λόγους, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνονται τόσο οι οπτικές όσο και οι ηχητικές ακτίνες από τον ομιλητή.

Πίνακας 2.1 Βασικά στοιχεία των υπό εξέταση αιθουσών

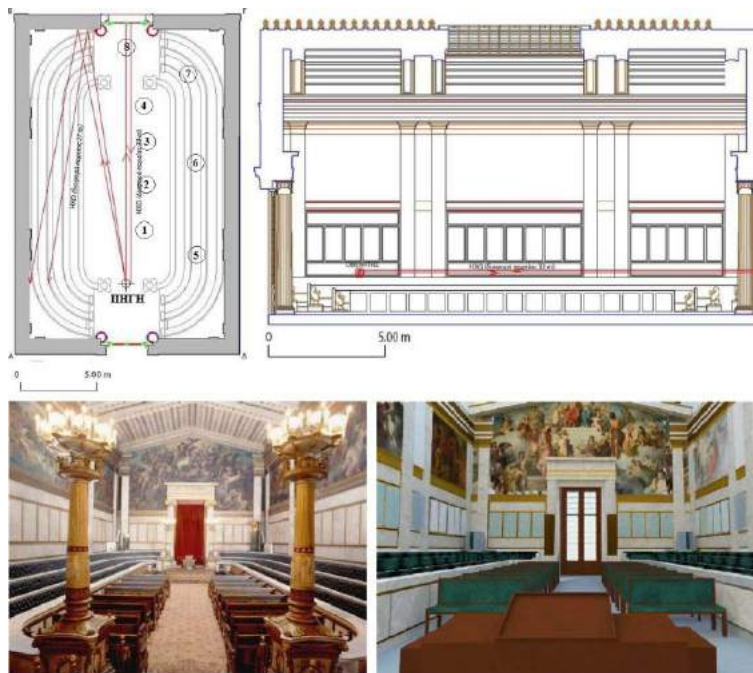
Αίθουσα	Αίθουσα "Καυταντζόγλου" Ε.Μ.Π.	Ακαδημία Αθηνών "Αίθουσα τελετών"	Ακαδημία Αθηνών "Ανατολική αίθουσα"	Αίθουσα Ελληνικού κοινοβουλίου
Ημερ'νία ανέγερσης	1878	1887	1887	1836
Αρχιτέκτον	Λύσανδρος Καυταντζόγλου	Ch. Hansen, E. Ziller	Ch. Hansen, E. Ziller	Friedrich von Gaertner
Όγκος [m ³]	5800	2530	2600	6000
Χωρητικότητα [άτομα]	175	240	190	520
Όγκος ανά άτομο [m ³]	33,0	10,5	13,7	11,5
Εμβαδόν [m ²]	446,0	247,0	345,0	460,0
Πλάτος (μέγιστο) [m]	40,0	12,5	11,1	20,0
Μήκος (μέγιστο) [m]	18,0	19,9	28,5	20,0
Ύψος (min,max) [m]	10,0 - 17,0	9,4 - 11,4	6,0 - 6,9	15,0
Rtmid* [s]	3,45	2,2	2,3	1,7

* : στις μεσαίες συχνότητες (μ.ο. 500, 1000Hz), χωρίς ακροατήριο

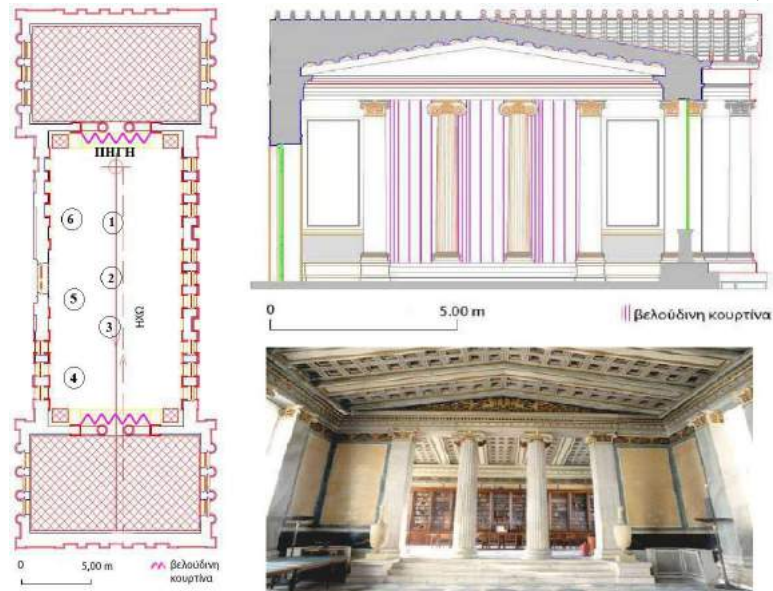
Οι παχιές φέρουσες τοιχοποιίες των νεοκλασικών αιθουσών είναι από την φύση των ηχομονωτικές, με εξαίρεση τα υαλοστάσια που τυχόν φέρουν. Αυτά είναι σχεδιασμένα με μονούς υαλοπίνακες και δεν αντέχουν στη σύγχρονη αστική ηχορρύπανση, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις παρούσες επιτόπιες μετρήσεις. (Σχ. 2.3). Βέβαια, στα χαρίσματα αυτών των αιθουσών είναι ο διάκοσμος που διαθέτουν, ο οποίος συνεισφέρει πλούσιο διάχυτο ήχο. Επί παραδείγματι, οι φατνωματικές οροφές που γεφυρώνουν τα μεγάλα ανοίγματα στις αίθουσες της εποχής αποτρέπουν την δημιουργία ηχούς και συμβάλλουν στην ηχητική ομοιομορφία του χώρου (Σχ. 1.2, 1.3).



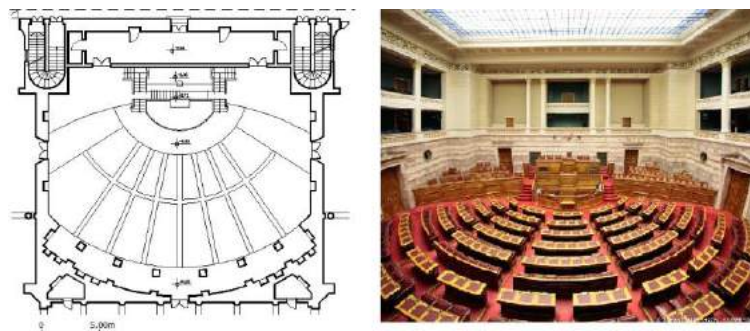
Σχήμα 1.1 Κάτοψη, τομές και άποψη προς το πλάι της αίθουσας «Καυταντζόγλου» του ΕΜΠ



Σχήμα 3.2 Κάτοψη, τομή, καθώς και πρόσθια άποψη πριν την επέμβαση (αριστερά) και άποψη προς τα πίσω μετά την επέμβαση (δεξιά), για την «Αίθουσα τελετών» της Ακαδημίας Αθηνών



Σχήμα 1.3 Κάτοψη, τομή και πρόσθια άποψη της «Ανατολικής αίθουσας» της Ακαδημίας Αθηνών



Σχήμα 1.4 Κάτοψη και πρόσθια άποψη της αίθουσας του Ελλ. κοινοβουλίου

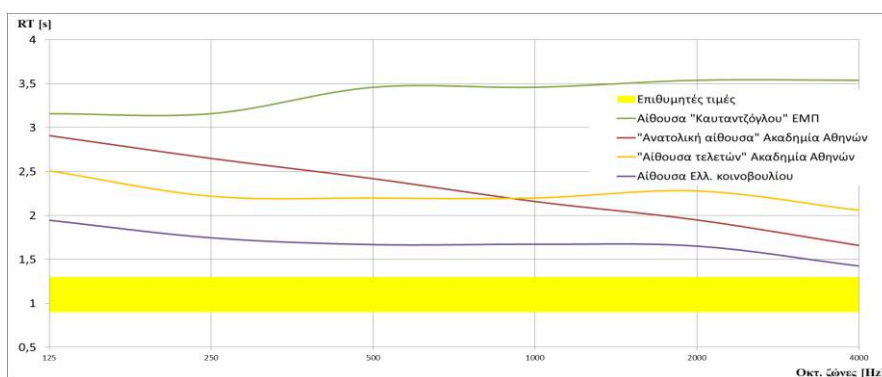
2. Διεξαγωγή ακουστικών μετρήσεων

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν χωρίς ακροατήριο σύμφωνα με τα σχετικά ISO και με σύγχρονο εξοπλισμό της Brüel & Kjaer. Χρησιμοποιήθηκαν μονοφωνικές εγγραφές της απόκρισης της αίθουσας σε απλή κυματομορφή (impulse response) με τη βοήθεια ισότροπης ηχητικής πηγής στη θέση του ομιλητού. Διάφορες θέσεις μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε αίθουσα (Σχ. 1.1–1.4).

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 2.1· μετρήσεις διενεργήθηκαν στις οκταβικές ζώνες από 125 Hz έως 4000 Hz με τη βοήθεια του λογισμικού Dirac. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα στις μεσαίες συχνότητες (500Hz, 1000 Hz), με εξαίρεση τις μετρήσεις του Χρόνου αντήχησης και του Θορύβου βάθους που δίδονται σε όλο το φάσμα (Σχ. 2.1–2.3).

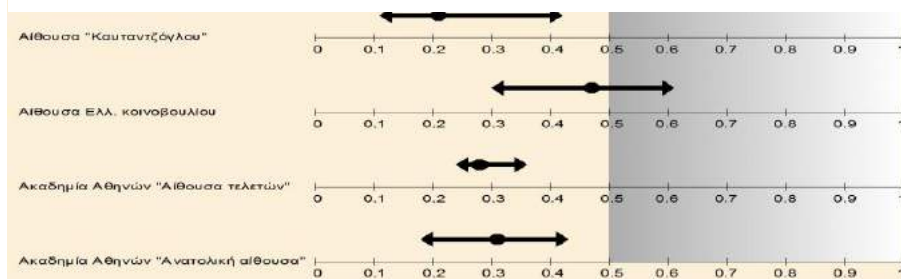
Πίνακας 3.1 Στοιχεία φυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν

Φυσική παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδες μέτρησης
Χρόνος αντήχησης	RT	[s]
Κλάσμα πρώιμων ανακλάσεων	D50	-
Θόρυβος βάθους	L _{Aeq}	[dBA]



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα του Χρόνου αντήχησης

Σχήμα 8.2 Μετρήσεις του Κλάσματος πρώιμων ανακλάσεων (μ.ο. 500 Hz, 1000 Hz). Δίδονται μέση τιμή [●], ελάχιστη και μέγιστη. Η σκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στις επιθυμητές τιμές.

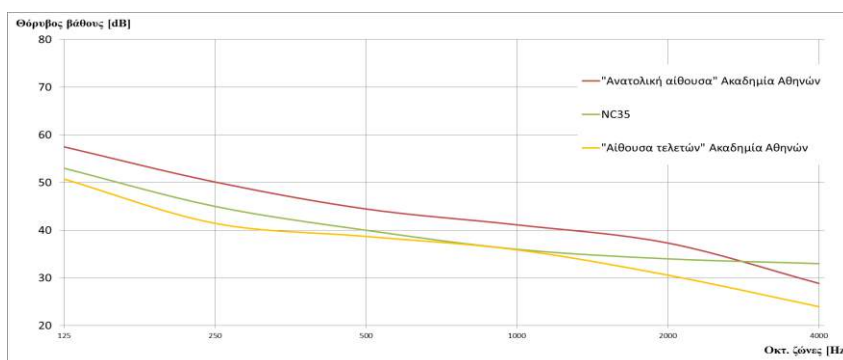


3. Λύσεις με στόχο τη διόρθωση της ακουστικής νεοκλασικών αιθουσών

Με δεδομένους τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στη Εισαγωγή ανωτέρω, η διορθωτική ακουστική επέμβαση κατά κανόνα βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη χρήση ηχοαπορροφητικών επενδύσεων. Η επιλογή των επιφανειών γίνεται στοχευμένα ώστε πέραν του ελέγχου του Χρόνου αντήχησης, να ακυρώνονται εν δυνάμει φαινόμενα ηχούς και εστιασμού αντίστοιχα. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα εφικτή σήμερα, ακόμη και σε άκρως διακοσμημένους χώρους χάρις σε προηγμένης τεχνολογίας ηχοαπορροφητικά υλικά. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η «Αίθουσα τελετών» της Ακαδημίας Αθηνών, η οποία παρά τις εκτενείς

τοιχογραφίες που την κοσμούν, πρόκειται να επενδυθεί, χάρις στη διαφάνεια που χαρακτηρίζει συγκεκριμένου τύπου ηχοαπορροφητικό (Σχ. 1.2). Άλλο παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή ηχοαπορροφητικής επένδυσης επί θολωτής οροφής, που έχει προταθεί για την Αίθουσα «Καυταντζόγλου» του ΕΜΠ. Ηχοαπορροφητικό επίχρισμα θα χρησιμοποιηθεί σε μορφή spray επί παπλώματος πετροβάμβακα, με δεδομένο ότι η αγορά είναι σε θέση να ευαγγελίζεται ικανοποιητική εφαρμογή της στρώσης στην ευαισθησία της καμπυλότητας (Σχ. 1.1).

Παρ' όλον τον ευεργετικό ρόλο της στον έλεγχο της αντήχησης κλπ., η ηχοαπορρόφηση ως γνωστόν εισάγεται με φειδώ σε αίθουσες ακροατηρίου, λόγω της μείωσης στην στάθμη του ήχου που επιφέρει. Παρ' όλα αυτά, τούτο προφανώς δεν μπορεί να τηρηθεί στην παρούσα κατηγορία αιθουσών· άρα, πέραν της διόρθωσης της φυσικής ακουστικής είναι απαραίτητη η ηλεκτροακουστική ενίσχυση της στάθμης του φυσικού ήχου. Εναλλακτικά, για να μετριασθεί η εξάρτηση της αίθουσας από ηλεκτροακουστική, είναι δυνατόν να τοποθετηθεί ανακλαστήρας πάνω από τον ομιλητή όπου αυτό συνάδει με την αρχιτεκτονική του χώρου.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα του Θορύβου βάθους και προβολή του επιθυμητού Κριτηρίου θορύβου (NC35)

4. Συμπεράσματα

Προβλήματα στην ακουστική απόδοση νεοκλασικών αιθουσών διαλέξεων, επισημάνθηκαν χρησιμοποιώντας τέσσερα παραδείγματα τέτοιων αιθουσών στην Αθήνα. Παρ' όλα τα χαρίσματα αιθουσών αυτής της κατηγορίας, ακουστικές μετρήσεις τεκμηρίωσαν ευρύ φάσμα σφαλμάτων, έτσι που τέτοιες αίθουσες να έχουν αξία και ως μαθησιακό εργαλείο εφαρμογής. Αναγνωρίζονται περιορισμοί στον ακουστικό επανασχεδιασμό συνυφασμένοι με τον ιστορικό χαρακτήρα των αιθουσών. Προτείνεται μέσα από εφαρμογές, ότι οι περιορισμοί μπορεί να αμβλύνονται χάρις σε ευέλικτα ακουστικά υλικά προηγμένης τεχνολογίας. Η ηλεκτροακουστική θεωρείται απαραίτητο συμπλήρωμα του διορθωτικού σχεδιασμού.

5. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον Κοσμήτορα της Σχ. Πολ. Μηχ. ΕΜΠ καθηγητή κ. Δ. Κουτσογιάννη και τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Δ. Παπαϊωάννου για τη στήριξη στο έργο μας. Μέρος της παρούσας μελέτης εκπονήθηκε στο πλαίσιο επί διπλώματι εργασίας της σπουδάστριάς της Σχ. Πολ. Μηχ. Σ. Γκέκα.

6. Αναφορές

[1] Karagiannis J., Perdicari H., Poulakos G., Sotiropoulou A. «Remedial Acoustics of a Monumental Neoclassical Auditorium at Tech. Univ. Athens» in *9th International Conference on Auditorium Acoustics*, IOA 37(3), 421-430 (2015)

[2] Σωτηροπούλου Α. *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων ακροατηρίου* Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα (2016)

Ακουστική απόδοση θεάτρων του νεοκλασικισμού και του μεσοπολέμου στην Αθήνα

Ιωάννης Καραγιάννης^{1,α}, Οδυσσέας Μαργάρης^{2,β}, Ιωάννης Νάκος^{2,γ}, Γεώργιος Ράλλης^{2,δ}, Μανώλης Τρουλλινός^{2,ε}, Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου^{1,2,στ}

¹ Εργαστήριο Ηχοτεχνίας, Σχολή Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ.157 80, Τηλ 210 7722303

² Σχολή Πολ. Μηχ/κών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ.157 80, Τηλ. 210 7722309, Fax. 210 7723855

^αmediumswing@hotmail.com, ^βodysseasmar@gmail.com, ^γjannisnak@hotmail.com,
^δrallisgr@gmail.com, ^εmanolis.tr@hotmail.com, ^{στ}alexia@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ακουστικές μετρήσεις σε τρεις ιστορικές θεατρικές σκηνές επιβεβαίωσαν την εν γένει καλή ακουστική των, καθώς και τη θετική συμβολή σε αυτήν, αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών όπως οι περιορισμένες αποστάσεις ακροατηρίου-δρώμενων, ο πλούσιος νεοκλασικός διάκοσμος, οι φατνωματικές οροφές, κλπ. Παρόλη τη διαφορετικότητα των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών ανάμεσα στις θεατρικές σκηνές του νεοκλασικισμού και του μεσοπολέμου, αυτά ως επί το πλείστον βρέθηκαν να ικανοποιούν εξ' ίσου τις ανάγκες του ακουστικού σχεδιασμού.

Acoustical performance of drama theatres of neoclassicism and early-20th-century architecture in Athens

ABSTRACT

Acoustic measurements in three historic drama theatres confirmed by and large their satisfactory acoustics. Contribution to acoustics was also confirmed, of architectural features, such as relatively small source-receiver distances, rich neoclassical decoration, coffered ceilings, etc. Despite basic differences in architectural features between neoclassicism and early-20th-century architecture, these were found to satisfy just as well acoustical design requirements.

Εισαγωγή

Η Αθήνα είναι η πόλη στην οποία γεννήθηκε το θέατρο και έχει τις περισσότερες θεατρικές σκηνές στον κόσμο, αφού επίσημα αριθμεί εκατόν σαράντα οχτώ θέατρα (έναντι εκατόν δέκα στο Λονδίνο και ογδόντα στο Παρίσι). Μάλιστα κάθε χρόνο η Ελληνική πρωτεύουσα φιλοξενεί πάνω από χίλιες θεατρικές παραστάσεις. Τα θέατρα είναι μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες αιθουσών ακροατηρίου που χρησιμοποιούνται κυρίως για ομιλία και συνεπώς η σωστή λειτουργία τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ακουστική τους απόδοση και κατ' επέκταση με τον αρχιτεκτονικό τους σχεδιασμό.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος μεγαλύτερης έρευνας του εργαστηρίου Ηχοτεχνίας της Σχολής Αρχιτεκτόνων του ΕΜΠ, όπου στόχος είναι η καταγραφή του ακουστικού στίγματος θεάτρων της πατρίδας μας από διάφορες περιόδους και η επιρροή των στοιχείων σχεδιασμού τους στην ακουστική τους απόδοση. Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται αποτελέσματα από τρεις θεατρικές σκηνές της περιόδου του νεοκλασικισμού και του μεσοπολέμου στην Αθήνα και τον Πειραιά.

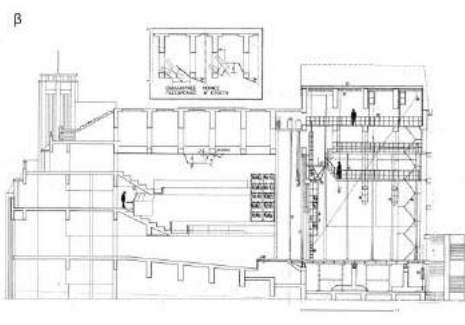
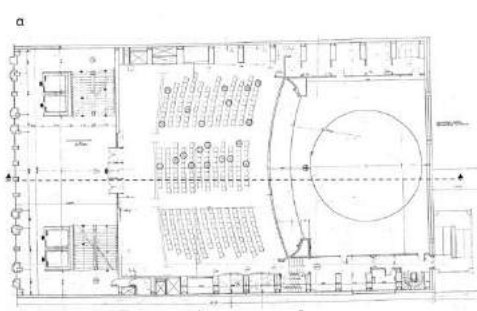
1. Σχεδιασμός του πειράματος και μεθοδολογία

Ακουστικές μετρήσεις έγιναν στην Αθήνα στη θεατρική σκηνή «Μαρίκα Κοτοπούλη» του θεάτρου REX από την εποχή του μεσοπολέμου, και στην κεντρική αίθουσα του Φιλολογικού Συλλόγου «Παρνασσός» από την εποχή του νεοκλασικισμού. Χρησιμοποιήθηκε επίσης το νεοκλασικό Δημοτικό Θέατρο Πειραιώς (Πίν. 1.1 και Σχ. 1.1, 1.2 και 1.3). Από τις τρεις αυτές αίθουσες η πρώτη είναι σχεδιασμένη ως θεατρική σκηνή. Οι άλλες δύο χρησιμοποιούνται για θεατρικές παραστάσεις, αλλά επίσης για όπερα (Δημ. Θέατρο. Πειρ.) και για διαλέξεις, μουσική δωματίου κλπ. («Παρνασσός»). Οι αίθουσες επελέγησαν με βάση την διαθεσιμότητά τους. Διευκρινίζεται ότι η σκηνή «Κοτοπούλη» και το Δημοτικό Θέατρο Πειραιώς έχουν ανακαινισθεί πρόσφατα. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 1.2 και έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ως αντιπροσωπευτικές για την ακουστική αιθουσών ακρόασης ομιλίας [1,2].

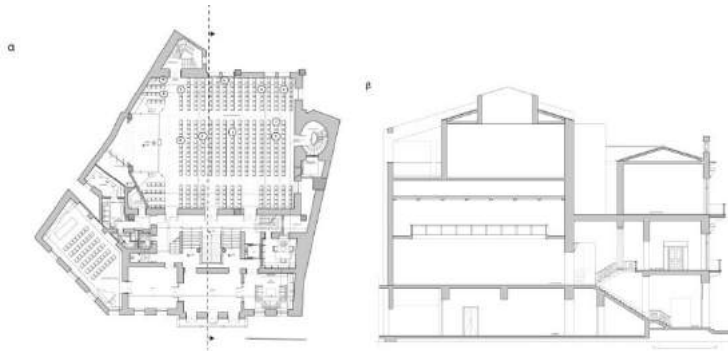
Πίνακας 1.1 Βασικά στοιχεία αιθουσών

Θεατρικές σκηνές	REX- Κοτοπούλη	Παρνασσός	Δημ. Θέατρο Πειρ.
Περίοδος	μεσοπολέμου	νεοκλασικισμός	νεοκλασικισμός
Ημερ/νία ανέγερσης και πρόσφατης ανακαίνισης	1937,1988	1890,-	1895,2008
Όγκος [m ³]	4130	2300	5570
Θέσεις	638	450	496

Όγκος ανά άτομο [m ³]	6.47	5.11	11.23
Πλάτος [m]	23.00	15.76	19.27
Μήκος [m]	16.56	19.66	19.27
Ύψος [m]	11.68	7.80	15.00
RTmid* [s]	1.25	1.30	1.30
*: στις μεσαίες συχνότητες (μ.ο 500, 1000 Hz), χωρίς ακροατήριο			



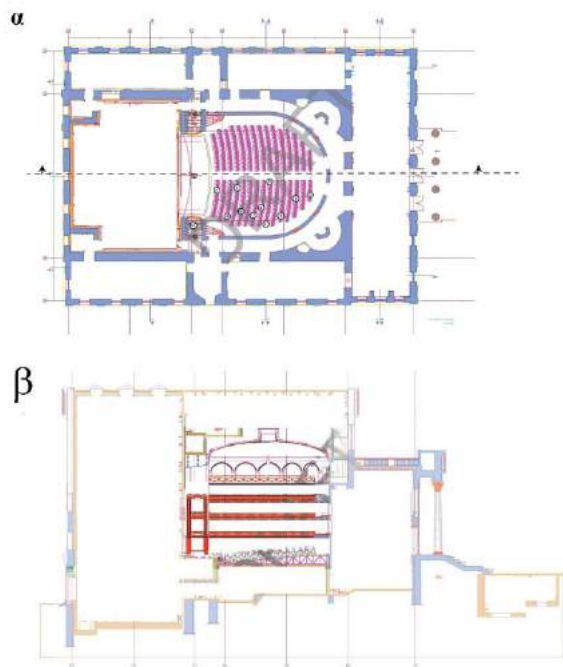
Σχήμα 1.1 Θέατρο REX – Σκηνή Κοτοπούλη. α) Κάτοψη β) Τομή γ) Γενική άποψη του θεάτρου. ○: θέσεις μέτρησης. ⊕: ηχητική πηγή.



γ.



Σχήμα 1.2 Φιλολογικός Σύλλογος «Παρνασσός» . α) Κάτοψη β) Τομή γ) Γενική άποψη του θεάτρου. ○: θέσεις μέτρησης. ⊕: ηχητική πηγή.



Σχήμα 1.3 Δημοτικό Θέατρο Πειραιά. α) Κάτοψη β) Τομή γ) Γενική άποψη του θεάτρου. ○: θέσεις μέτρησης. ⊕: ηχητική πηγή.

Πίνακας 1.2 Φυσικές παράμετροι

Φυσική παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδες μέτρησης
Χρόνος αντήχησης	RT	[s]

Απόσβεση του ήχου	G	[dB]
Κλάσμα πρώιμων ανακλάσεων	D50	-
Θόρυβος βάθους	L _{Aeq}	[dBA]

2. Διεξαγωγή μετρήσεων – Ανάλυση – Αποτελέσματα

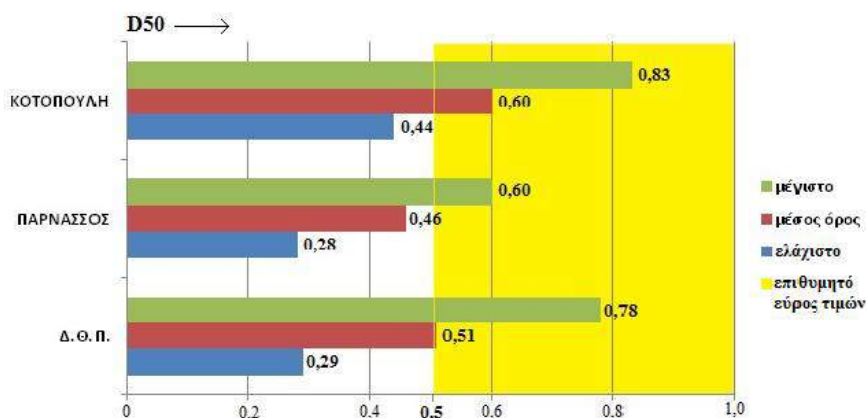
Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν χωρίς ακροατήριο σύμφωνα με τα σχετικά ISO και με σύγχρονο εξοπλισμό της Brüel & Kjaer. Χρησιμοποιήθηκαν μονοφωνικές εγγραφές της απόκρισης της αίθουσας σε απλή κυματομορφή (impulse response) με τη βοήθεια ισότροπης ηχητικής πηγής στη θέση της σκηνής. Διάφορες θέσεις μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε αίθουσα (Σχ. 1.1, 1.2 και 1.3).

Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν στις οκταβικές ζώνες από 125 Hz έως 4000 Hz με τη βοήθεια του λογισμικού Dirac. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα στις μεσαίες συχνότητες (500Hz, 1000 Hz), με εξαίρεση τις μετρήσεις του Χρόνου αντήχησης που δίδονται σε όλο το φάσμα (Πίν. 2.1 και Σχ. 2.1, 2.2 και 2.3).

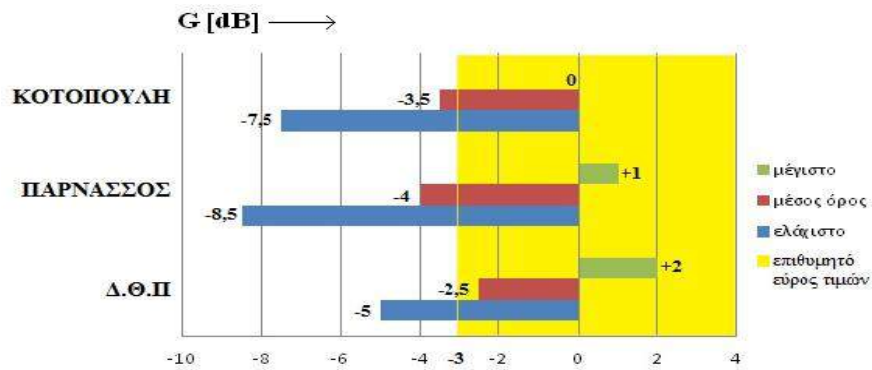
Πίνακας 2.1 Μετρήσεις Θορύβου βάθους αιθουσών

Θέατρα	REX	Παρνασσός	Δημ. Θέατρο Πειρ.
L _{Aeq} *[dBA]	31,5	34,0	30,0

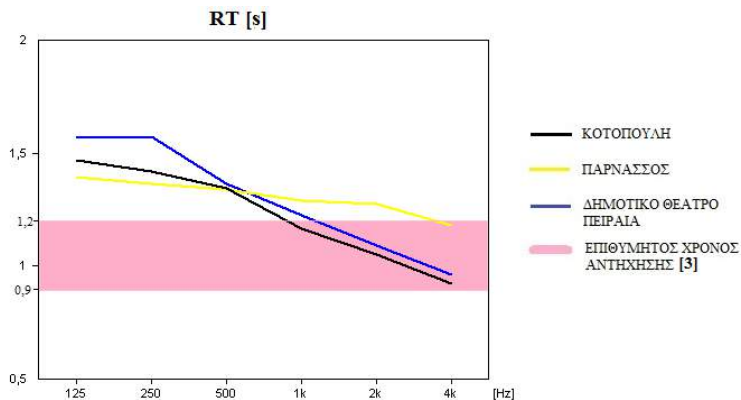
*: υιοθετείται ως μέγιστο ανεκτό όριο θορύβου το NC (Noise Criterion) 25 dB που ισοδυναμεί με 31dBA.



Σχήμα 2.1 Μετρήσεις Κλάσματος πρόιμων ανακλάσεων (D50) στις μεσαίες συχνότητες (μ.ο. 500 Hz, 1000 Hz). Επιθυμητή τιμή ≥ 0.50 [2].



Σχήμα 2.2 Μετρήσεις της Απόσβεσης του συνολικού ήχου (G), στις μεσαίες συχνότητες (μ.ο. 500 Hz, 1000 Hz). Τιμή αναφοράς (0 dB) είναι η στάθμη της ηχητικής πηγής στα πρώτα καθίσματα. Επιθυμητή τιμή ≥ -3 dB [2].



Σχήμα 2.3 Μετρήσεις Χρόνου αντήχησης.

3. Ερμηνεία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των μετρήσεων με τις βέλτιστες τιμές για το Χρόνο αντήχησης (Σχ. 2.3), έδειξε ότι οι τιμές ευρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων, με εξαίρεση την περιοχή των μπάσων όπου παρατηρούνται σχετικά υψηλές τιμές. Αυτό το εύρημα επιβεβαιώνει το γεγονός ότι οι αίθουσες και ιδιαιτέρως το Δημ. Θέατρο Πειρ. και η σκηνή «Κοτοπούλη» εν γένει διαθέτουν ηχοαπορροφητικές επενδύσεις κυρίως με πορρώδη υλικά.

Επίσης για το D50, οι μετρήσεις ευρίσκονται ως επί τον πλείστον εντός των αποδεκτών ορίων, δηλαδή ικανοποιείται το κριτήριο καταληπτότητας της ομιλίας (Σχ. 2.1). Μερικά αρχιτεκτονικά στοιχεία που ερμηνεύουν-συμβάλλουν σε αυτό είναι τα ακόλουθα. Για τη σκηνή «Κοτοπούλη» είναι προφανές ότι: πρώτον, οι πλευρικές ανακλαστικές παρειές της αίθουσας είναι ο κύριος παράγων τροφοδοσίας του ακροατηρίου σε πρώιμες ανακλάσεις και, δεύτερον, παρ' όλο το λιτό εσωτερικό κέλυφος της αίθουσας, η φωνωματική οροφή αυτής και των εξωστών της συνεισφέρουν διάχυτο ήχο που εμπλουτίζει τις πρώιμες κατοπτρικές ανακλάσεις. Αντίθετα προς την αίθουσα του μεσοπολέμου, στο Δημ. Θέατρο Πειρ. και στον «Παρνασσό» πλούσιο διάχυτο ήχο συνεισφέρει ο έντονος νεοκλασικός διάκοσμος.

Ένα επί πλέον αρχιτεκτονικό στοιχείο που συμβάλλει στις ικανοποιητικές τιμές του D50 είναι και η διάταξη του ακροατηρίου σε μικρές αποστάσεις από τα δρώμενα χάρις και στους εξώστες που διαθέτουν οι παρούσες αίθουσες. Οι περιορισμένες αποστάσεις εξάλλου σε συνδυασμό και με την απαραίτητη μόνο ηχοαπορρόφηση του χώρου μπορούν να ερμηνεύσουν και την ικανοποιητική διατήρηση της στάθμης του συνολικού ήχου που μετρήθηκε στις τρεις αίθουσες (Σχ. 2.2). Οι μετρήσεις έγιναν χωρίς ακροατήριο, παρ' όλα αυτά γίνεται η ρεαλιστική παραδοχή ότι η ηχοαπορρόφηση των κενών καθισμάτων είναι παρόμοια με την απορρόφηση των κατελημμένων.

Τέλος, ο Θόρυβος βάθους βρέθηκε εντός των ανεκτών ορίων για δύο από τις τρεις αίθουσες που μετρήθηκαν (Πιν. 2.1). Μολονότι και οι τρεις αίθουσες διαθέτουν παχιές τοιχοποιίες, (λιθοδομές κλπ.), ο «Παρνασσός» είναι εκτεθειμένος στον αστικό θόρυβο, λόγω των ανοιγμάτων που διαθέτει σε μία από τις πλευρές του (Σχ. 1.2). Αντίθετα, οι άλλες δύο αίθουσες είναι προστατευμένες από τον εξωτερικό θόρυβο χάρις στους ουδέτερους χώρους που τις περιβάλλουν (ζώνες ανάσχεσης) (Σχ. 1.1, 1.3). Επί πλέον, το κτίριο του θεάτρου REX είναι εντεταγμένο στο συνεχές σύστημα δόμησης, με αποτέλεσμα μόνο η πρόσοψη αυτού να είναι εκτεθειμένη στην αστική ηχορρύπανση.

4. Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός ηχοπροστασίας (ζώνες ανάσχεσης, παχιές τοιχοποιίες βαρέως τύπου, κλπ.) των παραπάνω ιστορικών αιθουσών εν γένει ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σύγχρονου ακουστικού σχεδιασμού για την αντιμετώπιση της αστικής ηχορρύπανσης.

Οι νεοκλασικές αίθουσες της μελέτης (Δημ. Θέατρο Πειρ. και «Παρνασσός») ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της ακουστικής για θεατρικές παραστάσεις μολονότι έχουν σχεδιαστεί και για διαφορετικές χρήσεις, κυρίως λόγω των περιορισμένων αποστάσεων του ακροατηρίου από τα δρώμενα και του πλούσιου

νεοκλασικού διακόσμου των που συνεισφέρει διάχυτο ήχο. Εκ παραλλήλου, το λιτό κέλυφος της αίθουσας του μεσοπολέμου που εξετάστηκε, συνεισφέρει χρήσιμες ανακλάσεις, ενώ ο χώρος δεν υστερεί και σε διάχυτο ήχο χάρις κυρίως στην φατνωματική οροφή που τον γεφυρώνει.

Εν κατακλείδι, παρ' όλη τη διαφορετικότητα των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών ανάμεσα στις θεατρικές σκηνές του νεοκλασικισμού και του μεσοπολέμου, αυτά βρέθηκαν να ικανοποιούν εξ ίσου τις αρχές ακουστικού σχεδιασμού. Μολονότι τα συμπεράσματά μας εξάγονται με βάση τη σημερινή κατάσταση των αιθουσών (τελευταία ανακαίνιση), εν τούτοις θεωρούμε ότι αυτή δεν απέχει σημαντικά από τις βασικές επιλογές του αρχικού σχεδιασμού.

5. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται στον Κοσμήτορα της Σχολής Πολ/κών Μηχ/κών ΕΜΠ καθηγητή κ Δημήτρη Κουτσογιάννη για τη στήριξη στο έργο μας. Μέρος της παρούσας μελέτης εκπονήθηκε στο πλαίσιο επί διπλώματι εργασίας των σπουδαστών της Σχολής Πολ/κών Μηχ/κών ΕΜΠ Ο. Μαργάρη, Ι. Νάκου, Γ. Ράλλη και Εμ. Τρουλλινού.

6. Αναφορές

[1] Σωτηροπούλου, Α., (2016). *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων ακροατηρίου*. [ηλεκτρ. βιβλ.]: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Αθήνα. Διαθέσιμο στο <http://hdl.handle.net/11419/5850>

6. [2] Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E & FN SPON, London.

7. [3] Cremer L., Muller H.A., Schultz T.J. (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vol. II. Applied Science Publ., London & N. York.

ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΥ τ. ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ ΧΗΜΙΚΩΝ (ΜΑΧ) ΣΤΟ ΕΜΠ

Μαρία Παπαϊωάννου^{[1],[α]}, Ελένη Περδικάρη^{[2],[β]}, Νικολέτα Μουγκάση^{[1],[γ]},
Γεώργιος Πουλάκος^{[1],[δ]}, Ιωάννης Καραγιάννης^{[1],[ε]},
Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου^{[1],[στ]}

^[1] Σχ. Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΕΜΠ, Πατησίων 42, Τ.Κ. 10682

^[2] Σχ. Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ.157 80

^[α] papmar1391@gmail.com, ^[β] eleni_per@hotmail.com,
^[γ] nmougkasi@gmail.com, ^[δ] gpoulakos@arch.ntua.gr,
^[ε] mediumswing@hotmail.com,
^[στ] alexiasotirop@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ακουστικές μετρήσεις επιβεβαίωσαν τον σχετικά μεγάλο χρόνο αντήχησης στο αμφιθέατρο. Βασική επιλογή στη μελέτη ήταν να μην θίξουμε τον μεγάλο όγκο της αίθουσας και την μορφή του εσωτερικού κελύφους, ώστε να διατηρήσουμε το αρχικό αρχιτεκτονικό ύφος. Ο ακουστικός σχεδιασμός βασίζεται στην εισαγωγή ηχοαπορροφητικών επενδύσεων. Επίσης θεωρείται αναγκαία η εισαγωγή ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης στην αίθουσα. Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για την αποφυγή της ηχούς, που οφείλεται στις μεγάλες διαστάσεις του χώρου. Υπολογιστικές προβλέψεις καθώς και μετρήσεις στον ψηφιακό χώρο επιβεβαίωσαν την καταλληλότητα των επιλογών του σχεδιασμού. Η όσμωση ανάμεσα στο αρχιτεκτονικό ύφος και στον ακουστικό σχεδιασμό είναι προφανής και στηρίζει την άποψη ότι η ακουστική, είναι δυνατόν να αποτελεί σημαντική παράμετρο έμπνευσης και φαντασίας για τη σύνθεση.

Remedial acoustics of a large modern auditorium (MACH) in Tech. Univ. Athens

ABSTRACT

Acoustic measurements in the auditorium, confirmed excessive Reverberation Time. Still it was important to maintain the initial character of the auditorium, i.e. to preserve the relatively large volume and initial shape of the space. The acoustical design consists in the introduction of sound absorptive treatment so as to reduce initial reverberation time and eliminate echoes (associated with the large auditorium). Sound amplification is also strongly recommended. Prediction of acoustic parameters as well as measurements in virtual space with the aid of software, fell within expected values. Coherence between acoustical design and the

architecture of the auditorium, confirm that technology can be a source of inspiration for architecture.

Εισαγωγή

Η εργασία αφορά στην προτεινόμενη ανακαίνιση του παλαιού αμφιθεάτρου της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ (τ. MAX) στο Πολυτεχνείο (συγκρότημα Πατησίων). Η αίθουσα είναι κατασκευής των μέσων του 20^{ου} αιώνα, δηλαδή της εποχής του Μοντερνισμού στην Αθήνα, μιας εποχής που η ακουστική δεν αποτελούσε προβληματισμό για έναν αρχιτέκτονα και έκτοτε δεν έχει ανακαινισθεί. Μετρήσεις του Χρόνου Αντήχησης που κάναμε στην αίθουσα επιβεβαίωσαν την προβληματική ακουστική της (Σχ. 1.7).

Ρίχνοντας μια ματιά σε αίθουσες καινούριες αντίστοιχου όγκου, επιλέγουμε να ακολουθήσουμε μια διαφορετική οδό στον ακουστικό σχεδιασμό, λόγω της διαδραστικότητας φοιτητών-ομιλητή που απαιτεί η λειτουργία του αμφιθεάτρου ως χώρος διδασκαλίας. Για αυτό το λόγο κάνουμε μια πολύ προσεκτική διαχείριση του ποσού ηχοαπορρόφησης που εισάγεται στο χώρο, ώστε να είναι αφενός επαρκής για να μειώσει το χρόνο αντήχησης ικανοποιητικά, αλλά όχι υπερβολική για να μην κατεβάσει τη συνολική στάθμη του ήχου στο χώρο. Όλη μας η μελέτη βασίστηκε στην ιδέα διατήρησης του υπάρχοντος κελύφους, προκειμένου να διατηρηθεί η αρχιτεκτονική ταυτότητα του αμφιθεάτρου.

Πίνακας 0.1 Βασικά στοιχεία Αμφιθεάτρου τ. MAX

Έτος Κατασκευής	1955
Αρχιτέκτονας	Εμμανουήλ Κριεζής
Τρέχουσα διορθωτική μελέτη	Ομάδα σχολής Αρχ/νων ΕΜΠ
Ακουστική μελέτη	Α.Σωτηροπούλου, Γ.Πουλάκος, Μ.Παπαϊωάννου, Ε. Περδικάρη, Ν. Μουγκάση, Ι. Καραγιάννης
Θέσεις	417
Όγκος	3017m ³ (7.2m ³ /θέση)
Πλάτος	13~17.5m
Βάθος	25.1m
Ύψος	8.2~5m
RTmid_{πριν}	2.20s
RTmid_{μετά}	1.10s

1. Ακουστικός σχεδιασμός του αμφιθεάτρου

Λόγω του μεγάλου όγκου της αίθουσας, πρώτο μας μέλημα, εκτός από το να μειώσουμε το χρόνο αντήχησης, ήταν να ελέγξουμε την πιθανότητα να δημιουργείται ηχώ στο χώρο. Αφού διαπιστώσαμε ότι το πρόβλημα εντοπίζεται σε ηχητικές ακτίνες που ανακλώνται στον πίσω τοίχο ως συνήθως^[1], τοποθετήσαμε σε αυτόν ξύλινα ηχοαπορροφητικά πανέλα και διάτρητη ηχοαπορροφητική γυψοσανίδα.

Ηχοαπορρόφηση τοποθετήσαμε επίσης και περιμετρικά της οροφής και όχι σε όλη την επιφάνειά της, αφήνοντας την επιφάνεια πάνω από το ακροατήριο ανακλαστική, ούτως ώστε να στέλλει ηχητικές ακτίνες στο ακροατήριο και ιδίως στις πιο πίσω σειρές.

Τις υπόλοιπες τρεις παρειές του αμφιθεάτρου τις επενδύουμε με ξύλινα ανακλαστικά πανέλα εκτός από μια λωρίδα στις δύο πλευρικές παρειές. Αυτή επενδύεται με ηχοαπορροφητικά ξύλινα πανέλα με γραμμικές εγκοπές. Έτσι ενισχύεται η οπτική φυγή προς τα πίσω και σπάει τη μονοτονία του λείου ξύλου.

Τέλος προσθέτουμε ξύλινο βάθρο στη θέση του ομιλητή για να βελτιώσουμε τις οπτικές και ηχητικές ακτίνες προς το ακροατήριο.

Για τον υπολογισμό του Χρόνου Αντήχησης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$RT_{\text{μετά}} = 0.16V / (A_{\text{έξτρα}} + A_{\text{πριν}}) \quad (1.1),$$

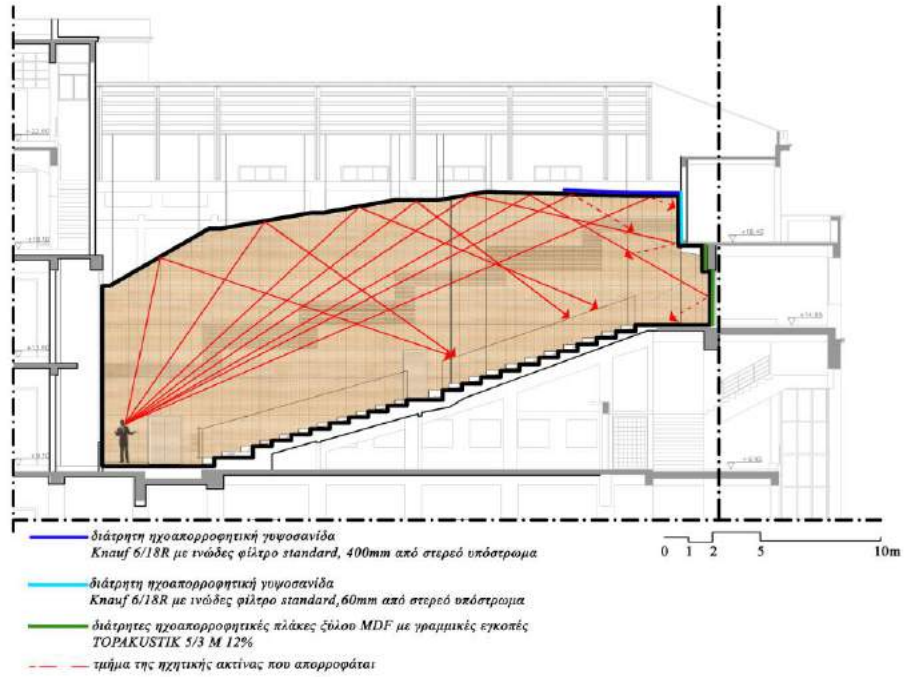
όπου **RT_{μετά}**: Χρόνος Αντήχησης μετά την επέμβαση.

V: Ογκος της αίθουσας.

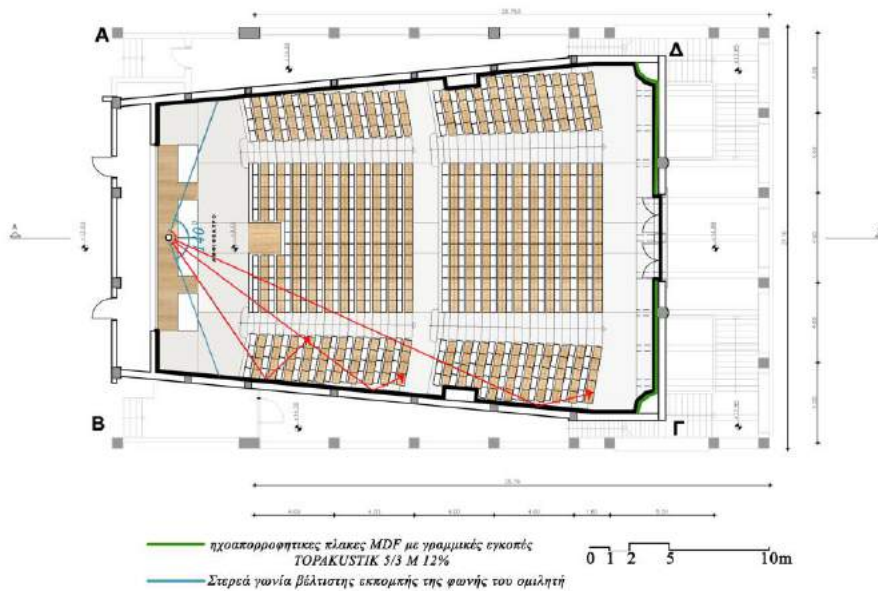
A_{πριν}: Συνολική ηχοαπορρόφησης στην αίθουσα πριν την επέμβαση.

A_{έξτρα}: Συνολική ηχοαπορρόφηση που προστέθηκε στην αίθουσα λόγω της επέμβασης.

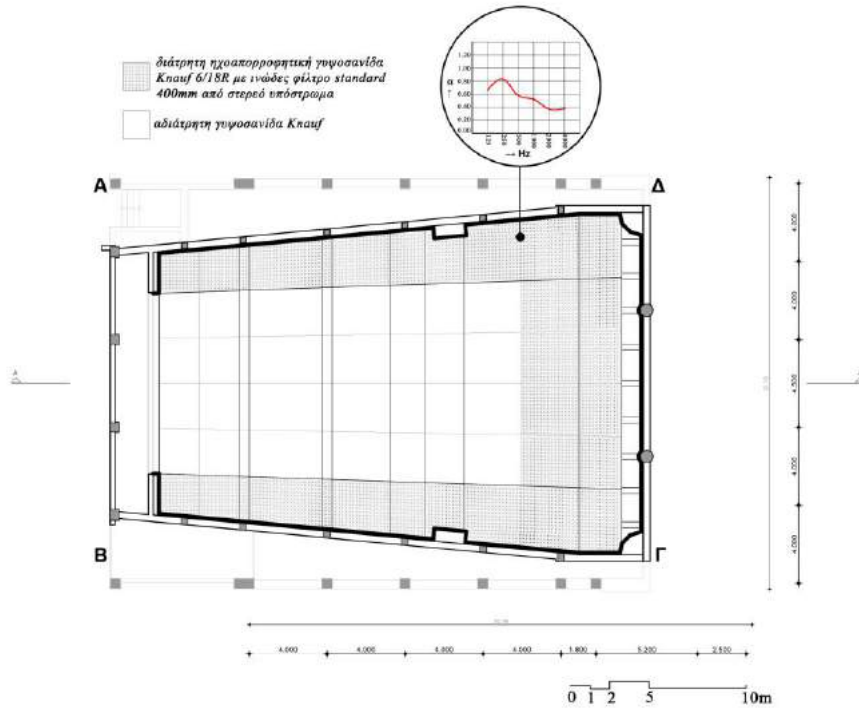
Η ακουστική μελέτη απεικονίζεται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 1.1 – 1.7). Ο εκτιμώμενος Χρόνος Αντήχησης μετά την επέμβαση στην αίθουσα ευρίσκεται εντός της επιθυμητής ζώνης κατά Cremer^[2] (Σχήμα 1.7) είτε αυτός εκτιμήθηκε υπολογιστικά με την κλασική θεωρία της αντήχησης είτε μετρήθηκε στον ψηφιακό χώρο με την χρήση λογισμικού ODEON^[3].



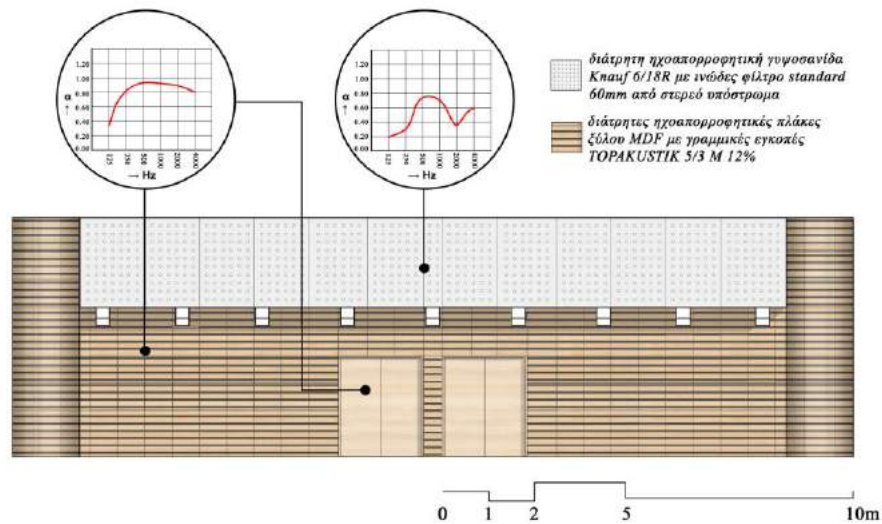
Σχήμα 1.6 ΤΟΜΗ Α-Α. Ανακλώμενες ηχητικές ακτίνες, -έλεγχος για ηχώ.



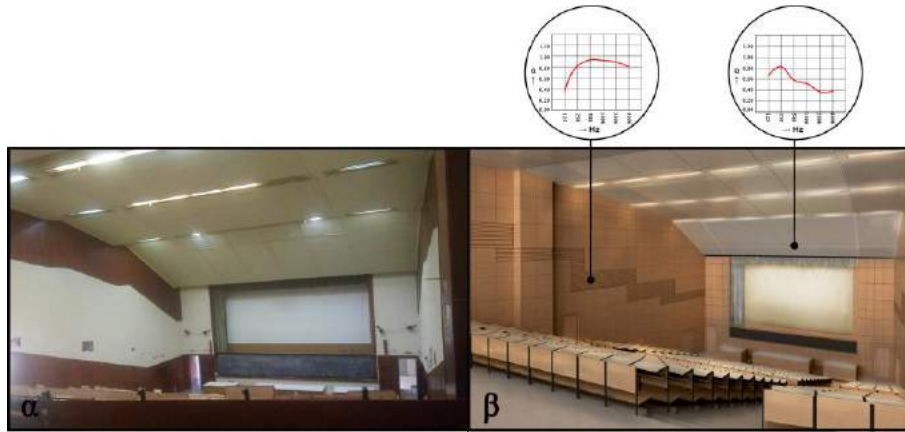
Σχήμα 1.2 ΚΑΤΟΨΗ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ. Έλεγχος ανακλώμενων ηχητικών ακτίνων.



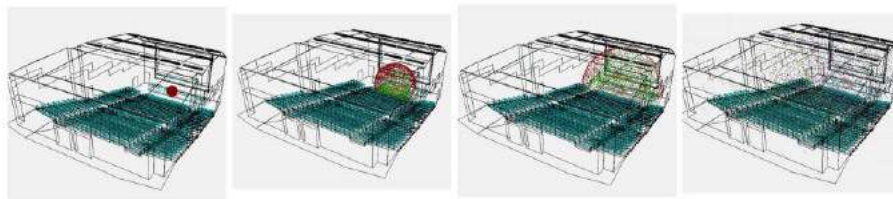
Σχήμα 1.3 ΚΑΤΟΨΗ ΟΡΟΦΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ



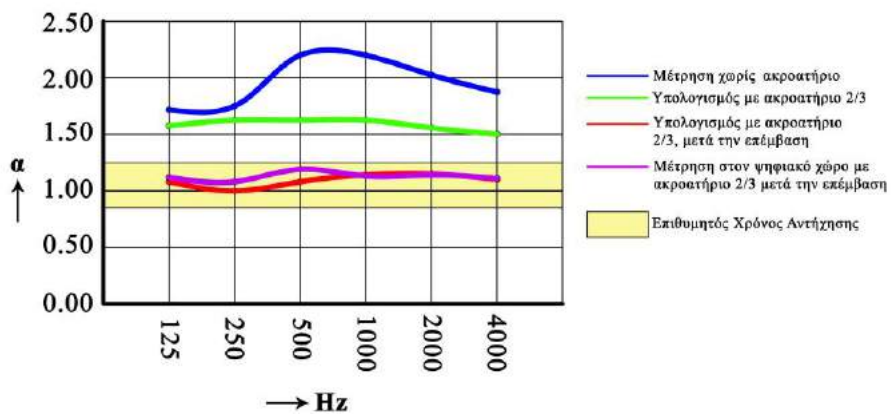
Σχήμα 1.4 ΟΨΗ ΠΙΣΩ ΠΑΡΕΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ



Σχήμα 1.5 ΠΡΟΣΘΙΑ ΑΠΟΨΗ ΑΜΦΙΘΕΑΤΡΟΥ. α)πριν, β)μετά



Σχήμα 1.6 ΨΗΦΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ODEON^[3]. Στην εικόνα απεικονίζεται ο ήχος με σφαιρίδια από την πηγή. Το χρώμα τους μεταβάλλεται όσο ανακλώνται σε περισσότερα σημεία.



Σχήμα 1.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ

Στη συνέχεια υπολογίστηκε, με βάση την κλασική θεωρία της αντήχησης, η στάθμη της φωνής του ομιλητή στο βάθος της αίθουσας^[4] (Πίνακας 1.1). Ο υπολογισμός έδειξε ότι η έξτρα ηχοαπορρόφηση που εισήχθη στην αίθουσα δεν μείωσε αισθητά τη στάθμη του ήχου (1.5 dB), ενώ απεναντίας επέφερε σημαντική βελτίωση στο Χρόνο Αντήχησης της αίθουσας.

Μολονότι η στάθμη της φωνής του ομιλητή στο βάθος της αίθουσας τόσο πριν όσο και μετά την επέμβαση (Πίνακας χ), κρίνεται ικανοποιητική με βάση το κριτήριο θορύβου που υιοθετείται (είναι τουλάχιστον 10 dB πάνω από το κριτήριο θορύβου), τα παραπάνω υπόκεινται στους εξής περιορισμούς. Πρώτον, η πραγματική μείωση του ήχου στο βάθος της αίθουσας συνήθως είναι μεγαλύτερη από τον υπολογισμό λόγω παραβίασης της προϋπόθεσης για διάχυτο ηχητικό πεδίο που θέτει η κλασική θεωρία. Δεύτερον, είναι αβέβαιο κατά πόσον ο θόρυβος του ακροατηρίου (σπουδαστών) και του συστήματος κλιματισμού που θα εγκατασταθούν στην αίθουσα, είναι δυνατόν να μην παραβιάζουν το κριτήριο θορύβου που υιοθετείται. Γι' αυτό προτείνεται να υπάρχει οπωσδήποτε ηλεκτροακουστική εγκατάσταση στην αίθουσα.

Πίνακας 1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΦΩΝΗΣ ΤΟΥ ΟΜΙΛΗΤΗ (L_p) ΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ (24.5 m από τον ομιλητή), στις μεσαίες συχνότητες (mean 500, 1k Hz), σύμφωνα με την κλασική θεωρία της αντήχησης.

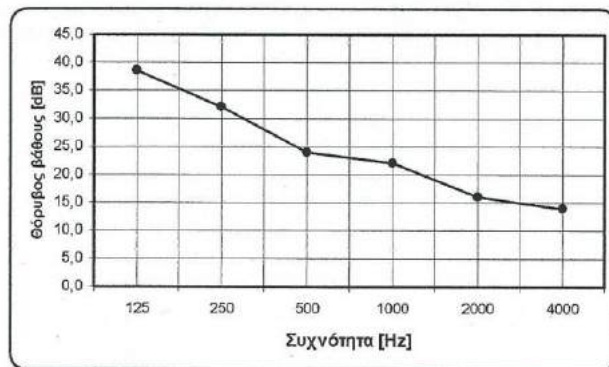
	ΠΙΝ [dB]	ΜΕΤΑ [dB]
L_w	69.0	69.0
L_p	50.5	49.0
NR35	37.0	37.0

όπου L_w : Στάθμη ισχύος κανονικής φωνής ομιλητού^[5].

NR: Τιμή κριτηρίου θορύβου NR35, στις μεσαίες συχνότητες.

2. Αποτίμηση ηχοπροστασίας του αμφιθεάτρου

Ο αρχικός σχεδιασμός του αμφιθεάτρου ευνοεί την προστασία του από θορύβους, λόγω του κενού της ψευδοροφής του, λόγω των διαδρόμων στην πίσω πλευρά και εκατέρωθεν της αίθουσας, καθώς και χάρις στους προθαλάμους στις κύριες εισόδους της αίθουσας. Όλα αυτά τα στοιχεία αποτελούν ζώνες ανάσχεσης έναντι των εξωτερικών θορύβων. Με τον σχεδιασμό αυτό συνάδουν και οι χαμηλές τιμές θορύβου βάθους που μετρήθηκαν στην αίθουσα (20 NR, - Βλέπε Σχήμα 2.1). Ως μέγιστο ανεκτό όριο θορύβου για την παρούσα αίθουσα υιοθετούμε το κριτήριο NC 30-35 (σχολικές αίθουσες, βιβλιοθήκες κλπ.). Η χαμηλότερη τιμή του κριτηρίου αντιστοιχεί σε πολύ καλές συνθήκες ακρόασης ενώ η υψηλότερη τιμή αντιστοιχεί σε ικανοποιητικές συνθήκες ακρόασης. Είναι προφανές ότι ο υφιστάμενος σχεδιασμός ηχοπροστασίας της αίθουσας είναι επαρκής.



Σχήμα 2.1 Θόρυβος βάρους. Αίθουσα κενή με αναμμένα φώτα.

3. Συμπεράσματα

Βασική επιλογή στη μελέτη ήταν να μην θίξουμε τον σχετικά μεγάλο όγκο της αίθουσας και την μορφή του εσωτερικού κελύφους, ώστε να διατηρήσουμε το αρχικό αρχιτεκτονικό ύφος. Εξάλλου, η μορφή της αίθουσας είναι σχετικά πρόσφορη για τον ακουστικό σχεδιασμό. Οι επιλογές του σχεδιασμού τελικά, όπως αυτές περιγράφονται παραπάνω, ικανοποιούν τις προβλέψεις για την ακουστική που έγιναν αφ' ενός υπολογιστικά βάσει της κλασικής θεωρίας της αντήχησης όσον και με μετρήσεις στον ψηφιακό χώρο. Η όσμωση ανάμεσα στον αρχιτεκτονικό και στον ακουστικό σχεδιασμό της αίθουσας είναι προφανής και στηρίζει την άποψη ότι η ακουστική, ανάλογα με την περίπτωση, είναι δυνατόν να αποτελεί σημαντική παράμετρο έμπνευσης και φαντασίας για τη σύνθεση.

4. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά, τους καθηγητές Κα Ελένη Μαϊστρου και Κο Δημήτρη Ησαΐα, Κοσμήτορες της Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ για την τιμή της ανάθεσης της μελέτης και για το ενδιαφέρον στην υλοποίησή της. Ευχαριστούμε επίσης την αρχιτεκτονική ομάδα μελέτης του αμφιθεάτρου, υπό τον συντονισμό της καθηγήτριας Κας Μαρίας Καφρίτσα, για την συνεργασία. Τέλος, ευχαριστίες εκφράζονται στους ιθύνοντες του Ιδρύματος Μιχάλη Κακογιάννη και του Μουσείου Μπενάκη για την επιτόπια επίσκεψη, καθώς και στους αρχιτέκτονες, Βασίλη και Δημήτρη Σγούτα για την ξενάγηση και το γόνιμο διάλογο.

5. Αναφορές

[1]Α.Σωτηροπούλου Μ.Παπαϊωάννου Ν.Μουγκάση, Δ.Νικολάου, Π.Βασιλάτος, Σ.Παναγιώτου. «The Athens Academy of Performing Arts; Acoustic design of the 300-seat Multipurpose Auditorium» in *IOA 9th international conference on Auditorium Acoustics, Institute of Acoustics, Παρίσι, Σελίδες 536- 543 (2015).*

- [2] Cremer L., Muller H.A., Schultz T.J. *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vol. II. Applied Science Publ., London & N.York, (1982)
- [3] ODEON v.9.0 room acoustics program combined edition www.odeon.dk
- [4] Σωτηροπούλου Α. *Ακουστικός σχεδιασμός χώρων ακροατηρίου*. [ηλεκτρ. βιβλ.]: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Αθήνα (2016). Διαθέσιμο στο <http://hdl.handle.net/11419/5850>
- [5] Barron M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E & FN SPON, London (1993)

Συνεδρία Β7: Ψυχοακουστική

Μη-αρμονικότητα και χροιά: Διερεύνηση κατωφλίων αντίληψης αποκλίσεων από την αρμονικότητα σε συνθήκες θορύβου

Βασιλική Βλέτση
Μουσικολόγος / Τμήμα Μουσικών Σπουδών ΑΠΘ
vasvletsi@gmail.com

Κωνσταντίνος Παστιάδης
Επίκουρος Καθηγητής / Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.
pastiadi@mus.auth.gr

Αστέρης Ζαχαράκης
Μετα-Διδακτορικός Ερευνητής / Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.
aszachar@mus.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να επεκτείνει την μελέτη της αντίληψης της απόκλισης από την απόλυτη αρμονικότητα σε περιβάλλον θορύβου. Όπως είναι γνωστό, οι αρμονικοί ήχοι αποτελούν το κυριότερο τμήμα των απαντώμενων στην μουσική χροιών. Από την άλλη πλευρά, οι αποκλίσεις από την πλήρη αρμονικότητα αποτελούν επίσης εγγενή στοιχεία σε αρκετά φυσικά μουσικά όργανα (π.χ. έγχορδα) ενώ σε συνθετικές χροιές ουσιαστικά αίρονται οι περιορισμοί στην σύνθεση των ήχων. Στην εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός ψυχοακουστικού πειράματος που αποσκοπεί στην εκτίμηση των κατωφλίων αντίληψης απόκλισης από την αρμονική θέση μεμονωμένων υπέρτονων μιας αρμονικής σειράς σε συνθήκες ησυχίας και θορύβου. Τέλος, γίνεται παρουσίαση και σύγκριση των αποτελεσμάτων-ευρημάτων με τα ευρήματα παλαιότερων ερευνών, με συζήτηση πάνω σε νέους προβληματισμούς που προκύπτουν, σχετικούς με πιθανές επεκτάσεις της έρευνας.

Inharmonicity and timbre: an investigation of perceptual thresholds of deviations from harmonicity in noisy listening conditions

ABSTRACT

The aim of this work is to expand the study of perception of deviations from pure harmonicity, into noisy listening conditions. As it is generally known, harmonic (or at least quasi-harmonic) sounds are the most frequently answered in musical timbre. On the other hand, deviations from pure harmonicity also comprise an inherent characteristic of several acoustic musical instruments (e.g. strings) while in synthetic timbres any harmonicity restrictions may be practically removed. In the paper we present aspects of the design of a psychoacoustic experiment aimed at assessing the differences of perception thresholds for deviations from harmonic positions of specific overtones of a harmonic series, both in silence and noise conditions. Finally, a presentation and comparison of the findings of the current research with the results of previous works is undertaken, with further discussion upon new arising concerns which extend, possibly, the research

Εισαγωγή

Ο τρόπος προσέγγισης της χροιάς τα τελευταία χρόνια έχει διαμορφώσει νέα πλαίσια διερεύνησης και επεξεργασίας των χαρακτηριστικών της, κυρίως με τη συνεχή εξέλιξη της σύγχρονης επιστημονικής σκέψης και τη συμβολή της γνωστικής θεώρησης. Συγκεκριμένα, σκοπός της γνωστικής μουσικολογικής προσέγγισης είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο το αντιληπτικό σύστημα του ανθρώπου, με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του, μεταλλάσσει, οργανώνει και δομεί το ηχητικό ή μουσικό ερέθισμα από το φυσικό, φυσιολογικό ή ψυχολογικό περιβάλλον από το οποίο προέρχεται [1].

Υπενθυμίζεται ότι η χροιά λογίζεται ως ένα διακριτό χαρακτηριστικό του ήχου το οποίο είναι μετρήσιμο με πολυδιάστατες κλίμακες. Έχει υποστηριχτεί ιστορικά ότι οι ακουστικές ιδιότητες που ορίζουν τη χροιά σχετίζονται με το πλάτος των επιμέρους συχνοτήτων (των αρμονικών υπέρτονων) ενός σταθερού ήχου. Ωστόσο αυτή η θεώρηση είναι ανακριβής [2] και έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες για να αποσαφηνιστούν οι ακουστικές εκείνες παράμετροι που σχετίζονται με την αντίληψη της χροιάς. Παρόλο που όλα τα φυσικά μεγέθη (ένταση, συχνότητα, κυματομορφή, διάρκεια) συνδέονται περισσότερο ή λιγότερο με το ψυχοακουστικό μέγεθος της χροιάς, φαίνεται ότι περισσότερο σημαντική είναι η κυματομορφή ενός ήχου. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η κυματομορφή είναι ένα πολυσύνθετο μέγεθος το οποίο περιλαμβάνει ένα πλήθος παραγόντων που οφείλουν να μελετηθούν και να εξεταστούν ξεχωριστά. Ένας από αυτούς τους παράγοντες που συμπεριλαμβάνονται στην κυματομορφή ενός ήχου και προβληματίζει την παρούσα έρευνα, είναι η μη-αρμονικότητα.

Τα τελευταία χρόνια, με την χρήση της τεχνικής multidimensional scaling (MDS), διερευνώνται οι ακουστικοί εκείνοι παράγοντες που ορίζουν τις αντιληπτικές διαστάσεις της χροιάς [3, 4]. Ο προβληματισμός που στάθηκε αφορμή για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας είναι αν και κατά πόσο, η απόκλιση των επιμέρους συχνοτήτων ενός ήχου, από την αρμονικότητα, μπορεί να θεωρηθεί μία ακουστική παράμετρος που επηρεάζει την αντίληψη της χροιάς. Ο Handel [2] αναφέρει ότι το φαινόμενο της μη-αρμονικότητας προσδίδει στη χροιά των μουσικών οργάνων μία χαρακτηριστική ζεστασιά (“a characteristic warmth”). Την

ίδια άποψη στηρίζει και ο James W. Beauchamp [5] επισημαίνοντας ότι η παραγωγή ενός «ζεστού» τονικού ήχου σχετίζεται με χαρακτηριστικά του φάσματος όπως η «μη συνεκτικότητα» (incoherence) αλλά και η «μη-αρμονικότητα».

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα αφορά μία προεργασία που κρίθηκε απαραίτητη και σχετίζεται με την εύρεση των κατωφλίων ανίχνευσης της μη-αρμονικότητας σε συνθήκες ησυχίας και θορύβου. Αντίστοιχη έρευνα πραγματοποίησε ο Moore και οι συνεργάτες του [6] αναζητώντας τα ποσοστά απόκλισης από την αρμονικότητα, σε συνθήκες ησυχίας, στα οποία οι ακροατές σταματούσαν να αντιλαμβάνονται την ύπαρξη μη-αρμονικότητας σε μεμονωμένους υπέρτονους της αρμονικής σειράς ήχων με θεμέλιες συχνότητες 100, 200 και 400Hz. Η παρούσα έρευνα επεκτείνει την έρευνα του Moore, εξετάζοντας παράλληλα τον παράγοντα του θορύβου.

Ο θόρυβος είναι ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την αντίληψη του ανθρώπου σχετικά με τα ηχητικά φαινόμενα. Οι ερευνητές της επιστημονικής κοινότητας έχουν μελετήσει τον θόρυβο στα πλαίσια της απόκρυψης ηχητικών φαινομένων που προϋπάρχουν (masking effect) [7,8]. Η πρόθεση για διερεύνηση της επίδρασης του θορύβου στην αντίληψη και απόκρυψη της καταληπτότητας του λόγου [9,10] ή οποιουδήποτε ηχητικού φαινομένου, μουσικού ή μη, οδήγησε στην πρωταρχική ανάγκη διερεύνησης κατωφλίων απόκρυψης. Μία τέτοιου είδους ανάγκη οδήγησε στην εκπόνηση της παρούσας έρευνας καθώς οφείλει να προηγηθεί ο έλεγχος των κατωφλίων της αντίληψης της μη-αρμονικότητας πριν εξεταστεί η επιρροή του φαινομένου της μη-αρμονικότητας και έπειτα του θορύβου στον χροϊκό αντιληπτικό χώρο.

Τα ερωτήματα που επιχειρεί να απαντήσει η παρούσα έρευνα είναι αν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά των κατωφλίων αντίληψης αποκλίσεων από την αρμονικότητα για κάθε διαφορετική θεμέλια συχνότητα, για κάθε διαφορετικό μεμονωμένο υπέρτονο που μετατοπίζεται ως προς τη συχνότητά του (θετική μετατόπιση), αλλά και για κάθε επίπεδο θορύβου.

1. Μεθοδολογία

Η βαθμονόμηση των ηχητικών σταθμών των τονικών ερεθισμάτων και του θορύβου (λευκού) έγινε με τη χρήση ειδικού προσομοιωτή σώματος και κεφαλής BK4100 Head and Torso Simulator. Οι ήχοι που εξετάστηκαν είχαν θεμέλια συχνότητα 220 και 440 Hz με πλάτος 61dB. Ο θόρυβος κατά τη διαδικασία της ακρόασης κυμάνθηκε σε τέσσερις τιμές Noise 1 (N1): 55.3dB, Noise 2 (N2): 60dB, Noise 3 (N3): 64.7dB και ησυχία (Silence).

Οι ακροατές άκουγαν κάθε φορά έναν πλήρως αρμονικό ήχο και έναν μη με τη χρήση ακουστικών Sennheiser HD 545. Οι μη-αρμονικοί ήχοι είχαν μετατοπισμένη τη συχνότητα του πρώτου, τέταρτου, έβδομου ή δέκατου αρμονικού προς τη θετική κατεύθυνση. Προσθέτοντας όλες τις διαφορετικές συνθήκες θορύβου, στο πείραμα βρέθηκαν συνολικά 32 κατώφλια αντίληψης της απόκλισης από την αρμονικότητα για κάθε ακροατή. Η ψυχοακουστική δοκιμασία στηρίχθηκε σε ένα υπόδειγμα ανίχνευσης (YES/NO) της διαφοράς μεταξύ ενός ήχου απόλυτα αρμονικής σειράς και των αποκλίσεών της (με κατώτατο όριο 0,03%). Η ερώτηση στην οποία απαντούσαν ήταν: «Οι δύο ήχοι σας φαίνονται διαφορετικοί;». Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των κατωφλίων είναι η προσαρμοστική

ψυχοακουστική μέθοδος PEST (Parameter Estimation by Sequential Testing). Οι απαντήσεις των ακροατών καταχωρούνταν από την ερευνήτρια η οποία χειριζόταν το πρόγραμμα κατά τη διαδικασία του πειράματος. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του περιβάλλοντος LabView.

1.1 Οι Συμμετέχοντες

Οι ακροατές του πειράματος, 31 σε αριθμό, είναι φοιτητές του Τμήματος Μουσικών Σπουδών Θεσσαλονίκης (29), ή σπουδαστές ωδείων σε προχωρημένες τάξεις θεωρητικών και οργάνου (2). Από αυτούς, οι 14 είναι άντρες και οι 17 γυναίκες. Οι ηλικίες κυμαίνονται από 19 μέχρι 24 ετών. Επιλέχθηκαν μουσικοί, για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα η εξοικείωση με τη διαδικασία και ο εντοπισμός των διαφορών των ήχων, ώστε να προκύψουν από την αρχή της διαδικασίας αξιόπιστα αποτελέσματα.

2. Αποτελέσματα

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα δεδομένα τοποθετήθηκαν στο πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης IBM SPSS Statistics, Version 23. Με βάση τον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος επιλέχθηκε η μέθοδος ανάλυσης repeated-measures ANOVA. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων μελετήθηκε ξεχωριστά η επίδραση και η σημασία τριών παραγόντων, αλλά και των αλληλεπιδράσεών τους στη διαμόρφωση των κατωφλίων ανίχνευσης της μη-αρμονικότητας.

Για να ελεγχθεί η σχέση της μεταβλητότητας για κάθε μέσο όρο, πραγματοποιήθηκε το λεγόμενο Mauchly's Test of Sphericity. Το τεστ έδειξε ότι η υπόθεση για την ύπαρξη ισοδύναμης μεταβλητότητας των μέσων όρων για καθένα από τους επτά παράγοντες που εξετάζονται επιβεβαιώνεται μόνο για την επίδραση της σειράς του αρμονικού καθώς, $\chi^2(4)=3,29$, $p > .05$. Για τους υπόλοιπους παράγοντες συμπεριλαμβανομένων και των συνδυασμών τους η σφαιρικότητα δεν επιβεβαιώνεται καθώς για καθέναν από αυτούς έχουμε $p < .05$. Για κάθε έναν από τους παράγοντες πραγματοποιήθηκε διόρθωση (Greenhouse-Geisser) των βαθμών ελευθερίας (degrees of freedom, df) με $p < .05$. Η στατιστικά σημαντική επίδραση των τριών παραγόντων και της αλληλεπίδρασής τους, αναφέρεται ακόμη, με τη διεξαγωγή των Multivariate Tests (Pillai's Trace). Στον πίνακα 2.1 παρατηρούμε ότι για κάθε παράγοντα και για κάθε αλληλεπίδραση $F > 1$ και $p < .01$. Αυτό σημαίνει ότι οι διαφορές των τιμών των κατωφλίων είναι στατιστικά σημαντικές για κάθε παράγοντα και για κάθε αλληλεπίδραση. Σημειώνεται ότι τα σύμβολα f0, harm και n1 αναφέρονται στη θεμέλια συχνότητα, τη σειρά του αρμονικού και το επίπεδο θορύβου αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1 Multivariate Tests

Effect	Value	F	Hypoth. df	Error df	Sig.
f0	,710	73,315 ^b	1,000	30,000	,000
harm	,779	32,926 ^b	3,000	28,000	,000
n1	,792	35,471 ^b	3,000	28,000	,000
f0 * harm	,629	15,819 ^b	3,000	28,000	,000

f0 * nl	,746	27,359 ^b	3,000	28,000	,000
harm * nl	,809	10,351 ^b	9,000	22,000	,000
f0 * harm * nl	,667	4,890 ^b	9,000	22,000	,001

Στις συγκρίσεις των επιπέδων κάθε παράγοντα βρέθηκε, για τη θεμέλια συχνότητα, στατιστικά σημαντική διαφορά στα κατώφλια ($p < .001$), με μικρότερες τιμές κατωφλίων για τη συχνότητα των 220Hz. Για τον αριθμό του αρμονικού βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στα κατώφλια ($p < .05$) για κάθε ζευγάρι που σχηματίζουν ο 1^{ος}, 4^{ος}, 7^{ος} και 10^{ος} αρμονικός, εκτός από τη σύγκριση μεταξύ 7^{ου} και 10^{ου} αρμονικού ($p > .05$). Για το επίπεδο του θορύβου βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά των κατωφλίων αντίληψης της απόκλισης από την αρμονικότητα ($p < .001$) για κάθε ζευγάρι των επιπέδων Noise1, Noise2, Noise3 και ησυχία, εκτός από τη σύγκριση των επιπέδων του Noise1 και της ησυχίας ($p > .05$).

Ακολούθησαν τα τεστ αλληλεπιδράσεων του συνδυασμού των επιπέδων διαφορετικών παραγόντων. Οι αλληλεπιδράσεις εκείνες για τις οποίες **δεν** βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στην απόσταση των τιμών των κατωφλίων είναι: **1.** Σύγκριση της πρώτης θεμέλιας συχνότητας έναντι της δεύτερης σε αλληλεπίδραση με τον έβδομο αρμονικό έναντι του δέκατου. **2.** Σύγκριση της πρώτης θεμέλιας συχνότητας έναντι της δεύτερης σε αλληλεπίδραση με το πρώτο επίπεδο θορύβου έναντι της ησυχίας. **3.** Σύγκριση τέταρτου αρμονικού έναντι του δέκατου σε αλληλεπίδραση με το δεύτερο επίπεδο θορύβου έναντι της ησυχίας. **4.** Σύγκριση του έβδομου αρμονικού έναντι του δέκατου σε αλληλεπίδραση με το πρώτο επίπεδο θορύβου έναντι της ησυχίας.

3. Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας και της έρευνας του Moore et al. [6]

Στον πίνακα 3.1 βλέπουμε τις τιμές των κατωφλίων της παρούσας έρευνας στις θεμέλιες συχνότητες των 220Hz και 440Hz. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται (*t*-test) με τις τιμές των κατωφλίων της έρευνας του Moore et al. στις θεμέλιες συχνότητες των 200 και 400Hz αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η μόνη διαφορά που είναι στατιστικά σημαντική είναι αυτή που αναφέρεται στο κατώφλι κατά τη μετατόπιση του πρώτου αρμονικού, στη θεμέλια συχνότητα των 220 και 200Hz καθώς έχουμε: $M=0,43$ έναντι $M=1,50$, $t(32) = -5,96$, $p < .001$. Οι διαφορές όλων των υπόλοιπων εξεταζόμενων κατωφλίων είναι στατιστικά μη σημαντικές ($p > .05$).

Πίνακας 3.1 Σύγκριση κατωφλίων με τα αντίστοιχα κατώφλια της έρευνας του Moore et al.

f ₀	Harm	Mean (current study)	Mean (Moore et al.)	df	t	Sig (2-tailed)
220Hz 200Hz	1st	,43	1,50	32	-5,96	,000
	4th	,36	,60	32	-,99	,328
	7th	,34	,30	32	,08	,939

	10th	,29	,18	32	,65	,520
440Hz 400Hz	1st	,42	,50	32	-,35	,730
	4th	,27	,28	32	-,06	,952
	7th	2,91	,07	32	,33	,746

Αξίζει να παρατηρηθεί η διαφορά των κατωφλίων κατά τη μετατόπιση του έβδομου αρμονικού στην f_0 των 440 και 400Hz. Παρόλη τη μεγάλη διαφορά, αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική λόγω της μεγάλης τυπικής απόκλισης του μέσου όρου που αναφέρεται στο κατώφλι της παρούσας έρευνας. Ακόμη, στη θεμέλια συχνότητα των 440 και 400Hz δεν υπάρχει η σύγκριση του δέκατου αρμονικού καθώς δεν ερευνήθηκε το αντίστοιχο κατώφλι στην έρευνα του Moore και των συνεργατών του.

4. Συζήτηση

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θεμέλια συχνότητα, φαίνεται ότι όσο πιο χαμηλή είναι, τόσο πιο ευαίσθητη γίνεται η ανθρώπινη ακοή και αντίληψη στην ανίχνευση της μη-αρμονικότητας. Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη τους μέσους όρους των κατωφλίων, παρατηρούμε ότι όσο πιο χαμηλός είναι ο αρμονικός που μετατοπίζεται από την ακριβώς αρμονική του θέση, τόσο πιο ευαίσθητη είναι η ανθρώπινη αντίληψη στην ανίχνευση αυτής της μετατόπισης. Ωστόσο, υπολογίζοντας το τυπικό σφάλμα των μετρήσεων, δεν μπορεί να βγει αυτό το συμπέρασμα από τον έβδομο αρμονικό και έπειτα, καθώς οι διαφορές των κατωφλίων μεταξύ έβδομου και δέκατου αρμονικού, δεν είναι στατιστικά σημαντικές, ενώ δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τι συμβαίνει στον όγδοο και στον ένατο αρμονικό. Αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη τους μέσους όρους των κατωφλίων των ακροατών που διαμορφώνονται μόνο με βάση το επίπεδο θορύβου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο αυξάνεται η στάθμη του θορύβου τόσο μειώνεται η ευαισθησία των ακροατών στην αντίληψη της απόκλισης από την αρμονικότητα. Ωστόσο, με τον συνυπολογισμό του τυπικού σφάλματος, δεν φαίνεται να μπορούμε να βγάλουμε αυτό το συμπέρασμα από την ησυχία μέχρι το πρώτο επίπεδο θορύβου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχουν στατιστικά σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές των κατωφλίων της μη-αρμονικότητας επηρεάζονται από δύο παράγοντες ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, με βάση τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι οι ακροατές είναι πιο ευαίσθητοι στην ανίχνευση της μη-αρμονικότητας σε συνθήκες θορύβου, όσο χαμηλώνει η θεμέλια συχνότητα. Ακόμη βρέθηκε ότι ο αριθμός του αρμονικού που μετατοπίζεται διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των κατωφλίων, όταν αλληλοεπιδρά με το επίπεδο θορύβου, χωρίς ωστόσο να μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα για την πορεία της ευαισθησίας των ακροατών.

Είναι δύσκολο να βγει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για την αλληλεπίδραση των τεσσάρων αρμονικών που απασχόλησαν την έρευνα και των τεσσάρων επιπέδων θορύβου. Ωστόσο υπάρχει μία παρατήρηση που δημιουργεί υπόνοιες και χρήζει περισσότερης μελέτης. Πρόκειται για το πέρασμα από τον έβδομο αρμονικό στον δέκατο όπου παρατηρήθηκαν οι περισσότερες στατιστικά μη σημαντικές διαφορές στην αύξηση των κατωφλίων ανίχνευσης της μη-αρμονικότητας από την ησυχία ως το τρίτο και πιο δυνατό επίπεδο θορύβου (N3). Με αυτήν την παρατήρηση φαίνεται ότι από τον έβδομο αρμονικό και έπειτα, η ευαισθησία των ακροατών όσο ανεβαίνει

η στάθμη του θορύβου είναι παρόμοια. Δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν κάτι τέτοιο συμβαίνει σε ακόμη πιο χαμηλούς αρμονικούς καθώς δεν γνωρίζουμε τη συμπεριφορά των ακροατών στον πέμπτο και στον έκτο αρμονικό. Το γεγονός ότι υπάρχει μία αντίστοιχη στατιστικά μη σημαντική διαφορά από τον τέταρτο στον δέκατο αρμονικό, όσο αυξάνεται το επίπεδο θορύβου είναι μία ένδειξη που δίνει νέες ιδέες και αφορμές για περισσότερη μελέτη.

Σχετικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας με τα αποτελέσματα της έρευνας του Moore, αξίζει να σχολιαστούν κάποια σημεία. Στην έρευνα του Moore et al. συμμετείχαν τρεις ακροατές, οι οποίοι εκπαιδεύτηκαν για να εξοικειωθούν με τη διαδικασία του πειράματος. Αντίθετα, στην παρούσα έρευνα συμμετείχαν 31 ακροατές χωρίς να έχουν κάνει πριν κάποιο τεστ εξοικείωσης. Ένα ακόμη διαφορετικό σημείο στη διεξαγωγή των δύο ερευνών είναι ο τρόπος με τον οποίο ζητούνταν από τους ακροατές να ανιχνεύσουν έναν μη-αρμονικό ήχο. Στην έρευνα του Moore και των συνεργατών του, τους ζητήθηκε να αναγνωρίζουν ποιος από τους δύο ήχους (ένας αρμονικός και ένας μη), ήταν ο μη-αρμονικός. Αντίθετα, στην παρούσα έρευνα ζητήθηκε από τους ακροατές να εκτιμήσουν αν οι δύο ήχοι που άκουγαν (ένας αρμονικός και ένας μη), είναι διαφορετικοί ή ίδιοι. Συνεπώς, οι 31 ακροατές δεν γνώριζαν που ακριβώς έγκεινται οι διαφορές που εντόπιζαν ανάμεσα στους δύο ήχους. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι στην έρευνα του Moore συμπεριλαμβάνονται στα αποτελέσματα και οι αρνητικές μετατοπίσεις των αρμονικών, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην παρούσα έρευνα (μόνο θετικές). Τέλος, οι θεμέλιες συχνότητες ήταν διαφορετικές μεταξύ των δύο ερευνών αλλά επιλέχθηκαν οι πιο κοντινές για να μπορέσει να γίνει η σύγκριση. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι μία μόνο ήταν εκείνη η περίπτωση όπου οι τιμές των κατωφλίων των δύο ερευνών έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές. Όσο για την ευαισθησία των ακροατών, όσο αυξάνεται ο αριθμός του αρμονικού δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας καθώς δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα κατώφλια που αφορούν την μετατόπιση κάθε αρμονικού σε συνθήκες ησυχίας. Στην έρευνα του Moore, φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός του αρμονικού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία των ακροατών στην αντίληψη αποκλίσεων από την αρμονικότητα. Οφείλουμε να είμαστε προσεκτικοί ωστόσο ως προς το συμπέρασμα αυτό, λόγω του μικρού αριθμού των συμμετεχόντων.

5. Προτάσεις για περισσότερη έρευνα

Έχοντας πλέον μία εικόνα ορισμένων παραγόντων που επηρεάζουν την αντίληψη των αποκλίσεων από την αρμονικότητα, η παρούσα έρευνα εφιστά την προσοχή σε κάθε επόμενη έρευνα που εξετάζει τη μη-αρμονικότητα των ήχων και την αντίληψή της. Μέσα από τα αποτελέσματα προέκυψαν πολλοί νέοι προβληματισμοί οι οποίοι μπορούν να σταθούν αφορμή για την επέκταση της έρευνας. Η επέκταση αυτή σχετίζεται με την προσθήκη διαφορετικών επιπέδων για κάθε παράγοντα, ώστε να έρθουμε πιο κοντά σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη διαμόρφωση των κατωφλίων αντίληψης της μη-αρμονικότητας. Συνεπώς προτείνεται η εξέταση περισσότερων θεμελίων συχνοτήτων, αρμονικών και επιπέδων θορύβου ως ανεξάρτητες μεταβλητές.

Ένας τρόπος για να κατανοήσουμε τη σχέση των παραγόντων που έχουν τεθεί στην έρευνα και της αντίληψης της μη-αρμονικότητας, είναι να διερευνήσουμε το ζήτημα από μία πιο εξωτερική σκοπιά. Προτείνεται λοιπόν, η συλλογή και μελέτη παρόμοιων ερευνών και η εκτενέστερη εξέταση και σύγκριση των συμπερασμάτων. Η εξέταση των αιτιών των διαφορετικών αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μία βαθύτερη γνωριμία με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μη-αρμονικότητας, του θορύβου και πολλών άλλων παραγόντων καθώς και με τη σχέση τους με την ανθρώπινη αντίληψη.

6. Αναφορές

- [1] J. Hajda, R. Kendall, E. Carterette, & M. Harshberger “Methodological issues in timbre research”. in *Perception and cognition of music*, edited by I. Deliège, & J. Sloboda, East- Sussex, UK: Psychology Press, pp. 253-306 (1997).
- [2] St. Handel *Listening: An introduction to the perception of auditory events*. MIT press, Massachusetts, p.170, 174 (1989).
- [3] S. McAdams “Perspectives on the contribution of timbre to musical structure” *Computer Music Journal*, **23**, pp. 85-102 (1999)
- [4] J. M. Grey “Timbre discrimination in musical patterns” *J.Acoust. Soc. Am* 64(2), pp. 467–472 (1978).
- [5] J. W. Beauchamp “Analysis and Synthesis of Musical Instrument Sounds” in *Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds* edited by J. W. Beauchamp. Springer New York, pp. 1-89. (2007)
- [6] B. C. J. Moore, R. W. Peters & B.R. Glasberg “Thresholds for the detection of inharmonicity in complex tones” *J.Acoust. Soc. Am* 77(5), pp. 1861–1867 (1985)
- [7] E. Zwicker, H. Fastl *Psychoacoustics: Facts and Models*. NY: Springer, Berlin, p.56-102 (1990)
- [8] H. Gockel, B.C.J. Moore & R.D. Patterson “Asymmetry of masking between complex tones and noise: the role of temporal structure and peripheral compression” *J.Acoust. Soc. Am* **111**(6), pp. 2759–2770 (2002)
- [9] A. Parbery-Clark, E. Skoe & N. Kraus. “Musical experience limits the degradative effects of background noise on the neural processing of sound” *The Journal of Neuroscience*, **29**(45), pp. 14100–7 (2009)
- [10] S. A. Phatak & J. B. Allen “Consonant and vowel confusions in speech-weighted noise” *J.Acoust. Soc. Am* **121**(4), pp. 2312–2326 (2007)

Ψυχοακουστική Αποτίμηση Της Ποντιακής Λύρας

Ιωάννης Πεϊκίδης
Εργαστήριο Μουσικής Ακουστικής
Τεχνολογίας,
Τμήμα Μουσικών Σπουδών,
Καποδιστριακό και Εθνικό
Πανεπιστήμιο Αθηνών
ipeikid@music.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της έρευνας είναι να καταλάβουμε πως μουσικά καλλιεργημένα αυτιά αξιολογούν την ηχητική ποιότητα της Ποντιακής Λύρας, (Kemence στα Τουρκικά και Αραβικά) σε μια ακολουθία δύο πειραμάτων.

Το πρώτο πείραμα περιελάμβανε «Δυτικά» όργανα και Ποντιακή λύρα. Το δεύτερο πείραμα περιελάμβανε μόνο Ποντικές λύρες. Και στα δύο πειράματα, οι συμμετέχοντες, με μουσική παιδία περίπου δέκα χρόνων στο βασικό τους μουσικό όργανο, κλήθηκαν να αποτιμήσουν την ηχητική ποιότητα των οργάνων. Η ακρόαση έγινε με ακουστικά από όλους. Η τελευταία λύρα, και στα δύο πειράματα ήταν το ίδιο όργανο.

Έτσι εκτός από την αξιολόγηση της ηχητικής ποιότητας της Ποντιακής Λύρας, σαν παράπλευρη παρατήρηση των πειραμάτων είναι το ότι αντιλαμβανόμαστε διαφορετικά το ηχόχρωμα ενός ίδιου οργάνου, εάν είναι διαφορετικές οι χροιές των οργάνων που θα ακούσουμε ακριβώς πριν από αυτό.

Perceptual Evaluation Of The Pontic Lyra / Kemence

ABSTRACT

The scope of this research is to better understand how trained ears in music, evaluate the sound quality of the Pontic Lyra, (Kemence in Turkish and Arabic) in a sequence of two experiments.

The first experiment included “Western” instruments: a grand piano, a marimba, a cello, a violin and a Pontic Lyra. The second experiment included a sequence of seven Pontic lyras, five from Greece and two from Turkey. In both experiments, participants, trained in mu-sic, were called to evaluate the sound qualities of the instruments. The last lyra on both experiments was the same instrument.

So, except the perceptual evaluation of the Pontic Lyra, as a side observation was that the same exact instrument is perceived altered if previously we hear sequences of different instruments.

1. Εισαγωγή

Η έρευνα για την ακουστική (1) και την ψυχοακουστική των τοξωτών οργάνων κυριαρχείται από τον βασιλιά της συμφωνικής ορχήστρας, το βιολί (2) και σε ένα ποσοστό από την οικογένεια του (3). Πολλά βιβλία και ανακοινώσεις

συνεδρίων είναι οι καρποί τους. Η έρευνα για τα «εθνικά» όργανα (4) δεν είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακή σε αριθμούς. Οι πρόσφατες τεχνικές MDS (Mining Data Semantics) βασίζονται στο SD (Semantic Differential). Κάποιες από τις ποιότητες που έχουν επιλεγεί (5) (6) (7) έχουν αλληλοκάλυψη, έτσι ώστε οι συμμετέχοντες να προσαρμόζουν τις απαντήσεις τους σύμφωνα με το πως αντιλαμβάνονται τα ηχοχρώματα.

Αυτά τα εννέα διπολικά ζευγάρια (8) (9) είναι τα ακόλουθα:

- Σονάρισμα / Ηχηρότητα (Resonant: small-large),
- Διακύμανση (Fluctuation: unstable-stable),
- Εκκίνηση ήχου (attack: slow-fast),
- Λαμπρότητα (dullness – brightness),
- Τραχύτητα (evenness – roughness),
- Ένρυνος (round – nasal),
- Μεταλλικός (metallic: less-more),
- Πλούσιος (poor-rich),
- Αρμονικός (harmonic: simple-complex).

Στα ερωτηματολόγια, οι επιλογές για κάθε παράμετρο έχουν κλίμακα με εννέα θέσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Ενδεικτικό πεδίο ερωτηματολογίου

less				mid				more

Καθώς οι προβλεπόμενες τιμές δεν είναι πολλές, οι συμμετέχοντες μπορούσαν να επιλέξουν με ευκολία. Επίσης καθώς το πλήθος των προβλεπόμενων τιμών ήταν μονός αριθμός, το εννέα, η μέση τιμή είχε επισημανθεί για ευκολία με την σύμπτυξη «mid»

Φωτογραφία 1.2.

Λυράρης



Η Ποντιακή Λύρα (Φωτογραφία 1.1) είναι ένα τοξωτό όργανο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με τους Πόντιους Έλληνες. Οι Πόντιοι είναι Ελληνικής εθνικότητας, οι οποίοι έχει καταγραφεί ότι εγκαταστάθηκαν και δημιούργησαν περίπου το 800 π.Χ. την πρώτη παροικία στη Σινώπη, μια μικρή χερσόνησο στις βόρειες ακτές της Ανατολίας στον Εύξεινο Πόντο (Ευφημισμός για μια αφιλόξενη θάλασσα, την Μαύρη Θάλασσα).

Η Ποντιακή Λύρα παίζεται σε όρθια θέση (Φωτογραφία 1.2) και ο μουσικός ονομάζεται Λυράρης. Ο Λυράρης παίζει είτε καθιστός είτε όρθιος δίπλα στους χορευτές.

Φωτογραφία 1.1
Ποντιακή Λύρα /
Kemence



Η καταγωγή της Ποντιακής Λύρας χάνεται στην σκόνη του χρόνου. Αναφέρεται **(10) (11)** ότι πήρε αυτή τη μορφή τον 12^ο αιώνα. Αλλού λένε ότι έγινε αρκετά νωρίτερα, τον 8^ο αιώνα, αλλά δεν έχει προκύψει μέχρι τώρα κάποιο ακλόνητο στοιχείο.

2. Δημογραφικά Στοιχεία των Συμμετεχόντων

Όλοι οι 37 συμμετέχοντες ήταν φοιτητές του Τμήματος Μουσικών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Οι 20 από αυτούς ήταν γυναίκες και οι 17 άντρες. Οι ηλικίες τους κυμαίνονταν από 19 μέχρι 27 με μέσο όρο τα 23 χρόνια. Είχαν σπουδάσει το πρώτο τους όργανο κατά μέσο όρο για 10,5 χρόνια και το δεύτερο για 5,5.

Οι 17 (50%) από αυτούς δεν είχαν κάποιο άλλο μέλος της οικογένειάς τους να παίζει κάποιο μουσικό όργανο ή να τραγουδά. Οι 7(15%) είχαν ένα μέλος. Οι 4 είχαν δύο μέλη και ένα μέλος είχε και τα τέσσερα μέλη να παίζουν κάποιο όργανο.

Δύο φοιτητές είχαν ανεπάρκεια στην όραση και έπαιζαν πολλά μουσικά όργανα. Αυτούς τους δύο, συμφοιτητές τους τους βοήθησαν στην συμπλήρωση των ερωτηματολογίων.

3. Έλεγχος

Όλα τα όργανα ελέγχονταν ως προς το χόρδισμά τους, κάθε φορά πριν από την ηχογράφιση των δειγμάτων. Τρεις νότες σε διάστημα τέταρτης παίζονταν, δύο φορές στο πιάνο και την μαρίμπα. Στο τσέλο, βιολί και στις Λύρες παίζθηκαν ανοιχτές χορδές από τρεις έως έξι φορές, ώστε να δώσουν στους ακροατές έναν ηχητικό μέσο όρο, καθώς κάθε δοξαριά είναι διαφορετική από την άλλη.

4. Η Πειραματική Διάταξη

Όλα τα δείγματα έχουν ηχογραφηθεί με το παντοκατευθυντικό μικρόφωνο Behringer ECM8000 τοποθετημένο μισό μέτρο από τις πηγές. Το μικρόφωνο ήταν συνδεδεμένο στο προενισχυτή μικροφώνων Behringer ADA8000. Ο ADA8000 ήταν συνδεδεμένος με την κάρτα ήχου RME Fireface μέσω καλωδίου lightpipe ADAT. Υπολογιστής ηχογραφούσε τα δείγματα με την κάρτα ήχου στο πρόγραμμα Steinberg Cubase.

Για την αναπαραγωγή των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλοί προενισχυτές ακουστικών, συνδεδεμένοι στην κάρτα ήχου RME Fireface. Οι συμμετέχοντες άκουγαν τα δείγματα με ακουστικά Sennheiser HD270 headphones.

5. Διαδικασία

Πριν από τα πειράματα, οι συμμετέχοντες συμπλήρωναν ερωτηματολόγιο σχετικό με το δημογραφικό τους προφίλ.

Μετά από αυτό, η πρώτη νότα από το δείγμα πιάνου ακουγόταν για περίπου ένα λεπτό, μέχρι οι συμμετέχοντες να ρυθμίσουν την ένταση των ακουστικών τους. Μετά ξεκίνησε το πρώτο πείραμα.

Με το τέλος των δειγμάτων κάθε οργάνου, υπήρχε χρόνος δύο – τριών λεπτών για να συμπληρώσουν την τιμές της αξιολόγησης του ηχοχρώματος.

Κάθε πείραμα διαρκούσε 30 με 40 λεπτά της ώρας, με ολική διάρκεια της διαδικασίας περίπου 70 λεπτά.

6. Πρώτο Πείραμα

Το πρώτο πείραμα περιελάμβανε τα εξής όργανα στην ακόλουθη σειρά: Yamaha CFX πιάνο με ουρά, Yamaha ορχηστρική Μαρίμπα τεσσάρων οκτάβων, Hofner τσέλο, άγνωστης κατασκευής βιολί, Ποντιακή Λύρα με αριθμό #7.

Τα ακόλουθα διαγράμματα, 6.1 έως 6.5, παραθέτουν τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές, τις οποίες έδωσαν οι συμμετέχοντες και τον αρμονικό μέσο όρο με ένα δεκαδικό ψηφίο.

Πίνακας 6.1. Πιάνο - Πείραμα 1

1# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	1	1	1	2	1	1	1	1
Max	9	9	9	9	9	7	9	9	9
Mean	5,4	3,9	4,3	4,7	4,6	3,6	3,2	3,8	2,9

Πίνακας 6.2. Μαρίμπα - Πείραμα 1

2# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Max	9	9	9	8	8	8	9	8	9
Mean	4,1	3,3	5,5	3,9	3,9	2,8	2,3	2,4	2,5

Πίνακας 6.3. Τσέλο - Πείραμα 1

3# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	3	1	1	1	1	1	1	1	1
Max	9	9	9	9	9	9	7	9	9
Mean	5,9	4,4	2,6	3,5	2,4	2,5	1,6	5,3	4,5

Πίνακας 6.4. Βιολί - Πείραμα 1

4# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	2	1	1	3	2	1	1	1
Max	9	9	8	9	9	9	9	9	8
Mean	5,9	4,7	3,0	4,6	5,9	5,0	2,6	4,2	3,8

Πίνακας 6.5. Ποντιακή Λύρα #7 - Πείραμα 1

5# instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	1	1	1	3	3	1	1	1
Max	8	9	9	8	9	9	8	9	8
Mean	4,2	3,8	3,2	2,4	6,1	5,1	2,9	2,8	3,1

7. Δεύτερο Πείραμα

Το δεύτερο πείραμα περιελάμβανε επτά Ποντιακές Λύρες. Πέντε από την Ελλάδα και δύο από την Τουρκία (Λύρες #3 και #4). Τα δείγματα της τελευταίας λύρας ήταν τα ίδια με την Λύρα του πρώτου πειράματος. Έτσι οι συμμετέχοντες άκουσαν την ίδια Ποντιακή Λύρα μετά από «Δυτικά» όργανα στο πρώτο πείραμα και μετά από άλλες Ποντιακές Λύρες στο δεύτερο πείραμα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 7.1 μέχρι 7.7.

Πίνακας 7.1. Ποντιακή Λύρα #1 - Πείραμα 2

1# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	1	1	1	1	3	1	1	1
Max	9	9	8	7	9	9	8	8	7
Mean	4,0	3,7	2,6	2,9	5,1	5,3	3,4	2,9	2,7

Πίνακας 7.2. Ποντιακή Λύρα #2 - Πείραμα 2

2# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	1	2	1	1	2	2	1	1	1
Max	9	9	8	9	9	9	9	9	8
Mean	3,9	4,1	2,8	3,1	5,3	4,7	3,6	3,2	2,9

Πίνακας 7.3. Ποντιακή Λύρα #3 - Πείραμα 2

3# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	1	1	1	1	2	3	1	1	1
Max	9	8	8	9	9	9	9	9	8
Mean	3,8	3,0	3,4	3,5	5,8	5,9	3,8	3,4	3,2

Πίνακας 7.4. Ποντιακή Λύρα #4 - Πείραμα 2

4# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	3	1	1	1	3	3	1	1	1
Max	8	9	8	8	9	9	9	9	8
Mean	5,4	3,4	2,8	3,1	6,1	5,7	3,5	3,2	3,1

Πίνακας 7.5. Ποντιακή Λύρα #5 - Πείραμα 2

5# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	1	1	1	3	2	1	1	1
Max	7	9	8	8	9	9	9	7	8
Mean	4,4	3,0	2,8	2,9	6,5	5,5	4,8	3,2	3,0

Πίνακας 7.6. Ποντιακή Λύρα #6 - Πείραμα 2

6# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	1	1	1	1	4	2	1	1	1
Max	7	9	7	8	9	9	9	7	8
Mean	2,8	2,9	2,9	2,3	6,5	5,2	4,0	2,8	2,9

Πίνακας 7.7. Ποντιακή Λύρα #7 - Πείραμα 2

7# Instrument	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
Min	2	1	1	1	3	3	1	1	1
Max	7	8	8	8	9	9	8	9	8
Mean	4,3	3,7	3,3	3,9	5,5	5,4	3,7	4,0	3,8

Συμπεράσματα

Ποιος είναι ο ήχος της Ποντιακής Λύρας;

Αυτή η εργασία προσπαθεί να βάλει σημεία αναφοράς στο ηχόχρωμα της Ποντιακής Λύρας σε σχέση με:

8.1. “Δυτικά” όργανα στο πρώτο πείραμα.

Αυτό περιελάμβανε πιάνο με ουρά, μαρίμπα, τσέλο, βιολί και Ποντιακή Λύρα #7.

Αυτό που ξεχώρισε ήταν η τραχύτητα και η ένρινη ποιότητα του ήχου της Ποντιακής Λύρας.

Η μέση (mean) τιμή της τραχύτητας του κάθε οργάνου είναι: πιάνο με ουρά 4.6, μαρίμπα 3.9, τσέλο 2.4, βιολί 5.9, Ποντιακή Λύρα #7 6.1.

Η μέση (mean) τιμή της ένρινης ποιότητας του κάθε οργάνου είναι: πιάνο με ουρά 3.6, μαρίμπα 2.8, τσέλο 2.5, βιολί 5.0, Ποντιακή Λύρα #7 5.1.

Το βιολί είναι κοντά στις ποιότητες της Ποντιακής Λύρας. Από τους 37 συμμετέχοντες, οι 18 αναγνώρισαν την Ποντιακή Λύρα σαν Λύρα γενικά, ειδικά 1 σαν Ποντιακή, 2 σαν Κρητική, 1 σαν «παραδοσιακό» (όργανο) και 14 απλά σαν «Λύρα». Οι υπόλοιποι 11 σαν βιόλα, 3 σαν βιολί, 1 σαν «χαλασμένο βιολί» και 4 δεν έδωσαν απάντηση.

Έτσι οι μισοί περίπου συμμετέχοντες δεν μπόρεσαν να τακτοποιήσουν το όργανο Έχοντας ακούσει ακολουθία από «Δυτικά» όργανα, 15 νόμιζαν ότι άκου-σαν Βιόλα ή βιολί.

8.2 Διάφορες Ποντικές Λύρες στο δεύτερο πείραμα.

Αυτό περιελάμβανε επτά Ποντιακές Λύρες. Πέντε από την Ελλάδα και δύο από την Τουρκία. Οι δύο από την Τουρκία έχουν μικρότερο σώμα.

Υπήρχαν διαφορές μεταξύ των Λυρών. Αυτό που ξεχώρισε ήταν οι υψηλές τιμές τραχύτητας και ένρινης ποιότητας του ήχου της Ποντιακής Λύρας. Από αυτές τις ποιότητες, μόνο ένας συμμετέχοντες έδωσε τιμή «1» στην Λύρα #1.

8.3 Σαν παράπλευρη παρατήρηση των πειραμάτων είναι το ότι αντιλαμβανόμαστε διαφορετικά το ηχόχρωμα ενός οργάνου, εάν είναι διαφορετικές οι χροιές των οργάνων που θα ακούσουμε ακριβώς πριν από αυτό.

Αυτό παρατηρήθηκε και στα δύο πειράματα, καθώς το τελευταίο όργανο ήταν το ίδιο. Οι συμμετέχοντες άκουσαν την ίδια Ποντική Λύρα μετά από «Δυτικά» όργανα στο πρώτο πείραμα και μετά από άλλες Ποντιακές Λύρες στο δεύτερο πείραμα. Η αρμονική μέση τιμή της Ποντιακής Λύρας #7, των δύο πειραμάτων ανά είδος ποιότητας ηχοχρώματος παρουσιάζεται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1. Ποντιακή Λύρα #7 στα πειράματα 1 και 2

Πείραμα	Resonant	Fluctuation	Attack	Brightness	Roughness	Nasal	Metallic	Rich	Harmonic
1	4.2	3.6	3.2	2.4	6.1	5.1	2.9	2.8	3.1
2	4.3	3.7	3.3	3.9	5.5	5.4	3.7	4.0	3.8

Είναι ενδεικτικό στον πίνακα 2 ότι η αντίληψη μας ενός δείγματος αλλάζει όταν αυτό τοποθετηθεί σε διαφορετικό ηχητικό περιβάλλον.

8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, “The Physics of Musical Instruments”, New York, USA: Springer-Verlag, 1991.

[2] Charalampos Saitis, Bruno L. Giordano, Claudia Fritz, Gary P. Scavone “Perceptual Evaluation Of Violins: A Quantitative Analysis Of Preference Judgments By Experienced Players”, J. Acoust. Soc. Am. 132, pages 4002–4012, December 2012.

[3] Jean Francois Petiot, Rene Causse. “Perceptual Differences Between Cellos: A Subjective/Objective Study”, International Symposium on Musical Acoustics, Sep 2007, Barcelone, Spain. pp.1-1, 2007. <hal-01161422>.

[4] Cumhur Erkut, Tero Tolonen, Matti Karjalainen, Vesa Valimaki “Acoustical Analysis Of Tanbur, A Turkish Long-Necked Lute”, IIAV, 1999.

- [5] Grey, J. M. “Multidimensional Perceptual Scaling Of Musical Timbres”, J. Acoust. Soc. Am., 61(5):1270-1277, May 1977.
- [6] Wessel, D. L. “Timbre Space as A Musical Control Structure”, Computer Music J., 3(2):45-52, June 1979.
- [7] Iverson, P. and Krumhansl, C. L. “Isolating The Dynamic Attributes Of Musical Timbre”, J. Acoust. Soc. Am., 94(5):2595-2603, November 1993.
- [8] Patrick Susini, Guillaume Lemaitre, Stephen McAdams “Psychological Measurement for Sound Description And Evaluation”, 2012.
- [9] Minna Ilmoniemi, Vesa Välimäki, and Minna Huotilainen, “Subjective Evaluation Of Musical Instrument Timbre Modifications” Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004, 8-10 June 2004.
- [10] Werner Bachmann “The Origins of Bowing”, Oxford University Press, 1969.
- [11] Μαλιάρας Νίκος “Βυζαντινά Μουσικά Όργανα”, Εκδόσεις Παπαρηγορίου-Νάκα, 2007.

Λογάριθμοι και Λογαριθμικός («αρμονικός») Κανών: Πυθαγόρεια επινοήματα

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης
Καθηγητής Τμήματος Μουσικών Σπουδών
Φιλοσοφικής Σχολής Πανεπιστημίου Αθηνών,
1. hspyridis@music.uoa.gr
<http://users.uoa.gr/~hspyridis>

ΠΕΡΙΛΗΨΙΣ

Βάσει της Ιστορίας των Μαθηματικών ο Σκώτος αριστοκράτης και πολυεπιστήμων John Napier ανακάλυψε τους λογαρίθμους (1614) και ο Άγγλος αστρονόμος Edmund Gunter επεσήμανε και κατασκεύασε τον ευθύγραμμον λογαριθμικόν κανόνα (1620).

Προκειμένου να συμβιβάσω τα αποτελέσματα εκ του Πυθαγορείου και του Αριστοξενείου τρόπου υπολογισμού των μουσικών διαστημάτων, ερμηνεύω στοιχεία εκ της αρχαιοελληνικής Γραμματείας, εδέχθη ότι το Αριστοξενικόν μουσικόν μέγεθος «*δύναμις φθόγγου*» είναι λογαριθμικού χαρακτήρος.

Κατόπιν πολυετών ερευνών επί των Πυθαγορείων μεσοτήτων κατώρθωσα (1) να ανακαλύψω την Πυθαγόρειον διαδικασίαν υπολογισμού των λογαρίθμων ως προς βάσιν τον αριθμόν 2 (2) ήρουν τας ιδιότητας αυτών και (3) συνέταξα λογαριθμικούς πίνακας.

Ερμηνεύων πληροφορίας του Κλαυδίου Πτολεμαίου, η Πυθαγόρειος και η Αριστοξενείος παραμέτρησης των μουσικών διαστημάτων εφαρμόζεται μεθ' ενός μονοχόρδου μουσικού οργάνου, το display του οποίου είχε συγχρόνως γραμμικήν και λογαριθμικήν χάραξιν, ωςάν τον ευθύγραμμον λογαριθμικόν κανόνα.

Logarithms and Logarithmic (“harmonic”) Ruler: Pythagorean inventions

ABSTRACT

According to the History of Mathematics the Scot's aristocrat and multiscientist John Napier discovered the logarithms (1614) and the English astronomer Edmund Gunter invented and constructed the linear logarithmic ruler (1620).

In order to compromise the outcomes from the Pythagorean and the Aristoxenean methods of calculations of the musical intervals, interpreting data from the ancient Greek literature, I accepted that the Aristoxenean music magnitude «*δύναμις φθόγγου*» is of a logarithmic character.

After many years of research on the Pythagorean means I achieved to (1) discover the Pythagorean procedure of calculating the logarithms to the base 2 (2) found their properties and (3) compiled logarithmic tables.

Interpreting data from Claudius Ptolemaeus, the Pythagorean and Aristoxenean “parametrisis” of the musical intervals was achieved by a monochord music instrument, the display of which had both linear and logarithmic engraving, like the linear logarithmic rule.

1. Προλεγόμενα

Κυρίαί και κύριοι σύνεδροι, ο άνθρωπος εκ της αρχαιότητας προσπαθών να βελτιώσει το βιωτικό του επίπεδο εμηχανεύθη ποικίλους τρόπους και εφηύρεν τεχνικάς, εργαλεία και μηχανάς προς βοήθειαν και άνεσιν αυτού.

Ως γνωστόν, κατά τον 16^ο-17^ο αιώνα παρατηρήθη σημαντικώτατη ανάπτυξις της καθολικής επιστημονικής γνώσεως. Αι ανακαλύψεις των νέων χωρών, ο γύρος του κόσμου υπό του Μαγγελάνου και η ανάπτυξις του ναυτικού εμπορίου προϋπέθετον την παραγωγή χαρτών. Συγχρόνως τα Μαθηματικά εισέβαλον εις την Αστρονομίαν και την Φυσικήν μετά τον Κοπέρνικον, τον Γαλιλαίον και τον Κέπλερ και δι’ αυτών συνεκεντρώθη προς επεξεργασίαν τεράστιος όγκος μαθηματικών δεδομένων. Κι επειδή τυγχάνει ευκολωτέρα η πρόσθεσις του πολλαπλασιασμού, δια των λογαριθμών επετεύχθη η μετατροπή των πολλαπλασιασμών εις προσθέσεις προς ανακούφισιν των ερευνητών.

Άπασαι αι εγκυκλοπαιδείαι αναφέρουν τον Σκώτον πολυεπιστήμονα John Napier (1550-1617) ως τον ανακαλύψαντα τους λογαριθμούς.

Επίσης ένιαί εγκυκλοπαιδείαι αναφέρουν ότι ο John Napier το έτος 1579 εφηύρεν τον υδραυλικόν κοχλίαν προκειμένου να ρυθμίζει το επίπεδο του ύδατος εις τα ανθρακωρυχεία καθώς επίσης, φοβούμενος μήπως ο βασιλεύς Φίλιππος Β΄ της Ισπανίας εισβάλει εις την Αγγλίαν, κατέστρωσεν σχέδια για την κατασκευήν τεραστίων κατόπτρων για να δύναται να κατακαύσει δια των ηλιακών ακτίνων τα εχθρικά πλοία.

Μα αυτά, κυρίαί και κύριοι σύνεδροι, είχαν ανακαλυφθεί και είχαν χρησιμοποιηθεί 19 αιώνας προ του John Napier υπό του Αρχιμήδους του Συρακουσίου, ως αμυντικά όπλα των Συρακουσίων κατά των Ρωμαίων!

Δι’ αυτών υποστηρίζω ότι ο John Napier γνωρίζων άριστα την Λατινικήν γλώσσαν -λόγω των κλασικών σπουδών του- ήλθεν εις επαφήν μετά της αρχαιοελληνικής διανοήσεως μελετών αρχαιοελληνικά συγγράμματα είτε απευθείας εις την ελληνικήν γλώσσαν, είτε εκ μεταφράσεών των εις την Λατινικήν γλώσσαν.

Επίσης, αι εγκυκλοπαιδείαι αναφέρουν ότι ο Άγγλος αστρονόμος Edmund Gunter εις τας αρχάς του 17^{ου} αιώνος επί τῆ βάσει των ιδιοτήτων των λογαριθμών επενόησεν και κατεσκεύασεν τον ευθύγραμμον λογαριθμικόν κανόνα.

Τον 2^ο μεταχριστιανικόν αιώνα ο Κλαύδιος Πτολεμαίος αναφέρεται εις παρεμφερές υπάρχον όργανον, τον αρμονικόν κανόνα, δια του οποίου οί Άριστοξένειοι «παραμετρούσι τὰς συμφωνίας» (*Αρμονικά*, Κεφ. 1, 1, 1).

2. Η αρχαιοελληνική επιστήμη της Αρμονικής

Ο Κλεωνίδης εις το έργον του *Αρμονική Εισαγωγή* (1, 1-4) ορίζει:

« Άρμονική έστιν έπιστήμη θεωρητική τε και πρακτική τῆς τοῦ ήρμοσμένου φύσεως.»

[*Η Αρμονική είναι θεωρητική και πρακτική επιστήμη μελετώσα το διαστηματικόν μέλος εκ των οξέων και των βαρέων φθόγγων.*]

Κυρίαί και κύριοι σύνεδροι, ο Επίκτητος εις το έργον του *Διατριβαί* (1, 17, 12, 2-5) κατονομάζει τον Σωκράτην ως τον γράψαντα την φράσιν ‘άρχη παιδεύσεως ή τών όνομάτων έπίσκεψις’ και τον Ξενοφόντα ως τον γράψαντα ότι ο Σωκράτης ‘ήρχετο από τής τών όνομάτων έπισκέψεως, τί σημαίνει έκαστον’

Δι’ αυτών επιθυμώ να επισημάνω ότι οι αρχαίοι Έλληνες Αρμονικοί έκαστην έννοιαν, την οποίαν εχρησιμοποίησαν, την ώριζον και την ετεκμηρίωνον επακριβώς και λεπτομερώς· είχαν δηλαδή πλήρη επιστημονικήν ορολογίαν.

Η αδυναμία ημών των νεοελλήνων είναι ότι, μη κατέχοντες την εκείνων ορολογίαν πλήρως και λεπτομερώς, δεν δυνάμεθα συχνάκις να αντιληφθώμεν και να κατανοήσωμεν πλείστας όσας εκ των εκείνων επιστημονικάς γνώσεις, απόψεις και θεωρίας.

Τυγχάνει γνωστόν τοις πάσι ότι οι αρχαίοι Έλληνες μουσικοί εθεμελίωσαν θεωρητικώς και πρακτικώς την Ακουστικήν επιστήμην επί των εγχόρδων (=καθαπτών) μουσικών οργάνων, διατυπώσαντες ορθώς εν πολλοίς τους νόμους των χορδών.

Ο Αριστείδης ο Κοϊντιλιανός εις το έργον του *Περί Μουσικής* (1, 5, 21-26) εξηγεί την έννοιαν της χειρουργικής (=πρακτικής) μουσικής «τάσις (=μουσικόν ύψος)» λέγων:

«τάσις δέ έστι μονή και στάσις τής φωνής.»

[*Μουσικόν ύψος δε είναι η παραμονή και η στάσις της φωνής.*]

Διευκρινίζει δε ο Κλεωνίδης εις το έργον του *Αρμονική Εισαγωγή* (§2, γρμ. 17-21) λέγων:

«καλούνται δε αί τάσεις και φθόγγοι· τάσεις μὲν από τών καθαπτών όργάνων παρὰ τὸ τετάσθαι, φθόγγοι δέ, έπει υπό φωνής ενεργοϋνται.»

[*Καλούνται δε αί τάσεις (=μουσικά ύψη) και φθόγγοι. Τάσεις εκ των εγχόρδων οργάνων εξ αιτίας του τενώματος των χορδών, φθόγγοι δε, επειδή αποδίδονται δια της φωνής.*]

Το προκαλούμενον υφ’ εκάστου φθόγγου ακουστικόν αίσθημα ονομάζεται «δύναμις του φθόγγου» και είναι ψυχοακουστικού χαρακτήρος.

«ή δύναμις τοϋ φθόγγου, καθ’ ήν όξύν τινα ή βαρύν λέγομεν.»

Ανώνυμος του Bellermann, §19

Η σπάνις των πληροφοριών περί της «δυνάμεως του φθόγγου» εις την αρχαιοελληνικήν γραμματείαν τυγχάνει μεγίστη.

Συνηθίζεται να λέγεται ότι ο όρος «δύναμις φθόγγου» εσήμαινε μίαν ειδικήν ιδιότητα των φθόγγων, ήτοι μίαν λειτουργίαν ήντινα εις φθόγγος της κλίμακος εκτελεί εν σχέσει προς τους λοιπούς φθόγγους της κλίμακος. Το συναισθηματικόν φορτίον το προκαλούμενον υπό της μουσικής εις την ψυχήν του ανθρώπου, ήτοι το ήθος της μουσικής, οφείλεται εις τας δυνάμεις των ακουομένων φθόγγων.

Εις την επιστήμην της Αρμονικής το μουσικόν διάστημα κατά τον Αριστείδην Κοϊντιλιανόν (*Περί Μουσικής*, Βιβλ. 1, Κεφ. 7) αντιμετωπίζεται «διχώς, κοινώς και ιδίως». Αντιμετωπίζεται «κοινώς» υπό του πυλώνος των Πυθαγορείων και αντιμετωπίζεται «ιδίως» υπό του πυλώνος των Αριστοξενείων.

Οι Πυθαγόρειοι κατά την μελέτην των μουσικών διαστημάτων εδράζονται επί των λόγων των ποιητικών αιτίων, ήτοι επί των μηκών L των ταλαντουμένων τμημάτων χορδής:

$$\text{Μουσικόν διάστημα} = \left(\frac{L_i}{L_j} \right), L_i > L_j.$$

Οι Αριστοξένειοι βασιζόμενοι και εις την αίσθησιν της ακοής και εις την διάνοιαν (Αριστόξενος, *Αρμονικά*) ορίζουν το μουσικόν διάστημα ως την διαφοράν της «δυνάμεως» εκάστου των δύο φθόγγων.

$$\text{Μουσικόν διάστημα (εις μονάδας μουσικού διαστήματος)} = (\deltaύναμις \text{ φθόγγου})_j - (\deltaύναμις \text{ φθόγγου})_i$$

Μολονότι ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (*Αρμονικά*, Κεφ. 1, §1) δηλοί ότι οι Αριστοξένειοι «παραμετροῦσι τὰς συμφωνίας» υπονοῶν ἐνόργανον προσδιορισμὸν τῆς δυνάμεως των φθόγγων, τὰ ὅσα ἀνήρουν περὶ δυνάμεων φθόγγων δὲν φαίνεται νὰ ἐκφράζουν ἀριθμητικῶ τῷ τρόπῳ ἀκουστικὰ αἰσθήματα, ὥστε διὰ τῆς ἀφαιρέσεώς των νὰ υπολογίζωμεν Αριστοξενικῶς τὰ μουσικὰ διαστήματα.

Ἐντροφῶν κατέληξα ὅτι ἡ φυσικὴ σημασία τοῦ ὀρου *δύναμις φθόγγου* εἶναι ὀπόσα ἡμίτονα χαμηλότερον ἀκούγεται ὁ ἐν λόγῳ φθόγγος ἐν σχέσει πρὸς τὸν ὀξύτερον παραγόμενον φθόγγον ὑπὸ τῆς χρησιμοποιοῦμένης χορδῆς.

Ἡ προμνημονευθεῖσα πράξις τῆς ἀφαιρέσεως ὑποδηλοῖ ὅτι αἱ δυνάμεις των φθόγγων ὑπὸ των Αριστοξενείων ἐκφράζονται ἀριθμητικῶς ἐξ ἐνοργάνων μετρήσεων, ἀλλ' ὀπως διευκρινίζει ὁ Πορφύριος εἰς τὸ ἔργον τοῦ *Υπόμνημα εἰς τὰ Αρμονικά τοῦ Πτολεμαίου*, σελ.29, γρμ. 13 δὲν ὀμολογοῦν τίποτα.

«ὅτι καὶ οὗς τοῖς διαστήμασι παραλαμβάνουσιν ἀριθμοὺς τοῖς κατὰ τὰς αἰσθήσεις μερισμοῖς οὐχ ὀμολογοῦσιν».

Ὁ Πορφύριος διευκρινίζει ὅτι τοὺς Αριστοξενείους δὲν τοὺς ἐνδιέφερε ἡ διαφορά τοῦ μεγάλου ἀπὸ τὸ μικρὸ ὀς ἀπλά μεγέθη, ἀλλὰ ἡ διαφορά ἀκουστικῶν αἰσθημάτων, ἦτοι ἡ διαφορά τοῦ ἀκουομένου ὀς ὀξύτερον ἀπὸ τὸ ἀκούομενον ὀς βαρύτερον ἢ ἡ διαφορά των *δυνάμεων* των ἀκουομένων ἤχων.

Ὁ Αριστόξενος, ὁ πρῶτος συστηματικὸς θεωρητικὸς μελετητῆς τῆς ἀρχαιοελληνικῆς μουσικῆς, με τὸν τρόπον τοῦ καὶ τὴν ἐκφρασιν τῆς ἐποχῆς τοῦ προσπαθεῖ νὰ τονίσει ὅτι ἡ ἐννοια «δύναμις τοῦ φθόγγου» εἶναι ψυχοακουστικὸν μέγεθος, ἐνὸ τὸ ποιητικὸν αἴτιον ἢ ἐρέθισμα εἶναι φυσικὸν μέγεθος.

Ἐκ των ἀνωτέρω καταφαίνεται ὅτι οἱ Πυθαγόρειοι προσδιῶριζον τὰ διαστήματα δι' ἀριθμητικῶν λόγων οἱ δὲ Αριστοξένειοι δι' ἀριθμητικῶν διαφορῶν.

Κατόπιν πολυετοῦς μελέτης τῆς ἀρχαιοελληνικῆς μουσικῆς με λίαν οὐσιαστικὴν ἐντρίφυσιν εἰς τὸ θέμα των μουσικῶν διαστημάτων μετὰ λόγου γνώσεως δηλῶ ὅτι δὲν ἀπεδώσαμεν τὴν πρέπουσα προσοχὴν εἰς αὐτὰς τὰς δύο ἀπλάς μαθηματικὰς πράξεις, ἦτοι τὴν ἀφαίρεσιν καὶ τὴν διαίρεσιν, ὀσον ἀφορᾷ εἰς τὸν ρόλον των εἰς τὸν ὀρισμὸν τῆς ἐννοίας τοῦ μουσικῶν διαστήματος.

Καὶ ἐάν ἀναρωτηθῶμεν ὀποῖα ἀντιμετώπισις τοῦ μουσικῶν διαστήματος ὑπερέχει τῆς ἄλλης, ὁ Πορφύριος (*Υπόμνημα εἰς τὰ Αρμονικά τοῦ Πτολεμαίου*, 26, 26-29) μὰς πληροφορεῖ ὅτι ἄλλοι θεωροῦν ἀμφοτέρας ἐξ ἴσου σημαντικὰς καὶ ὅτι ἄλλοι θεωροῦν ὑπερτέραν τὴν διὰ των λόγων ἀντιμετώπισιν τοῦ μουσικῶν διαστήματος, ἀναφέρων μάλιστα τὸν Ἀρχέστρατον μετὰξὺ αὐτῶν.

Καὶ ὁ Πορφύριος εἰς τὸ ἀνωτέρω ἔργον τοῦ ἀναφέρεται εἰς τὴν ἐνστάσιν τοῦ Ἐρατοσθένους, ὀσον ἀφορᾷ εἰς τὸν ὀρισμὸν ἐνός μεγέθους εἴτε διὰ τοῦ λόγου δύο ἀριθμῶν, εἴτε διὰ τῆς διαφορᾶς δύο ἀριθμῶν λέγοντος ὅτι *ἄλλο πράγμα εἶναι ἡ διαφορά ἀπὸ τὸν λόγον*.

«Ἐρατοσθένης μὲν οὖν φησιν ἕτερον εἶναι διάστημα λόγου.»

Εγείρεται αμείλικτον το ερώτημα: Είναι δυνατόν τους αριθμούς των ποιητικών αιτίων, τους οποίους διαιρούν οι Πυθαγόρειοι για τον υπολογισμόν ενός μουσικού διαστήματος να τους αφαιρούν οι Αριστοξένειοι;

Ο Κλαύδιος Πτολεμαίος (*Αρμονικά*, 1, 1) ρητώς αναφέρει ότι η διαφορά δύο μηκών ταλαντούμενων τμημάτων χορδής, τα οποία δια του λόγου των καθορίζουν συγκεκριμένον σύμφωνον μουσικόν διάστημα, καθίσταται ολοέν και μικροτέρα, όσον τα ταλαντούμενα τμήματα χορδής λαμβάνονται ολοέν προς την περιοχόν των οξυτέρων ήχων.

Ποιητικά αίτια		Λόγος	Διαφορά
L ₁ (μ.μ.)	L ₂ (μ.μ.)	L ₁ /L ₂	L ₁ -L ₂ (μ.μ.)
60	40	60/40=3/2	60-40=20
30	20	30/20=3/2	30-20=10
12	8	12/8=3/2	12-8=4

Ήτο γνωστόν εις τους Αριστοξένειους ότι ίσοι λόγοι ταλαντούμενων τμημάτων χορδής, ήτοι ίσα μουσικά διαστήματα κατά την Πυθαγόρειον άποψιν, δεν παρέχουν ίσας διαφοράς, δηλαδή δεν παρέχουν ίσα μουσικά διαστήματα κατά την Αριστοξένειον άποψιν, εάν όντως οι Αριστοξένειοι εβασίζοντο επί της διαφοράς των ταλαντούμενων τμημάτων χορδής.

Επειδή δεν δύναμαι να αποδεχθώ για τους Αριστοξένειους τοιούτον αδρομερές σφάλμα εν τοις πράγμασι γιγνόμενον, οδηγούμαι εις το να ερευνήσω το ενδεχόμενον άλλους αριθμούς να διήρουν οι Πυθαγόρειοι και άλλους αριθμούς να αφήρουν οι Αριστοξένειοι, ώστε αμφότεροι να αποφαίνωνται ορθώς περί του εξεταζομένου μουσικού διαστήματος.

Προκειμένου οι δύο ορισμοί Πυθαγόρειος και Αριστοξένειος να παράσχουν ισοδύναμα αποτελέσματα, ελλείψει άλλης πληροφορήσεως εκ πηγών, οδηγήθην εις την παραδοχήν ότι η «δύναμις φθόγγου» σχετίζεται με τον λογάριθμον ως προς βάσιν τον αριθμόν 2 –λόγω οκτάβας (2/1)- του ποιητικού του αιτίου, ήτοι:

$$\text{δύναμις του φθόγγου} = k \cdot \log_2(L)$$

Ο προσδιορισμός της τιμής του k επιτυγχάνεται εκ του ευφώνου μουσικού διαστήματος της διαπασών λ.χ. 4/2

$$12 \text{ ημίτονα} = k \cdot \log_2(4/2) = k \cdot \log_2(2) = k$$

$$\text{Άρα, δύναμις φθόγγου εις ημίτονα} = 12 \cdot \log_2(L)$$

Ο αριθμός 12 εκφράζει ότι υπάρχουν 12 ημίτονα ανά οκτάβα, υπονοών έναν κάποιον ίσον συγκερασμόν, όστις εις την Πυθαγόρειον θεωρίαν κατά προσέγγισιν υφίσταται και εις την Αριστοξένειον υφίσταται απολύτως.

Εις την επιλογήν της σχέσεως $\log_2(L)$ δια την έκφρασιν της «δυνάμεως» ενός φθόγγου με παρώτρυνε η Κλεωνίδειος πληροφορία «δύναμις φθόγγου είναι η τάξις του φθόγγου εντός ενός μουσικού συστήματος».

Όντως, αυξανόμενου του μήκους του ποιητικού αιτίου ενός φθόγγου, αυξάνει και η θέσις κατατάξεως του εν λόγω φθόγγου εις το συγκεκριμένον μουσικόν σύστημα.

$$\begin{aligned} \text{Μουσικόν διάστημα εις ημίτονα} &= \\ &= (\text{Δύναμις φθόγγου})_j - (\text{Δύναμις φθόγγου})_i = \\ &= 12 \cdot \log_2(L_j) - 12 \cdot \log_2(L_i) = 12 \cdot \log_2(L_j/L_i), L_j > L_i \end{aligned}$$

Εκ των μέχρι τούδε εκτεθέντων προκύπτει κατά ξεκάθαρον τρόπον ότι εις περίπτωσιν κατά την οποίαν το ποιητικόν αίτιον αναφέρεται εις μήκος ταλαντουμένου τμήματος χορδής, το αίσθημα αναφέρεται εις την δύναμιν του παραγομένου ήχου, ήτοι εις το μουσικόν ύψος (pitch) του παραγομένου ήχου. Δηλαδή για δύο δοθέντα μήκη ηχούντων ταλαντουμένων τμημάτων χορδής το μουσικόν των διάστημα εκφράζεται Πυθαγορικώς ως καθαρός αριθμός δια του λόγου των εν λόγω μηκών, ενώ Αριστοξενικώς εκφράζεται εις ημίτονα όχι δια της διαφοράς των μηκών αυτών των δύο ταλαντουμένων τμημάτων χορδής, αλλά δια της διαφοράς των λογαρίθμων αυτών των μηκών ως προς βάσιν τον αριθμόν 2, όπερ σημαίνει δια της διαφοράς των ηχητικών αισθημάτων των προκαλουμένων υπ' αυτών των ηχούντων ταλαντουμένων τμημάτων χορδής.

Μελετών τα της μουσικής θεωρητικά και πρακτικά θέματα εις τα γραπτά των αρχαίων Ελλήνων συγγραφέων αρμονικών ή και φιλοσόφων εστάθην ενεδός προ μιας δηλώσεως του μεγίστου Κλαυδίου Πτολεμαίου, όστις εις το έργον του *Αρμονικά*, Κεφ. 1, §1, γρμ.1. δηλοί ότι οι Αριστοξένειοι καθορίζουν με σωστόν τρόπον τα σύμφωνα μουσικά διαστήματα (=συμφωνίας) συγκρίνοντάς τα με κάτι άλλο, το οποίον δεν είναι ούτε μουσικά διαστήματα, ούτε μουσικοί φθόγγοι.

«Ότι ού δεόντως οί Αριστοξένειοι τοίς διαστήμασι και ού τοίς φθόγγοις παραμετροῦσι τὰς συμφωνίας.»

Ανατρέχων εις το Λεξικόν της Αρχαίας Ελληνικής Γλώσσης των Liddell & Scott ευρίσκω την σημασίαν του ρήματος παραμετρέω: μετροῶ τι δι' άλλου, τοποθετῶν δηλ. τὸ ἐν παραλλήλως πρὸς τὸ ἄλλον, συγκρίνω, παραβάλλω.

Τι είναι αυτό, το οποίον δι' αυτής της δηλώσεως του επιδιώκει ο Κλαύδιος Πτολεμαίος να μας καταστήσει σαφές;

3. Πυθαγόρειοι λογάριθμοι

Πορφύριος (*Υπόμνημα εις τα Αρμονικά του Πτολεμαίου*, 29, 18-25) αναφέρει: «Οι Πυθαγόρειοι τας διαφοράς των φθόγγων τας εκφράζουν δι' αριθμητικών λόγων. Οι δε Αριστοξένειοι μετρούν με ακρίβειαν τα διαστήματα τα περιλαμβανόμενα μεταξύ των φθόγγων και εις τα διαστήματα απονέμουν ακατανοήτους αριθμούς προερχομένους εκ πολυπλόκων διαδικασιών. Τούτο λοιπόν παρά τον αριθμητικόν λόγον των φθόγγων είναι σφάλμα, και λέγουν ότι οφθαλμοφανώς σφάλουν, αλλά δεν φανερώνουν τους αριθμούς δια των οποίων μετρούν τα αισθήματα.»

Εγνώριζον οι Πυθαγόρειοι τους λογαρίθμους; Δι' εμέ η απάντησις είναι καταφατική. Ο Πυθαγόρας διετύπωσε μίαν πλήρη μαθηματικήν θεωρίαν λογαριθμικού χαρακτήρος περί των μουσικών διαστημάτων, δεδομένου ότι προσθέτει τα μουσικά διαστήματα πολλαπλασιάζων τας αριθμητικές των σχέσεις και τα αφαιρεί διαιρών ταύτας. Πώς είναι δυνατόν να το επιτύχει τούτο χωρίς να γνωρίζει τι εστί λογάριθμος;

Οι Πυθαγόρειοι και εγνώριζον και εχρησιμοποιούον τους λογαρίθμους ως προς βάσιν τον αριθμόν 2 και τους υπελόγιζον, ως κατώρθωσα να ανακαλύψω, με την μεσότητα της 4^{15} εκ των δέκα Πυθαγορείων αναλογιών και τη βοήθεια των αρτιάκις αρτίων αριθμών (2^v , $v = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Όντως, δοθέντων δύο μη διαδοχικών ακεραίων αριθμών α και γ ($\alpha > \gamma$) εντίθεται μεταξύ αυτών ο ακέραιος αριθμός $\left(\beta = \frac{\alpha^2 + \gamma^2}{\alpha + \gamma}\right)$ κατά την τετάρτην Πυθαγόρειον

μεσότητα. $\left(\frac{\alpha-\beta}{\beta-\gamma} = \frac{\gamma}{\alpha}\right)$. Εάν δεν προαπαιτείται ο εντιθέμενος αριθμός β να είναι ακέραιος, τότε δυνατόν οι αριθμοί α, γ να είναι διαδοχικοί αριθμοί. Ευκόλως προκύπτει ότι:

$\beta_4 = 2\beta_1 - \beta_3$ ένθα β₁ και β₃ αι μεσότητες κατά την πρώτην και την τρίτην Πυθαγορείους αναλογίας.

Εχρησιμοποιήθη η γεννήτρια συνάρτησις $[L = \left(\frac{2^\alpha + 2^\gamma}{2}\right) \alpha, \gamma \in N]$ για τον καθορισμό των τιμών των ποιητικών αιτίων των μουσικών διαστημάτων. Όσον πλησιέστερον μεταξύ των κείνται οι αριθμοί α, γ, τοσούτον περισσότερον $\beta_4 \rightarrow \log_2(L)$. Λαμβάνοντες τους α, γ ως διαδοχικούς ακεραίους αριθμούς η προσέγγισις είναι εξαιρετική εις πρώτον δεκαδικόν ψηφίον.

Τους λογαρίθμους, τους οποίους ανεκάλυψα τους ονόμασα Σπυριδείους (slog), ήρουν τας ιδιότητάς των και βάσει αυτών συνέταξα λογαριθμικούς πίνακας, ως εικάζω θα είχαν πράξει και οι Πυθαγόρειοι κατά την αρχαιότητα για την επίλυσιν λογαριθμικών προβλημάτων.

Προς επίρρωσιν παντων των ανωτέρω παρατίθεται ο Πίναξ 1 και το παράδειγμα 1.

Πίναξ 1: Διττός υπολογισμός των slog(L) και η σύγκρισις αυτών μετά των log₂(L).

α	γ	$L = \left(\frac{2^\alpha + 2^\gamma}{2}\right)$	β ₁	β ₃	slog(L) = β ₄	slog(L) = 2β ₁ - β ₃	log ₂ (L)
1	2	3	1.5	1.3	1.7	1.7	1.6
2	3	6	2.5	2.4	2.6	2.6	2.6
3	4	12	3.5	3.4	3.6	3.6	3.6
4	5	24	4.5	4.4	4.6	4.6	4.6

Παράδειγμα 1

L ₁	L ₂	L ₂ /L ₁	Δύναμις1 = log ₂ (L ₁) = β ₄₁	Δύναμις2 = log ₂ (L ₂) = β ₄₂	Δβ ₄	Αριστοξενικό Διάστημα εις Ημίτονα=12·Δβ ₄	Ονομασία Διαστήματος
18	24	4/3	4.14	4.56	0.42	5.04≅5	Διατεσσάρων
12	18	3/2	3.57	4.14	0.57	6.86≅7	Διαπέντε

Και εις το σημείον τούτο ανατρέχω εις την δήλωσιν του μεγίστου Κλαυδίου Πτολεμαίου (Αρμονικά, Κεφ. 1, 1, 1) ότι «οί Αριστοξένοι ... παραμετρούσι τας συμφωνίας», όπερ σημαίνει ότι μετρούν τας συμφωνίας δια δύο παραλλήλων διαδικασιών και συγκρίνουν παραβάλλοντες τα προκύπτοντα αποτελέσματα.

Τίνι τρόπω δυνατόν να εγίγνετο η παραμέτρησις αύτη;

Προσωπική μου άποψις είναι δι' ενός συνθέτου κανόνος, ήτοι μονοχόρδου, πιθανώς δια του αποκαλουμένου υπό του Κλαυδίου Πτολεμαίου (Αρμονικά, 1, 2, 2-4) αρμονικού κανόνος.

«Τὸ μὲν οὖν ὄργανον τῆς τοιαύτης ἐφόδου καλεῖται κανὼν ἄρμονικός, ἀπὸ τῆς κοινῆς κατηγορίας καὶ τοῦ κανονίζειν τὰ ταῖς αἰσθήσεσιν ἐνδέοντα πρὸς τὴν ἀλήθειαν παρειλημμένος.»

Φαντάζομαι ἓναν λογαριθμικὸν κανόνα, ἥτοι ἓν μονόχορδον ἐκατέρωθεν τῆς χορδῆς τοῦ οὐοίου να υπάρχουν δύο διαφορετικαὶ κλίμακες μεγεθῶν (γραμμικὴ, λογαριθμικὴ) ἔχουσαι τὴν ἀρχὴν των εἰς τον χορδοκράτην. Ἐκ τῆς γραμμικῆς κλίμακος προκύπτουν τα μεγέθη των ποιητικῶν αἰτίων, ἥτοι τα μήκη των ηχούντων δονουμένων τμημάτων χορδῆς ἐκ των οὐοίων υπολογίζεται Πυθαγορικῶς το μουσικὸ διάστημα ὡς λόγος μηκῶν. Ἐκ τῆς λογαριθμικῆς κλίμακος προκύπτουν τα μεγέθη των προκαλουμένων ακουστικῶν αἰσθημάτων, ἥτοι αἱ τιμαὶ β_4 , ἐκάστη δίπλα εἰς το ἀντίστοιχον μήκος του δονουμένου τμήματος χορδῆς $\beta_4 = \log_2(L)$. Ἐκ τῆς προκυπτούσης διαφορᾶς $\Delta\beta_4 = \beta_{41} - \beta_{42}$ προκύπτει το Ἀριστοξενικὸν μέγεθος του μετρομένου μουσικοῦ διαστήματος εἰς ἡμίτονα (διάστημα εἰς ἡμίτονα = $12 \cdot \Delta\beta_4$).

Σας ευχαριστώ.

Αξιολόγηση κατηγοριοποίησης στερεοφωνικού ειδώλου σε δωμάτια ακρόασης από αμφιωτικές παραμέτρους.

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Σταμάτης Κάρλος
Ερευνητής / Υπ/κά
Μαθ/κά – Υπ/κή
νοήμοσυνη, Τμήμα
Μαθηματικών
Πανεπιστημίου Πατρών
stkarlos@upatras.gr

Αστέριος Τερπίνας
Φοιτητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
terpste@yahoo.com

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας,
Τμήμα Ηλ. Μηχανικών
Πανεπιστημίου Πατρών
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ακρίβεια του στερεοφωνικού ειδώλου σε συστήματα αναπαραγωγής ήχου από δύο οπτικές: (i) τη δυνατότητα χρήσης ενός ταξινομητή των αμφιωτικών παραμέτρων του σήματος για την εκτίμηση της γωνίας εμφάνισης του εικονικού ειδώλου της πηγής, (ii) την διασπορά του ιδανικού σημείου ακρόασης σε συνθήκες αντήχησης σε σχέση με το ανηχοϊκό σενάριο ακρόασης.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν πηγές με διαφορετικά χαρακτηριστικά κατευθυντικότητας, σε τυπική στερεοφωνική διάταξη ακρόασης και το βήμα μετακίνησης του εικονικού ειδώλου από την ακραία αριστερή θέση ως την κεντρική θέση τέθηκε ίσο με 5 μοίρες. Οι προσομοιώσεις έγιναν για χώρους με διαφορετική ακουστική συμπεριφορά και ανηχοϊκές ή ρεαλιστικές συνθήκες ακρόασης. Οι αμφιωτικές παράμετροι της Διωτικής Διαφοράς Χρόνου Αφιξης (ITD), Διωτικής Διαφοράς Στάθμης (ILD) και Διωτικής Συσχέτιση (IC), υπολογίστηκαν και εξετάστηκαν για διάφορα σήματα ήχου.

Για την εκτίμηση της γωνίας του εικονικού ειδώλου χρησιμοποιήθηκε πρωτότυπος ταξινομητής δέντρου απόφασης που εκπαιδεύτηκε με τεχνικές αυτο-εκπαίδευσης και σποραδικής χρήσης δεδομένων. Η ακρίβεια εκτίμησης κυμαίνεται σε ποσοστά από 92% για ιδανικές συνθήκες αντήχησης και ταυτόσημα σήματα εκπαίδευσης/ελέγχου έως 55% για μεγάλη αντήχηση και διαφορετικά σήματα εκπαίδευσης/ελέγχου.

Η χωρική διασπορά του σημείου ακρόασης εξετάζεται και αξιολογείται σε σχέση με τις συνθήκες ακουστικής ορίζοντας μία πρότυπη συνάρτηση κατανομής της διασποράς.

Stereo image evaluation in listening rooms using binaural auditory features

ABSTRACT

The proposed method presents simulated tests to evaluate two aspects of stereo imaging accuracy from audio system listening: (i) the panned phantom image localization accuracy at 50 steps and (ii) the sweet spot spatial spread from the ideal anechoic reference. This study is based on simulated tests using data for loudspeakers of different directivity under ideal anechoic or varying reverberant room conditions. From the received audio signals binaural auditory features (ILDs, ITDs and ICs) are extracted via a standard binaural model. For the evaluation, an ensemble classifier was used under a sparse data self-training achieving localization accuracy ranging from 92% (for ideal anechoic when training/test data were similar audio category), down to 55% (for high reverberation when training/test data were different music segments), Sweet spot accuracy was defined and evaluated as a spatial spread distribution function.

Θεματική ενότητα: Ψυχοακουστική (Psychoacoustics) / Ψηφιακή επεξεργασία ήχου (Digital Acoustic Signal Processing)

Λέξεις κλειδιά: στερεοφωνική αναπαραγωγή, στερεοφωνική διάταξη, στερεοφωνικό είδωλο, ταξινομητής, διασπορά στερεοφωνικού ειδώλου.

1. Εισαγωγή

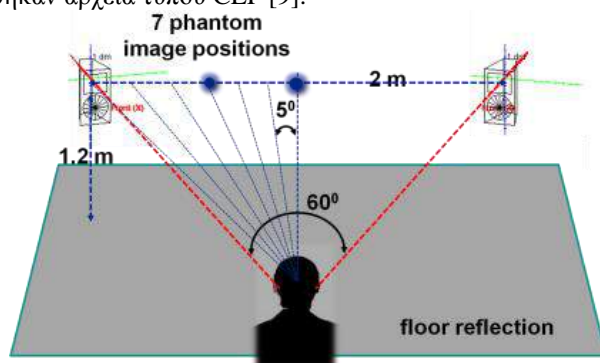
Σε ηχητικά συστήματα, η πιστότητα αναπαραγωγής του στερεοφωνικού ειδώλου δεν έχει μέχρι σήμερα πιστοποιηθεί μέσα από αντικειμενικά κριτήρια, κυρίως επειδή εξαρτάται από σύνθετους συνδυασμούς των ηχείων και του χώρου ακρόασης [1]. Στην εργασία αυτή όπως και σε σχετική από τους ίδιους συγγραφείς [3] χρησιμοποιείται μέθοδος μοντελοποίησης και εξαγωγής αμφιωτικών παραμέτρων από τα στερεοφωνικά σήματα που φθάνουν στα αυτιά του ακροατή, οι οποίες κατόπιν αναλύονται και εισάγονται σε ταξινομητή. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται η ακρίβεια αναπαραγωγής της θέσης (γωνίας) αναπαραγωγής του εικονικού ειδώλου της πηγής και η χωρική διασπορά του ιδανικού σημείου ακρόασης (sweet spot). Άλλες παράμετροι που θεωρούνται σημαντικές για την στερεοφωνική αναπαραγωγή όπως το Εύρος της Πηγής (Apparent Source Width) και η Εμβύθιση του Ακροατή (Listener Envelopment) δεν εξετάζονται. Η ακρίβεια αναπαραγωγής του Εικονικού Ειδώλου πηγής εξετάζει την στιβαρότητα της αντιληπτικής εκτίμησης που προκύπτει από τον εντοπισμό λόγω της άθροισης των σημάτων από τα 2 ηχεία στα αυτιά του ακροατή. Στην εργασία αυτή, η παράμετρος αυτή εκτιμάται μέσω ανάλυσης των Γωνιών Άφιξης των αμφιωτικών σημάτων (Direction of Arrival Angle, DOA) σε σύγκριση με την επιθυμητή γωνία-θέση κατά την κωδικοποίηση. Η ακρίβεια της Περιοχής Ιδανικής Ακρόασης (Sweet spot accuracy) αφορά τη μέγιστη απομάκρυνση του ακροατή από την ιδανικό κεντρικό άξονα εκπομπής που οδηγεί σε προκαθορισμένο βαθμό υποβάθμισης στην αντίληψη των παραμέτρων της

Διωτικής Διαφοράς Χρόνου Άφιξης (ITD) ή της Διωτικής Διαφοράς Στάθμης (ILD) [2].

Η προτεινόμενη μέθοδος εισάγει ένα εργαλείο «εικονικού ακροατή» για εκτίμηση της χωρικής ποιότητας αναπαραγωγής [4] που πλέον είναι εξαιρετικά χρήσιμο λόγω της επέκτασης χρήσης σύνθετων πολυκαναλικών διατάξεων ηχητικής αναπαραγωγής [5,6] καθώς επίσης και λόγω της πρόσφατης διάδοσης των μικρών φορητών ηχείων που αναπαράγουν στερεοφωνικό σήμα, συχνά αξιοποιώντας ανακλάσεις από κοντινές τους επιφάνειες. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε μοντέλο της αμφιωτικής αντίληψης που αρχικά προτάθηκε από τους Weirstorf και Sprogs [6] και εισαγάγει πρότυπη τεχνική για την ταξινόμηση της ακρίβειας εντοπισμού των εικονικών ειδώλων με χρήση ταξινομητή δέντρου απόφασης που εκπαιδεύτηκε με τεχνικές αυτο-εκπαίδευσης και σποραδικής χρήσης δεδομένων [7].

2. Προσομοιώσεις

Τα πειράματα βασίστηκαν σε προσομοιώσεις μίας στερεοφωνικής διάταξης αποτελούμενη από τα δύο ηχεία τοποθετημένα σε απόσταση 2m μεταξύ τους, σε ύψος 1.2m και σε 30° γωνία προς την θέση του εικονικού ακροατή, η οποία είναι η ιδανική θέση ακρόασης (sweet spot) Σχ.1. Οι αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις της διάταξης συμπεριλαμβανομένου του δωματίου εξήχθησαν με τη χρήση του προγράμματος CATT-Acoustic [8]. Για την κατευθυντικότητα των ηχητικών πηγών χρησιμοποιήθηκαν αρχεία τύπου CLF [9].



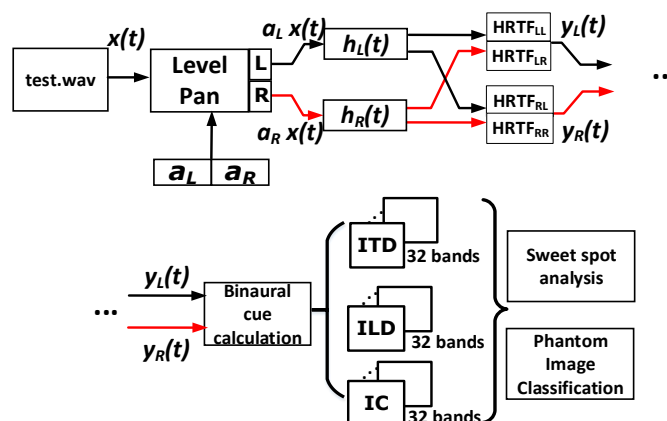
Σχήμα 1. Απεικόνιση της στερεοφωνικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

Όπως φαίνεται στο Σχ.2 τα αμφιωτικά σήματα $y_L(t)$ και $y_R(t)$ υπολογίστηκαν σύμφωνα με την εξ. (1).

$$\begin{aligned}
 y_L(t) &= \{ (a_L x(t) * h_L(t)) * HRTF_{LL} + \\
 &\quad (a_R x(t) * h_R(t)) * HRTF_{LR} \} \\
 y_R(t) &= \{ (a_L x(t) * h_L(t)) * HRTF_{RL} + \\
 &\quad (a_R x(t) * h_R(t)) * HRTF_{RR} \} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Οι διάφορες διατάξεις και συνθήκες των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 1. Τα σήματα εισόδου αποτελούνται από παλμούς λευκού θορύβου με διαφορετική αναλογία παρουσίας ήχητικού σήματος και μηδενικού σήματος, όπως και από ανηχοϊκές πηγές σημάτων ομιλίας και μουσικής. Στα σήματα εφαρμόστηκε ένα

αμφιωτικό μοντέλο [6,10] από το οποίο υπολογίστηκαν οι τιμές για τις αμφιωτικές παραμέτρους ITD, ILD, IC σε 32 περιοχές συχνοτήτων για κάθε ένα χρονικό παράθυρο.



Σχήμα 2. Προσομοιώσεις και εξαγωγή αμφιωτικών παραμέτρων.

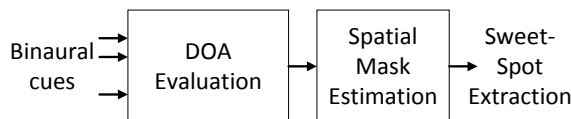
Πίνακας 1. Τα διάφορα σενάρια ακρόασης - δωματίων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.

	Συνθήκες ακουστικής	Είδος πηγής
T0	ανηχοϊκές	παντοκατευθυντική
T1	ανηχοϊκές	πρότυπο ηχείου δύο δρόμων
T2	T1 + ανάκλαση πάτωμα	πρότυπο ηχείου δύο δρόμων
T3	δωμάτιο κατά ITU (RT=0.25s)	πρότυπο ηχείου δύο δρόμων
T4	Στούντιο ομάδας Π.Π. (ITU)	πρότυπο ηχείου δύο δρόμων

3. Μέθοδοι αξιολόγησης

3.1 Περιοχή ιδανικής ακρόασης

Η περιοχή ιδανικής ακρόασης (sweet spot) αξιολογήθηκε από τις Γωνίες Άφιξης των (DOA) που υπολογίστηκαν με τη χρήση των αμφιωτικών παραμέτρων Σχ.3 [6]. Σε κάθε θέση ακρόασης υπολογίστηκε μία γωνία απόκλισης θ_{div} μεταξύ της εκτιμώμενης γωνίας και της ιδανικής γωνίας άφιξης. Η ιδανική θέση του ειδώλου θεωρείται η κεντρική θέση στην στερεοφωνική εικόνα. Αυτή η γωνία απόκλισης συγκρίνεται με μία κρίσιμη γωνία ($\theta_{crit} = 5^\circ$) πέραν της οποίας θεωρείται ότι η ορθή εκτίμηση και εντοπισμός του ειδώλου είναι μειωμένη [6,10]. Η περιοχή ιδανικής ακρόασης ορίζεται τελικά ως η περιοχή ακρόασης όπου η γωνία απόκλισης δεν ξεπερνά την κρίσιμη γωνία θ_{crit} .



Σχήμα 3. Μέθοδος αξιολόγησης του ιδανικού σημείου ακρόασης.

Για ένα πλέγμα διαστάσεων $N \times N$ σημείων υπολογίζεται η γωνία απόκλισης θ_{div} κάθε σημείου-θέσης ακρόασης. Η περιοχή ιδανικής ακρόασης αποτελείται από το σύνολο των σημείων που επαληθεύουν τη συνθήκη $\theta_{div} \leq \theta_{crit} = 5^\circ$. Ορίζεται επίσης η ακρίβεια της ιδανικής θέσης ακρόασης ως η εγγύτητα στην ιδανική γωνία άφιξης:

$$A(x, y) = \begin{cases} \frac{\theta_{crit} - |\theta_{div}|}{\theta_{crit}}, & \text{when } \theta_{div} \leq \theta_{crit} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

Δεδομένου ότι κάθε θέση ακρόασης αντιστοιχεί σε μια επιφάνεια του πλέγματος υπολογισμού (π.χ. b σε cm^2) ορίζεται η επιφάνεια της περιοχής ιδανικής ακρόασης σε cm^2 ως:

$$SSA = b \cdot \sum_x \sum_y A_{bin}(x, y),$$

$$\text{where } A_{bin}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{when } A(x, y) > 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (3)$$

Για τα σενάρια που βρίσκονται στον Πίνακα 1, η απόσταση μεταξύ των σημείων στο πλέγμα είναι 10cm, ο αριθμός των σημείων είναι $21 \times 21 = 441$ και καλύπτουν μία συνολική επιφάνεια ακρόασης ίση με 4.41m^2 . Για τα αποτελέσματα στο Σχ.5 η περιοχή ακρόασης ξεκινά 1m μπροστά από τα ηχεία.

3.2 Κατηγοριοποίηση εικονικού ειδώλου

Ο ταξινομητής του εικονικού ειδώλου αξιολογεί την ευρωστία ή την απόκλιση από την εκτίμηση της αντίληψης στη γωνία άφιξης σε σχέση με την πραγματική γωνία του ειδώλου στην στερεοφωνική εικόνα. Για τη συμμετρική στερεοφωνική διάταξη, οι γωνίες του εικονικού ειδώλου θ_{PH}^i υπολογίστηκαν από τον νόμο ημιτονοειδούς κωδικοποίησης για στερεοφωνικά σήματα (panning) [11]:

$$\frac{\sin(\theta_{PH}^i)}{\sin(30^\circ)} = \frac{\alpha_L - \alpha_R}{\alpha_L + \alpha_R}, \quad 1 < i < 7 \quad (4)$$

Δημιουργήθηκαν 7 διαφορετικές θέσεις ειδώλου με βήμα 5° ξεκινώντας από την κεντρική θέση 0° και φτάνοντας στην τελείως αριστερή θέση 30° . Οι αμφιωτικές παράμετροι που υπολογίστηκαν από τα σήματα $y_L(t)$ και $y_R(t)$ χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδο στον ταξινομητή ο οποίος έχει εκπαιδευτεί με μικρά κομμάτια από τα δεδομένα. Κατά το στάδιο της αξιολόγησης της απόδοσης του ταξινομητή, τα δεδομένα εισόδου έχουν επιλεγεί τυχαία μέσα από το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων και η πραγματική γωνία του ειδώλου δεν παρέχεται

σαν πληροφορία στον ταξινομητή. Ο ίδιος ο ταξινομητής υπολόγισε την πιθανή γωνία άφιξης. Η ακρίβεια του ταξινομητή $ACC_N(f)$ δίνει το ποσοστό ορθής αναγνώρισης των δειγμάτων του πειράματος σε σχέση με όλα τα δείγματα (αριθμός N) που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα:

$$ACC_N(f) = \frac{1}{|N|} \sum_{j=1}^{|N|} I(f(X_j) = \vartheta_{PH}^j) \quad (5)$$

όπου f είναι ο ταξινομητής και I η μεταβλητή ορθής αναγνώρισης, μία λογική συνάρτηση η οποία δίνει 1 όταν $f(X_j) = \vartheta_{PH}^j$ και 0 όταν $f(X_j) \neq \vartheta_{PH}^j$. Ο ταξινομητής που επιλέχθηκε ακολουθεί την διαδικασία ανάπτυξης Τυχαίου Δάσους [7]. Εκτός από την συνηθισμένη εποπτευόμενη διαδικασία όπου ο ταξινομητής εκπαιδεύεται με αμφιοτικές παραμέτρους που περιέχουν ετικέτες με την γωνία άφιξης, ένας εναλλακτικός ημι-εποπτευόμενος ταξινομητής χρησιμοποιήθηκε [7]. Η ημι-εποπτευόμενη μέθοδος (SSC) στοχεύει στην αναγνώριση της κλάσης ϑ_{PH}^i των μη-σημασμένων δεδομένων με χρήση μόνο λιγοστών σημασμένων δεδομένων για την εκπαίδευση του συστήματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν δύο περιπτώσεις ημι-εποπτευόμενων ταξινομητών:

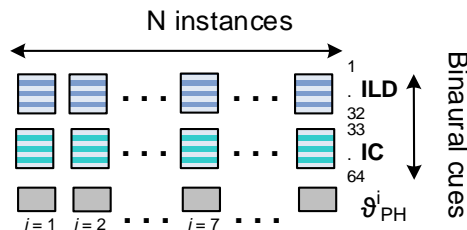
(α) Ο **αυτό-εκπαιδευόμενος** όπου μία επαναληπτική διαδικασία χρησιμοποιεί ανάμικτα σημασμένα και μη-σημασμένα δεδομένα όταν η αξιοπιστία του υπερβεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι.

(β) Ο **συν-εκπαιδευόμενος** όπου το διάνυμα με τα δεδομένα εισόδου (τις αμφιοτικές παραμέτρους) χωρίζεται σε διαφορετικά υποσύνολα (π.χ. στα ITD και στα ILD) έτσι ώστε οι συναρτήσεις εκπαίδευσης που εργάζονται σε κοινά υποσύνολα δεδομένων να έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν πιο ισχυρά και γενικής εφαρμογής μοντέλα.

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει συνολικά την δομή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης και της αξιολόγησης του ταξινομητή. Ο αριθμός των N δειγμάτων:

$$N = i \times f_s(\text{Hz}) \times \text{DutyCycle}(s) \times L \quad (6)$$

όπου i είναι ο αριθμός κλάσεων για τις διαφορετικές γωνίες, f_s η συχνότητα δειγματοληψίας (εδώ 44.100 Hz), DutyCycle είναι η διάρκεια του παλμού (1sec) και L είναι ο συντελεστής ποσόστωσης των σημασμένων δεδομένων. Για τον ημι-εποπτευόμενο ταξινομητή $L = 0.1$ και έτσι προκύπτει για δεδομένα διάρκειας 10s ότι το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι 100ms.

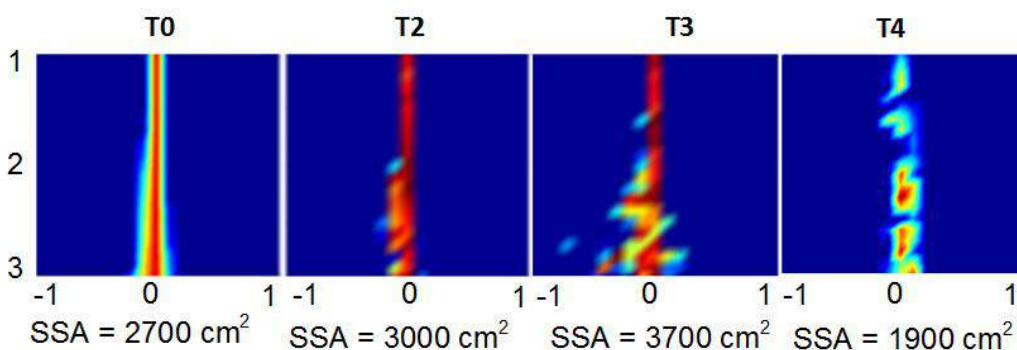


Σχήμα 4 Παράδειγμα της δομής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν

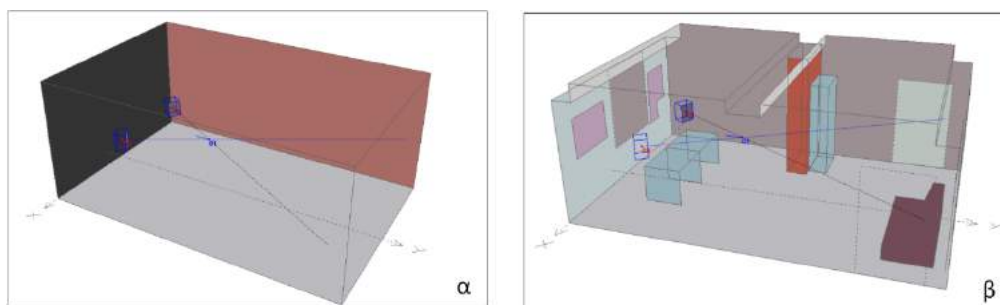
4. Αποτελέσματα

4.1 Περιοχή ιδανική ακρόασης

Στο Σχ.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για σήμα εισόδου παλμούς λευκού θορύβου. Το προτεινόμενο μέγεθος αξιολόγησης της περιοχής ιδανικής ακρόασης (SSA) παρουσιάζει μια στενή τέτοια περιοχή στην ιδανική ανηχοϊκή περίπτωση και διευρύνεται καθώς προστίθενται οι ανακλάσεις λόγω της ακουστικής του δωματίου. Στην περίπτωση T4, το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις λεπτομέρειες της πραγματικής αίθουσας ακρόασης της ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και ακουστικής του Παν/μίου Πατρών. Εδώ φαίνεται ότι η περιοχή ιδανικής ακρόασης παρουσιάζει έντονη ασυνέχεια πάνω στον άξονα και γενικά η επιφάνεια της είναι περιορισμένη και με αρκετά μειωμένη ευκρίνεια. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 6(β), σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο περιλαμβάνει την ασυμμετρία του χώρου που δημιουργεί ανακλάσεις οι οποίες μετατοπίζουν το είδωλο.



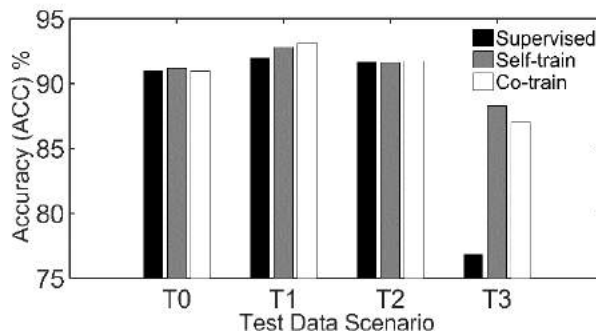
Σχήμα 5. Περιοχή ιδανικής ακρόασης για 4 διαφορετικά σενάρια.



Σχήμα 6. Ακουστικά μοντέλα για δωμάτιο ακρόασης συμβατό με ITU: (α) γενικού σκοπού μοντέλο, σενάριο T3, (β) λεπτομερές μοντέλο της αίθουσας ακρόασης της ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής στο Πανεπιστήμιο Πατρών.

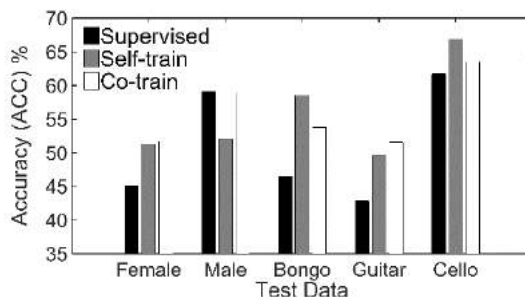
4.2 Εντοπισμός του εικονικού ειδώλου

Για τα αποτελέσματα στο Σχ.7 στην φάση της εκπαίδευσης του ταξινομητή έχουν χρησιμοποιηθεί παλμοί λευκού θορύβου στο ιδανικό σενάριο T0 και για την φάση της αξιολόγησης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τα σενάρια T0-T3. Μόνο 100ms από τα διαθέσιμα 10s σήματος χρησιμοποιήθηκαν για τις διαδικασίες εκπαίδευσης και αξιολόγησης του SSC.



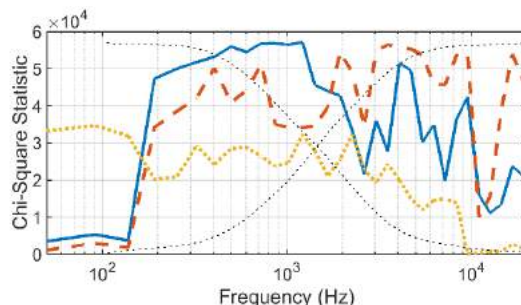
Σχήμα 7. ACC % για διαφορετικά σενάρια ακρόασης

Στο Πείραμα που εμφανίζεται στο Σχ.8 τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από διαφορετικά ηχητικά δείγματα ανηχοϊκών σημάτων ομιλίας και μουσικής. Τα δεδομένα εκπαίδευσης είναι παλμοί λευκού θορύβου στο ιδανικό ανηχοϊκό δωμάτιο. Τα δεδομένα αξιολόγησης δημιουργήθηκαν με τη χρήση του σεναρίου T3 (ITU δωμάτιο ακρόασης) και σήματα ομιλίας και μουσικής. Όπως φαίνεται για ορισμένα σήματα η απόδοση είναι αρκετά ψηλή.



Σχήμα 8. ACC % για διαφορετικά σήματα στο σενάριο T3.

Στο Σχ.9 παρουσιάζεται ο στατιστικός δείκτης Chi-squared για την διαδικασία εκπαίδευσης εντοπισμού της θέσης του εικονικού ειδώλου για τον ημι-εποπτευόμενο ταξινομητή (SSC). Ο στατιστικός δείκτης αυτός δείχνει την σημαντικότητα της κάθε κατηγορίας δεδομένων κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Παρατηρείται η συμπληρωματικότητα στην κατανομή των αποτελεσμάτων μεταξύ του ITD και IL, κάτι που προσεγγίζει και τη δυϊκή θεωρία (duplex theory) για τον αντιληπτικό μηχανισμό χωρικού εντοπισμού των πηγών. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για βελτιστοποίηση της εκπαίδευσης του ταξινομητή.



Σχήμα 9. Ο στατιστικός δείκτης Chi-squared, η συνησφορά του στις διαφορετικές περιοχές του φάσματος για την εκπαίδευση του SSC, – ITL - - ILD · IC και ···· Θεωρητική καμπύλη.

5. Συμπεράσματα

Αυτή η αρχική μελέτη υποδεικνύει τη δυνατότητα αξιοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού του στερεοφωνικού ειδώλου μόνο με τη χρήση αμφιωτικών παραμέτρων χωρίς χρήση κάποιου αντιληπτικού μοντέλου υψηλότερου επιπέδου. Το προτεινόμενο μοντέλο για την διασπορά της ιδανικής θέσης ακρόασης αναδεικνύει διαφοροποιήσεις που προκύπτουν από την κατευθυντικότητα των πηγών-ηχείων, αλλά και από την επίδραση των ακουστικών χαρακτηριστικών του χώρου. Για την ακρίβεια αναπαραγωγής των εικονικών πηγών, ο ημι-εποπτευόμενος ταξινομητής μπορεί να εντοπίσει με μεγάλη αξιοπιστία το εικονικό είδωλο και όπως αναμένεται η αξιοπιστία του ελαττώνεται με την παρουσία ανακλάσεων του χώρου. Η περιοχή ιδανικής ακρόασης διευρύνεται με την παρουσία ανακλάσεων.

Με την χρήση είτε του αυτό-εκπαιδευόμενου είτε του συν-εκπαιδευόμενου ημι-εποπτευόμενου ταξινομητή η απόδοση είναι παρόμοια και στις περισσότερες περιπτώσεις σε πολύ ψηλότερο επίπεδο από την εποπτευόμενη μέθοδο. Η διαδικασία εκπαίδευσης και αξιολόγησης απαιτούν πολύ μικρό ποσοστό των διαθέσιμων δεδομένων για να παράγουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα. Τέλος η αξιοπιστία του ταξινομητή παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα ακόμα και όταν τα σήματα εισόδου και οι συνθήκες ακουστικής του χώρου για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση είναι διαφορετικά. Μελλοντική μελέτη θα επεκταθεί στην αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου για σενάρια με μεγαλύτερη αντήχηση ή και για άλλες διατάξεις ηχείων.

6. Αναφορές

- Toole, F. E. Sound reproduction: Loudspeakers and rooms. Taylor & Francis, 2008.
- Parodi Y. L, Rubak P., “Objective Evaluation of the Sweet Spot Size in Spatial Sound Reproduction Using Elevated Loudspeakers, JASA 128(3), 2010.
- G. Kamaris, St. Karlos, N.Fazakis, St. Terpinas, John Mourjopoulos, “Binaural auditory feature classification for stereo image evaluation in listening rooms, AES 140th Convention, 2016.

- Theiss B., Hawksford M.J. "Binaural Model-Based Measurements of Phantom Images." AES 105th Convention, 1998.
- Harma A., Lokki T., Pulkki V. "Drawing quality maps of the sweet spot and its surroundings in multichannel reproduction and coding." AES 21st Conference., 2002.
- Wierstorf H., Spors S., "Predicting localization accuracy for stereophonic downmixes in Wave Field Synthesis," Forum Acusticum, pp. 1–6, 2014.
- Fazakis N., Karlos S, Kotsiantis S., Sgarbas K., "Self-Trained LMT for Semisupervised Learning," Computational Intelligence and Neuroscience, 2016.
- CATT-Acoustic v9.0c – www.catt.se
- Common Loudspeaker Format www.clfgroup.org
- Dietz M., Ewert S. D., Hohmann V., "Auditory model based direction estimation of concurrent speakers from binaural signals," Speech Commun., vol. 53, no. 5, pp. 592–605, 2011.
- Breebaart, J. and Faller, C. "Spatial Audio Processing: MPEG Surround and Other Applications", John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- Song, Yangqiu, Changshui Zhang, and Shiming Xiang. "Semi-supervised music genre classification" IEEE ICASSP, 2007.

Συνεδρία Α8: Έλεγχος θορύβων & δονήσεων

Προσομοίωση ενεργού ελέγχου χαμηλόσυχνου θορύβου σε μικρούς κλειστούς χώρους με σύνθετες πηγές προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας

Μάριος Γιουβανάκης¹
Υποψήφιος Διδάκτωρ,
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
mgiouvan@auth.gr

Χρήστος Σεβαστιάδης¹
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και
Μηχανικός Υπολογιστών
csevast@auth.gr

Γεώργιος Παπανικολάου¹
Καθηγητής
pap@eng.auth.gr

¹Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη πραγματοποιείται την προσπάθεια καταστολής χαμηλόσυχνου θορύβου σε κλειστό χώρο με χρήση μιας σύνθετης πηγής, της διαμήκουσ τετραπολικής. Με κατάλληλη τοποθέτηση, διαφορά φάσης και πλάτους έντασης μεταξύ των επιμέρους πηγών τους, η κατευθυντικότητα του ηχητικού πεδίου των σύνθετων πηγών είναι προσαρμοζόμενη. Πραγματοποιήθηκαν ακουστικές αναλύσεις με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Τα αποτελέσματα φανερώουν την αποτελεσματικότητα της σύνθετης πηγής στον ενεργό έλεγχο θορύβου στην περιοχή ενδιαφέροντος και την επίδραση της άλλα σημεία του χώρου.

Simulation of active low–frequency noise control in small enclosed spaces using adaptive directivity compound sound sources

ABSTRACT

Low-frequency noise control in small indoor space is studied in this paper, using a compound sound source, the longitudinal quadrupole. With the appropriate placement, difference in phase and amplitude among their simple sources, the directivity of compound sources sound field is adaptive. Acoustic analyses were made using the Finite Element method. The results show the effectiveness of a

compound source in active noise control in the area of interest and its effect on other points in space.

Εισαγωγή

Η εργασία μέσα σε θορυβώδες περιβάλλον προκαλεί κόπωση και μείωση των αντιληπτικών ικανοτήτων του ανθρώπου. Στην περίπτωση που ο θόρυβος είναι χαμηλής συχνότητας σε μικρούς κλειστούς χώρους, λόγω των διακριτών και έντονων συντονισμών, το ηχητικό πεδίο που διαμορφώνεται διέπεται από έντονη ανομοιομορφία στη συχνότητα και στο χώρο. Ο έλεγχος του θορύβου, αλλά και των δονήσεων που τον προκαλούν, αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα της ακουστικής. Η βασική διάκριση για τον τρόπο ελέγχου του θορύβου είναι μεταξύ παθητικού και ενεργού. Αμφότεροι οι τρόποι αποσκοπούν τόσο στον έλεγχο των δονήσεων όσο και του ηχητικού πεδίου.

Ο Ενεργός Έλεγχος Θορύβου (Active Noise Control/Cancellation, ANC), υλοποιεί την αρχή της καταστροφικής παρεμβολής για την αντιμετώπισή του, με την υπέρθεση στο πεδίο του θορύβου ενός ανάλογου πεδίου «αντι-θορύβου» με αντεστραμμένη φάση [1]. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του χαμηλόσυχνου ηχητικού πεδίου, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει αυξηθεί για τις τεχνικές που χρησιμοποιούν σύνθετες πηγές εκπομπής ήχου, με τις οποίες, καθώς οδηγούνται με περισσότερα του ενός σήματα, είναι δυνατός ο έλεγχος της κατευθυντικότητας τους και η προσαρμογή της στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε κλειστού χώρου.

Σε συνέχεια προηγούμενης ερευνητικής εργασίας, στην οποία μελετήθηκε η προσαρμογή της κατευθυντικότητας διατάξεων σύνθετων πηγών με μεταβολή των παραμέτρων οδήγησής τους [2], γίνεται στην παρούσα η μελέτη της διαμήκουσ τετραπολικής πηγής μέσα σε κλειστό χώρο. Η μελέτη επικεντρώθηκε στον έλεγχο χαμηλόσυχνου θορύβου σε συγκεκριμένη περιοχή του χώρου και για τις προσομοιώσεις εφαρμόστηκε η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.

1. Ακουστική Ανάλυση με τα Πεπερασμένα Στοιχεία (ΠΣ)

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜτΠΣ), αναπαριστά το ηχητικό πεδίο με τη δημιουργία αδόμητου πλέγματος κόμβων, στους οποίους επιλύεται η διαφορική κυματική εξίσωση και είναι κατάλληλη για την ανάλυση της κυματικής συμπεριφοράς των προβλημάτων ακουστικής στις χαμηλές συχνότητες. Για την αναπαράσταση ενός κλειστού χώρου σχηματίζεται ένα πλέγμα (mesh) διαιρώντας τον σε μεγάλο αριθμό μη επικαλυπτόμενων στοιχείων (elements), η τοπολογία των οποίων ορίζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Στη διατύπωση των ΠΣ, η ηχητική πίεση σε κάθε κόμβο αποτελεί τον βαθμό ελευθερίας του διακριτού προπλάσματος. Η ΜτΠΣ διευκολύνει τη χρήση ενός αδόμητου πλέγματος, στο οποίο τα στοιχεία μπορούν να διαφέρουν αυθαίρετα σε μέγεθος και θέση, κάτι που διευκολύνει την αυτόματη δημιουργία πλέγματος για πεδία αυθαίρετου σχήματος και προσδίδει μεγάλη πρακτική αξία στη μέθοδο [3]. Για τη διατύπωση της εξαναγκασμένης ακουστικής διέγερσης ενός χώρου προσθέτουμε στο δεξιό μέρος της κυματικής εξίσωσης του ήχου τον όρο της διέγερσης $Q[\text{kg/s}]$, ο οποίος δηλώνει

την πυκνότητα της πηγής εκφρασμένη σε ρυθμό παραγωγής μάζας, και όπου $f = \omega/2\pi$ (Hz) η συχνότητα διέγερσης [4].

$$\nabla^2 \hat{p} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \hat{p} = -\frac{i\omega\rho}{V} \hat{Q} \quad \text{N/m}^4 \quad (1.1)$$

2. Διπολικές και σύνθετες πηγές

Οι σύνθετες πηγές [5] προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας ή πηγές ταχύτητας (gradient loudspeakers) [6] αποτελούνται από συνδυασμό δύο ή περισσότερων σημειακών πηγών. Η κατευθυντικότητα της σύνθετης πηγής εξαρτάται από την τοπολογία των επιμέρους στοιχείων, το επίπεδο στάθμης ηχητικής πίεσης μεταξύ τους, καθώς και τη διαφοράς φάσης τους. Στην πραγματικότητα, η κατευθυντικότητα ενός συνδυασμού συμβατικών πηγών εξαρτάται από την κυματική παρεμβολή τους στον χώρο.

Η απλούστερη στοιχειώδης πηγή μπορεί να θεωρηθεί σημειακή (point), απλή (simple) ή μονοπολική (monopole). Στις χαμηλές συχνότητες θεωρούμε ότι ένα τυπικό ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο σε κλειστό ηχείο συμπεριφέρεται προσεγγιστικά ως μια σημειακή πηγή [7]. Οι διαστάσεις του ηχείου θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ήχου, δηλαδή να πληρείται η συνθήκη $ka \ll 1$ όπου k είναι ο κυματαριθμός του κύματος και a η χαρακτηριστική διάσταση της πηγής [8].

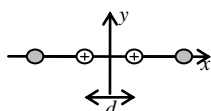
Οι σύνθετες πηγές συγκροτούνται συνδυάζοντας στοιχειώδεις πηγές. Μία διπλή πηγή (doublet) ή διπολική (dipole) συγκροτείται από δύο απλές που απέχουν μεταξύ τους μια πολύ μικρή απόσταση d και εκπέμπουν σε αντίθετη φάση. Οι συνθήκες εκπομπής για το μακρινό πεδίο είναι $d \ll \lambda$, $d \ll r$ και $r^2 \ll \lambda^2/36$, όπου λ είναι το μήκος κύματος και r η απόσταση παρατήρησης [8]. Θεωρώντας ως στοιχειώδη τη διπολική πηγή, είναι δυνατόν, με συνδυασμό τους σε διάφορες τοπολογίες, να συγκροτηθούν σύνθετες πηγές με ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά.

3. Προσομοίωση ενεργού ελέγχου θορύβου

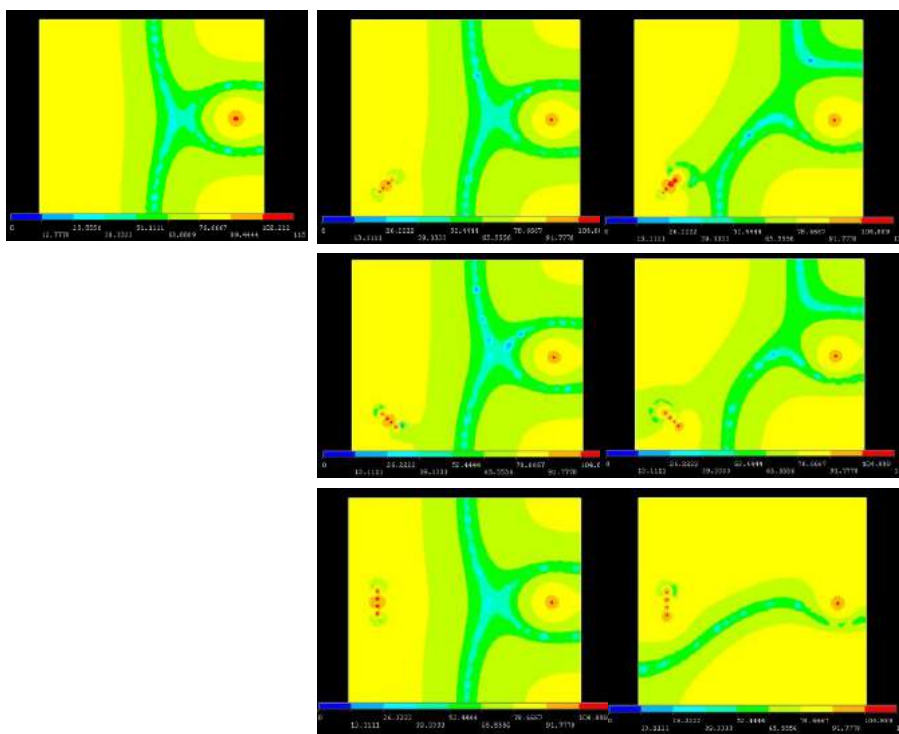
Η ξεχωριστή οδήγηση του κάθε δίπολου, αλλά και κάθε επιμέρους πόλου, δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της κατευθυντικότητας της σύνθετης πηγής. Με αυτήν την ευελιξία των σύνθετων πηγών, η κατανομή της εκπεμπόμενης ενέργειας τους δύναται να είναι παρόμοια με το ηχητικό πεδίο των πηγών θορύβου και, προσαρμόζοντάς το σε αυτό, να το ακυρώσουν.

Η πηγή θορύβου προσομοιώθηκε σε σταθερή κατάσταση, ως σημειακή πηγή και στενού εύρους ζώνης, στη συχνότητα των 50Hz. Δίνεται η αποτύπωσή της στον υπό μελέτη κλειστό χώρο, ένα τυπικό παραλληλεπίπεδο διαστάσεων $(x,y,z) = (4m, 3,5m, 2,8m)$, πλήρως ανακλαστικό. Ως «αντι-πηγή» θορύβου χρησιμοποιήθηκε η διαμήκης τετραπολική, που αποτελεί τον συνδυασμό δύο εν σειρά διπόλων (σχ. 2.1), η οποία παρουσίασε μια ευέλικτη προσαρμοζόμενη κατευθυντικότητα με τη μεταβολή των παραμέτρων της, καθώς ανήκει στις πηγές με στενό λοβό εκπομπής, που είναι κατάλληλες για ενεργό έλεγχο θορύβου. Η ύπαρξη ανακλαστικών επιφανειών, πέραν της αύξησης της ηχητικής στάθμης, οδηγεί και σε αλλοίωση της κατευθυντικότητας της σύνθετης πηγής σε σχέση με αυτή που έχει σε ελεύθερο

πεδίο [2]. Διάφορες θέσεις της αντι-πηγής στον χώρο εξετάζονται, με στόχο τη μείωση του επιπέδου ηχητικής στάθμης του θορύβου σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, που αποτελείται από 16 σημεία σε απόσταση 20cm στο κέντρο του χώρου. Για τις στάθμες ηχητικής πίεσης, έγινε αρμονική ανάλυση στην τριτοκτάβα των 50Hz με συχνοτικό βήμα 1Hz και δίνεται ο μέσος όρος των σημείων ενδιαφέροντος.



Σχήμα 2.1 Διαμήκης τετραπολική – Αντι-πηγή θορύβου



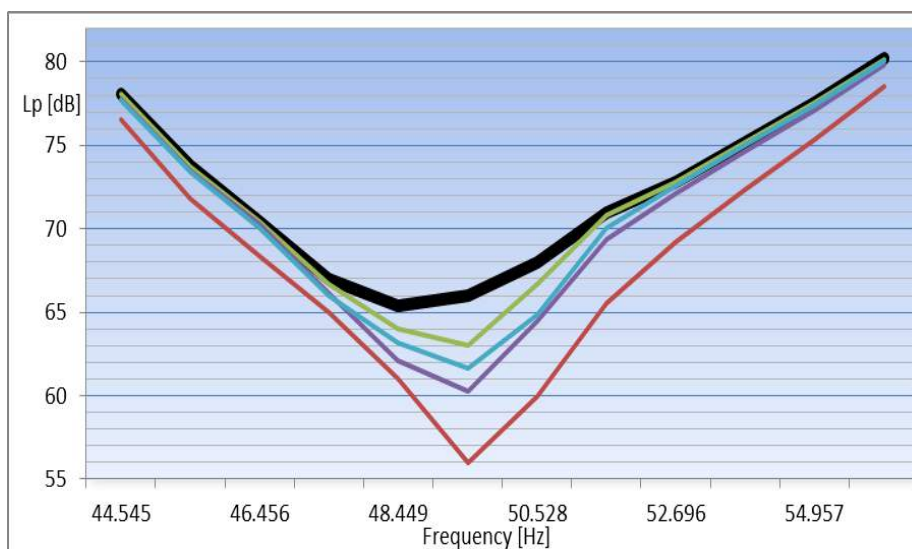
Σχήμα 3.1 Αποτελέσματα μεθόδου ΠΣ με αποτύπωση στάθμης (SPL, dB) στα 50Hz, για έλεγχο θορύβου σε κλειστό χώρο. (1^η στήλη): Πηγή θορύβου. Αντι-πηγή: (1^η σειρά) γωνία, πριν (2^η στήλη) και μετά (3^η στήλη) την αύξηση 10dB στο πλάτος, (2^η σειρά): γωνία (πλάγια), πριν (2^η στήλη) και μετά (3^η στήλη) την προσθήκη φάσης 180°, (3^η σειρά): παράλληλα, πριν (2^η στήλη) και μετά (3^η στήλη) την προσθήκη φάσης 180°, στη μία διπολική αντίστοιχα.

Το ενδιαφέρον της μελέτης επικεντρώθηκε στη μεταβολή των παραμέτρων διέγερσης της μίας διπολικής πηγής που συγκροτεί την αντι-πηγή, σε σχέση με την άλλη, ώστε να διερευνηθεί η μεταβολή της κατευθυντικότητάς της και να

συμβάλλει καταστροφικά στον θόρυβο, στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επιλεγμένα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 κατά τη μεταβολή των παραμέτρων διέγερσης της αντι-πηγής στον χώρο, παρουσία θορύβου. Οι πηγές τοποθετούνται σε απόσταση 0,5m από κάθε τοίχο. Η απόσταση d των διπόλων που εφαρμόστηκε σε όλες τις περιπτώσεις είναι 0,125m, ενώ όλες οι αποτυπώσεις αφορούν στη συχνότητα των 50Hz, υπολογισμένες σε ύψος 0,5μ.

Όταν η αντι-πηγή τοποθετείται στη γωνία του χώρου, με έναν από τους δύο τρόπους, μεταβάλλοντας σταδιακά είτε την διαφορά φάσης είτε το πλάτος έντασης του ενός διπόλου έναντι του άλλου, το παραγόμενο ηχητικό πεδίο μεταβάλλεται με τρόπο επιθυμητό. Συγκεκριμένα, παρατηρείται να μετατοπίζεται η περιοχή χαμηλής ηχητικής στάθμης, για τη συχνότητα θορύβου, και να πλησιάζει στην περιοχή ενδιαφέροντος. Παρουσιάζονται αντίστοιχα οι αρχικές και τελικές καταστάσεις, όπου στη μία εφαρμόζεται αύξηση πλάτους 10dB και στην άλλη, 180° επιπλέον φάση στο ένα δίπολο. Στην τρίτη περίπτωση, όπου το ηχητικό πεδίο αλλάζει σημαντικά, η αντι-πηγή βρίσκεται παράλληλα στην απέναντι πλευρά του θορύβου και προστίθεται φάση 180° στο ένα της δίπολο.

Η συχνότητα Schroeder του χώρου (~400Hz) είναι μεγαλύτερη από τη συχνοτική περιοχή του χαμηλόσυχνου θορύβου, με αποτέλεσμα να κυριαρχεί το ρυθμικό πεδίο του και παρουσιάζει το δεύτερο ρυθμό συντονισμού του περί τα 49Hz. Το ηχητικό πεδίο της πηγής επηρεάζεται από τους ρυθμούς του χώρου ανάλογα με την τοποθέτησή της. Επομένως, σε κάποιες από τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν στην αρμονική ανάλυση, οι πηγές διέγειραν το συγκεκριμένο ρυθμό.



Διάγραμμα 3.1 Στάθμη (SPL, dB) μέσω της μεθόδου ΠΣ με αρμονική ανάλυση στην τριτοκτάβα των 50Hz - Μείωση θορύβου στην περιοχή ενδιαφέροντος. (μαύρο): θόρυβος. Αντι-πηγή: (κόκκινο) κάθετα με την προσθήκη φάσης 180°, (πράσινο) γωνία (πλάγια) με την προσθήκη φάσης 180°, (μωβ) γωνία με αύξηση 6dB στο πλάτος, (γαλάζιο) γωνία (πλάγια) με αύξηση 6dB στο πλάτος, στη μία διπολική αντίστοιχα.

Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα του ενεργού ελέγχου θορύβου με την αντι-πηγή τοποθετημένη σε διάφορες θέσεις. Καταρχήν, παρατηρείται η δυνατότητα μείωσης του θορύβου στην περιοχή ενδιαφέροντος, γύρω από τα 50Hz. Ανάλογα με τη θέση της πηγής και το βήμα της μεταβολής των παραμέτρων, για τις δεδομένες συνθήκες του χώρου, μπορεί να επιτευχθεί πολύ σημαντική μείωση της στάθμης θορύβου. Συγκεκριμένα, με την αντι-πηγή στη γωνία σε πλάγια θέση, μπορεί να επιτευχθεί μείωση 3dB με επιπλέον φάση 180°, και μείωση 4,5dB με αύξηση 6dB στο πλάτος, στο ένα δίπολο αντίστοιχα. Με τοποθέτηση στη γωνία και αύξηση 6dB στο πλάτος ενός διπόλου, η αντι-πηγή μπορεί να μειώσει και άλλο τη στάθμη, κατά περίπου 6dB. Τέλος, την πιο δραστική μείωση δείχνει να επιτυγχάνει η αντι-πηγή σε κάθετη θέση ως προς την απέναντι πλευρά του θορύβου, όπου με προσθήκη φάσης 180° σε ένα της δίπολο, μπορεί να μειώσει τον θόρυβο έως και 10dB.

4. Συμπεράσματα

Δοκιμάστηκε η διαμήκης τετραπολική πηγή ως αντι-πηγή για την εφαρμογή ενεργού ελέγχου θορύβου, με μεταβολή των παραμέτρων διέγερσης. Μελετώντας τις μεταβολές του ηχητικού πεδίου της αντι-πηγής πάνω σε αυτό του υπάρχοντος θορύβου, διαπιστώνουμε ότι είναι δυνατή η επίτευξη μείωσης στάθμης ενός ανεπιθύμητου ήχου σε μια περιοχή, μεταβάλλοντας την κατευθυντικότητα μιας σύνθετης πηγής με απλή παρέμβαση στο σήμα οδήγησης μιας διπολικής που τη συγκροτεί, δίχως να απαιτείται η στρέψη των ίδιων των πηγών. Για διαφορετική συχνοτική περιοχή θορύβου και διαφορετικό χώρο, απαιτείται κάθε φορά μια προσαρμοστική παρέμβαση, μέσω ενός συστήματος ελέγχου. Η μελέτη μείωσης του θορύβου έγινε με παρατήρηση σε μια μικρή περιοχή 16 σημείων, ως προσπάθεια μιας γενικότερης εφαρμογής του ενεργού ελέγχου, όπως σε έναν βιομηχανικό χώρο. Περιοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή, αποτελεί ο αριθμός και το μέγεθος των χαμηλόσυχνων αντι-πηγών που μπορούν να διατεθούν σε έναν μικρό κλειστό χώρο.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν τις δυνατότητες της τεχνικής που χρησιμοποιεί τις συγκεκριμένες πηγές, ενώ υποδεικνύουν μία κατεύθυνση ως προς το είδος των σύνθετων ηχητικών πηγών. Ο συνδυασμός της ΜτΠΣ με τεχνικές βελτιστοποίησης με σκοπό την εξάλειψη θορύβων στενού ή μεγάλου εύρους σε συγκεκριμένες ή ευρύτερες περιοχές του χώρου, είναι το επόμενο βήμα. Η συζήτηση για το συγκεκριμένο βήμα είναι ανοιχτή.

5. Αναφορές

- [1] P. Lueg «Process of Silencing Sound Oscillations» USP 2043416, June 9 (1936)
- [2] Χ.Σεβαστιάδης, Μ.Γιουβανάκης, Γ.Παπανικολάου «Προσομοίωση χαμηλόσυχνου ηχητικού πεδίου σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους, παραγόμενου από σύνθετες πηγές προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας, με εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων» Συνέδριο Ακουστική '14, 5-7 (2014)
- [3] Χ.Σεβαστιάδης Ανάλυση και βελτίωση της ακουστικής κλειστών χώρων κάτω από τη συχνότητα Schroeder με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων Διδακτορική Εργασία Α.Π.Θ., 41-55 (2011)
- [4] L.L.Beranek, Istvan L.Ver Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, 2nd edition, 145- 150 (1996)

- [5] W.Chen, H.Pu, X.Qiu «A compound secondary source for active noise radiation control» Appl. Acoust. 71, 101–106 (2010)
- [6] H.F.Olson «Gradient Loudspeakers» J. Audio Eng. Soc. 21, pp 86-93 (1973)
- [7] Γ.Παπανικολάου Ηλεκτρακουστική University Studio Press, σελ.162-165 (2005)
- [8] L.L.Beranek Acoustics, ASA, New York, pp 91- 101 (1996)

**Ενεργός έλεγχος χαμηλόσυχνου θορύβου σε κλειστούς
χώρους και προσομοίωση με τη μέθοδο
πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου**

Δημήτρης Όρλης
Φοιτητής¹
dorlis@ece.auth.gr

Μάριος
Γιουβανάκης
Υποψήφιος
Διδάκτορας¹
mgiouvan@auth.gr

Χρήστος
Σεβαστιάδης, PhD
ΕΔΙΠ¹
csevast@ece.auth.
gr

Γεώργιος
Παπανικολάου,
PhD
Καθηγητής¹
pap@eng.auth.gr

¹Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται η προσομοίωση ενεργού ελέγχου θορύβου σε ένα μικρό, κλειστό εργασιακό χώρο και η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου. Η πηγή θορύβου στο χώρο θεωρείται ένας κινητήρας, που προσεγγίζεται από ένα συνημίτονο αντίστοιχης συχνότητας. Το σήμα της πηγής ελέγχου που δημιουργεί το αντί-πεδίο στο σημείο ενδιαφέροντος είναι η έξοδος ενός εμπροσθοτροφοδοτικού σχηματισμού, ο οποίος προσαρμόζεται μέσω ενός FxLMS αλγορίθμου. Τα σήματα εισάγονται στο μοντελοποιημένο τρισδιάστατο χώρο και εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος ενεργού ελέγχου. Τα αποτελέσματα φανερώνουν την ποιότητα του ενεργού ελέγχου στο σημείο ενδιαφέροντος και την επίδραση της πηγής ελέγχου σε άλλα σημεία του χώρου.

Active control of low frequency noise in small room and simulation using the finite difference time domain method

ABSTRACT

This paper presents the simulation of Active Noise Control (ANC) in a small enclosed workplace and modeling using the Finite Difference Time Domain (FDTD) method. The noise source in the room is considered to be a rotating motor that is approximated by a sinusoid signal of a corresponding frequency. The control source is fed with the output of an adaptive feedforward control configuration based on the FxLMS algorithm. Both noise and control signals are applied in the 3D model and the performance of the ANC system is assessed. The numerical results demonstrate the quality of the active control in the location of interest and the effect of ANC on other points in the room.

Εισαγωγή

Στον ενεργό έλεγχο θορύβου (ANC) χρησιμοποιείται η αρχή της καταστροφικής παρεμβολής δημιουργώντας ένα πεδίο ίσο και αντίθετο με αυτό του θορύβου στα σημεία ενδιαφέροντος. Η επιτυχημένη εφαρμογή ενεργού ελέγχου δεν είναι πάντα εφικτή, έτσι, κρίνεται σημαντικό να προηγηθεί αναλυτική μελέτη του συστήματος για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητά του πριν αυτό υλοποιηθεί.

Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε μία από τις καθιερωμένες μεθόδους προσομοίωσης προβλημάτων ακουστικής χώρων, αυτή των Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου. Η μέθοδος παρουσιάστηκε αρχικά για προβλήματα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου το 1966 από τον Yee [1], αλλά η έρευνα σε εφαρμογές ακουστικής έχει αναπτύσσεται σταθερά τα τελευταία χρόνια [2][3]. Επιλέχθηκε ένας προσαρμοστικός εμπροσθοτροφοδοτικός σχηματισμός ενεργού ελέγχου για την υλοποίηση του οποίου απαιτούνται ως είσοδοι σήματα από δύο εικονικά μικρόφωνα [12]. Η προσαρμογή του φίλτρου ελέγχου γίνεται με χρήση του FxLMS αλγορίθμου.

Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται η μέθοδος FDTD για προσομοίωση προβλημάτων ακουστικής, στη δεύτερη το προσαρμοστικό εμπροσθοτροφοδοτικό σύστημα ενεργού ελέγχου θορύβου με τον αλγόριθμο FxLMS και στην τρίτη ενότητα η περιγραφή του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε με λεπτομέρειες της προσομοίωσης. Τέλος, τα αποτελέσματα μαζί με τα συμπεράσματα από το συνδυασμό των μεθόδων παρουσιάζονται στην τέταρτη ενότητα.

1. FDTD σε προβλήματα ακουστικής

Στη μέθοδο FDTD για ακουστικά κύματα η προσέγγιση είναι όμοια με αυτή για ηλεκτρομαγνητικά, με τα κύρια μεγέθη να είναι η ακουστική πίεση, p , και η σωματιδιακή ταχύτητα, v . Υπάρχουν δύο διατυπώσεις της μεθόδου, η διανυσματική, που βασίζεται στην ακουστική πίεση και στη σωματιδιακή ταχύτητα και αντιστοιχεί στην αρχική μορφή του αλγορίθμου του Yee όπως αυτός παρουσιάστηκε για ηλεκτρομαγνητικά κύματα, και η βαθμωτή, που χρησιμοποιεί μόνο την ακουστική πίεση. Η τελευταία είναι υπολογιστικά πιο αποδοτική, ενώ παραμένει ισοδύναμη με τη διανυσματική ως προς τα αποτελέσματα που αποφέρει [4].

Η αριθμητική λύση της εξίσωσης διάδοσης προϋποθέτει τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου. Στις περισσότερες εφαρμογές η χωρική διακριτοποίηση είναι ομοιόμορφη σε όλες τις διαστάσεις, με πλέγμα που αποτελείται από κύβους (ή τετράγωνα, στη δισδιάστατη περίπτωση) ακμής Δx . Ο βασικός περιορισμός για τις διαστάσεις του κελιού προέρχεται από το ελάχιστο μήκος κύματος για το οποίο επιθυμείται ακριβής προσομοίωση. Ένας ικανοποιητικός συμβιβασμός ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους επιτυγχάνεται για κελί ακμής $\lambda_{min}/10$ [5].

Το χρονικό βήμα περιορίζεται άμεσα από το χωρικό, με σκοπό η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο υπολογιστικό πλέγμα να συμβαδίζει με αυτή στο φυσικό μέσο. Αναλυτικές σχέσεις για την αριθμητική διασπορά της ταχύτητας διάδοσης έχουν δοθεί και έχει προταθεί ένα ανώτατο όριο για το Δt , το οποίο εκφράζεται ως προς τον αριθμό Courant (αριθμητικό παράγοντα σταθερότητας, S) [6].

$$S = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (1.1)$$

Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του S , που αποδεικνύεται πως είναι και η βέλτιστη, εξαρτάται από την τοπολογία της μεθόδου που χρησιμοποιείται, δηλαδή από το πόσα και ποια γειτονικά σημεία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ακουστικής πίεσης σε έναν κόμβο του πλέγματος.

Για τον υπολογισμό της μελλοντικής τιμής της ακουστικής πίεσης ενός κόμβου χρησιμοποιούνται οι αμέσως προηγούμενες τιμές των γειτονικών κόμβων και οι δύο παρελθοντικές τιμές του ίδιου κόμβου. Η πιο απλή τοπολογία χρησιμοποιεί τα έξι γειτονικά σημεία στους τρεις άξονες (Standard Leap-Frog), ενώ η πιο αποδοτική από άποψη ακρίβειας χρησιμοποιεί και τα είκοσι έξι (Interpolated Wideband) [7].

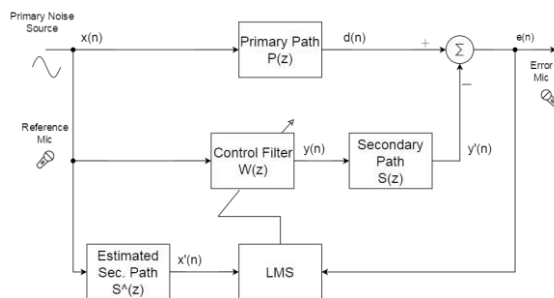
Η αντανάκλαση του ηχητικού κύματος στο όριο προσεγγίζεται με το μοντέλο της τοπικά αντιδρώσας επιφάνειας (Locally Reacting Surface), στο οποίο η σωματιδιακή ταχύτητα μπροστά από τον τοίχο εξαρτάται μόνο από την ακουστική πίεση στο ίδιο σημείο και όχι από την πίεση των γειτονικών κόμβων [8]. Η ιδιότητα αυτή μεταφέρεται και στη βαθμωτή διατύπωση. Πολύ συχνά η συμπεριφορά του ορίου εξαρτάται από τη συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος. Η εξάρτηση εκφράζεται στην αντίδρασή του, η οποία εισάγεται στην εξίσωση ανανέωσης οριακών κόμβων με διάφορες τεχνικές. Η εξίσωση αυτή είναι μια παραλλαγή αυτής των εσωτερικών σημείων, η οποία δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα οριακά σημεία. Οι κόμβοι που βρίσκονται εκτός πλέγματος (ghost nodes) εκτιμούνται με βάση την αντίδραση του ορίου και παραμέτρους της εκάστοτε μεθόδου.

Το τελευταίο σημαντικό ζήτημα της μεθόδου FDTD είναι η υλοποίηση της πηγής στον υπολογιστικό χώρο ώστε η φυσική διέγερση να προσομοιώνεται με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Τρία διαφορετικά είδη διέγερσης έχουν παρουσιαστεί και μπορούν να εφαρμοστούν τόσο με τη διανυσματική, όσο και με τη βαθμωτή διατύπωση [9]. Στην απλούστερη περίπτωση μία τιμή διέγερσης ανατίθεται σε έναν κόμβο, για τον οποίο δε χρησιμοποιείται η εξίσωση ανανέωσης (hard source). Τα σφάλματα που επιφέρει η εξαίρεση αυτή αντισταθμίζονται στη διέγερση με μαλακή πηγή (soft source), στην οποία η τιμή της διέγερσης στο σημείο της πηγής προστίθεται στο αποτέλεσμα της εξίσωσης ανανέωσης. Η πρόσθεση αυτή συνήθως έχει ως αποτέλεσμα την αναντιστοιχία της επιθυμητής διέγερσης με αυτή που τελικά εισάγεται στο πλέγμα, πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στη διέγερση με διαφανή πηγή (transparent source), στην οποία αφαιρείται επιπλέον μια εκτίμηση του σφάλματος της μαλακής πηγής, χρησιμοποιώντας την κρουστική απόκρουση στον κόμβο.

2. Εμπροσθοτροφοδοτικός προσαρμοστικός ενεργός έλεγχος με χρήση FxLMS αλγορίθμου

Ο εμπροσθοτροφοδοτικός έλεγχος απαιτεί τη χρήση μιας επιπλέον εισόδου, πέρα από το εναπομείναν σφάλμα, που στις εφαρμογές ενεργού ελέγχου θορύβου προέρχεται από το μικρόφωνο αναφοράς. Αποδεικνύεται πως η συνάφεια του σήματος αναφοράς με το σήμα που εκπέμπεται από την πηγή περιορίζει το τελικό σφάλμα, δηλαδή τη συνολική επίδραση του συστήματος [10]. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, οι συντελεστές του φίλτρου ελέγχου, $w(n)$, υπολογίζονται από τον LMS

αλγόριθμο και η έξοδος από το φίλτρο αυτό, $y(n)$, αποτελεί το σήμα της πηγής ελέγχου. Για να αντισταθμιστεί η επιρροή της διάδοσης μέχρι το σημείο ενδιαφέροντος το σήμα αναφοράς, $x(n)$, φιλτράρεται με μια προσέγγιση της κρουστικής απόκρισης του μονοπατιού αυτού.



Σχήμα 2.7 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος ANC με χρήση του FxLMS αλγορίθμου

Οι δύο σημαντικότεροι σχεδιαστικοί παράγοντες του συστήματος είναι το βήμα προσαρμογής, μ , και το μήκος του φίλτρου, L . Αρχικά επιλέγεται η τιμή του L , που πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προσομοιώνεται επαρκώς η απόκριση του φυσικού συστήματος, και έπειτα μία τιμή για το μ ώστε το σύστημα να είναι ευσταθές. Η ανώτατη επιτρεπτή τιμή για το βήμα προσαρμογής μπορεί να εκφραστεί σε κλειστή μορφή συναρτήσει του L , ιδιοτήτων του σήματος αναφοράς και της κρουστικής απόκρισης της δευτερεύουσας διαδρομής [11]. Οι συντελεστές του φίλτρου ελέγχου υπολογίζονται από την εξίσωση (2.1).

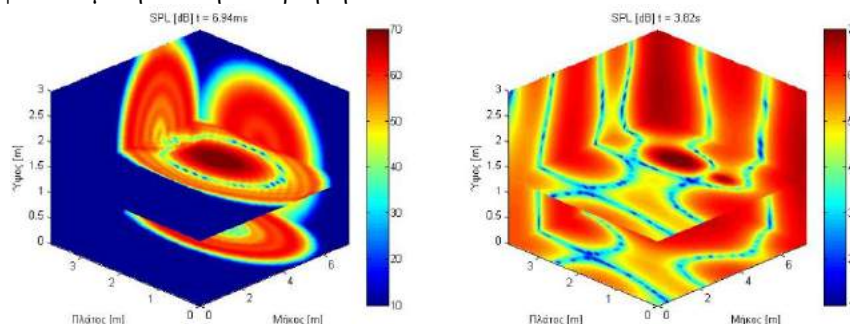
$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n) x'(n) \tag{2.1}$$

3. Προσομοίωση εφαρμογής ενεργού ελέγχου

Ο χώρος που προσομοιώθηκε έχει συνολικό όγκο περίπου 83m^3 , με μήκος $7,3\text{m}$, πλάτος $3,8\text{m}$ και ύψος 3m . Η ανακλαστική συμπεριφορά όλων των συνοριακών επιφανειών θεωρήθηκε όμοια και σταθερή στο εύρος της προσομοίωσης, το οποίο επιλέχθηκε μεταξύ 20 και 300 Hz , και η διακριτοποίηση έγινε με κύβους ακμής $\lambda/10$, που αντιστοιχεί σε περίπου 12cm για τα 300 Hz . Επιλέχθηκε η τοπολογία Interpolated Wideband, στην οποία ο αριθμός Courant ισούται με 1 . Έτσι, με βάση την εξίσωση (1.1), το υπολογιστικό βήμα αντιστοιχεί σε περίπου $0,35\text{ms}$ και τα 20.000 βήματα της προσομοίωσης αντιστοιχούν σε περίπου 7s πραγματικού χρόνου. Η πηγή θορύβου, η πηγή ελέγχου και το μικρόφωνο σφάλματος στο σημείο ενδιαφέροντος θεωρήθηκαν αντίστοιχα στις συντεταγμένες $(5,4\ 2,4\ 1,2)$, $(5,4\ 1,2\ 1,2)$ και $(1,2\ 2,4\ 1,2)$ μέτρα. Ως σήμα της πηγής θορύβου χρησιμοποιήθηκε ένα συνημίτονο συχνότητας 100Hz παρουσία λευκού θορύβου 20 dB χαμηλότερης στάθμης και η διάδοσή του στον τρισδιάστατο χώρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Ο ενεργός έλεγχος επικεντρώθηκε στη συχνότητα των 100 Hz .

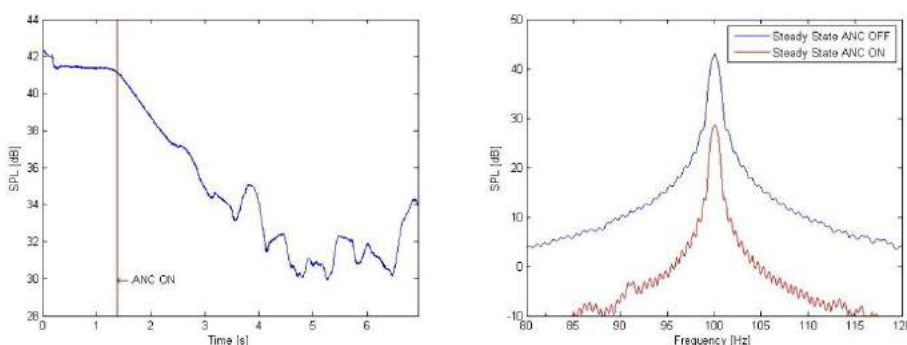
Το μήκος του φίλτρου και το βήμα προσαρμογής του συστήματος ελέγχου για τη συγκεκριμένη διάταξη επιλέχθηκαν αντίστοιχα ίσα με 600 και $0,05$. Η κρουστική

απόκριση από την πηγή ελέγχου στο μικρόφωνο σφάλματος υπολογίστηκε εκ των προτέρων χρησιμοποιώντας μόνο μία πηγή στη θέση της πηγής ελέγχου τροφοδοτούμενη από τη συνάρτηση Dirac.



Σχήμα 3.1 Στιγμιότυπα τρισδιάστατης προσομοίωσης στα α) 6,94 ms και β) 3,82s

Ο ενεργός έλεγχος ξεκίνησε να λειτουργεί περίπου 1,3s μετά την αρχή της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται αριστερά η στάθμη της ακουστικής πίεσης σε dB, με την κόκκινη κατακόρυφη γραμμή να σημειώνει το σημείο έναρξης λειτουργίας του ANC, και δεξιά οι στάθμες στο σημείο ενδιαφέροντος, σε ένα μικρό εύρος γύρω από τα 100 Hz πριν και μετά τον έλεγχο.



Σχήμα 3.2 Ακουστική πίεση στο σημείο ενδιαφέροντος στο πεδίο α) του χρόνου και β) της συχνότητας

4. Συμπεράσματα

Η πτώση της στάθμης θορύβου στο σημείο ενδιαφέροντος κατά περίπου 13 dB στα 100 Hz περίπου 3 s μετά την αρχή λειτουργίας του συστήματος ενεργού ελέγχου επιβεβαιώνει την επιτυχία της διάταξης που αναφέρθηκε. Η προσομοίωση ολόκληρου του χώρου προσφέρει τη δυνατότητα να παρατηρηθεί η συνολική επίδραση και έτσι να εκτιμηθεί η αύξηση που μπορεί να προκαλείται σε διαφορετικά σημεία. Για την αξιολόγηση κάποιας διαφορετικής διάταξης μπορεί να επαναληφθεί η παραπάνω διαδικασία χωρίς πολλές διαφοροποιήσεις ή να χρησιμοποιηθεί ένας γενετικός αλγόριθμος.

Για τη φυσική υλοποίηση του συστήματος στο χώρο που προσομοιώθηκε είναι σημαντικό να προσεχτούν ορισμένες λεπτομέρειες. Τόσο η πηγή θορύβου όσο και η πηγή ελέγχου έχουν διαστάσεις που μπορεί να διαφέρουν από τον όγκο ενός κύβου πλέγματος που τους ανατέθηκε και γενικά προκαλούν ανακλάσεις ή διαθλάσεις που απαιτούν ειδικό χειρισμό σε μία ακριβή προσομοίωση. Επιπλέον, η ανακλαστική συμπεριφορά των οριακών επιφανειών είναι στις περισσότερες περιπτώσεις εξαρτώμενη από τη συχνότητα και ποικίλλει σε τοίχους, δάπεδο και οροφή, οπότε η απλουστευμένη προσέγγισή τους στην προσομοίωση επιφέρει διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη φυσική διάδοση. Τέλος, σε κάθε υλοποίηση ενεργού ελέγχου είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή του εξοπλισμού, με το κύριο χαρακτηριστικό που δύναται να επηρεάσει το αποτέλεσμα να είναι η καθυστέρηση που εισάγει σε κάθε σημείο.

Σε μελλοντική έρευνα προτείνεται, πέρα από τη βελτιστοποίηση των παραπάνω λεπτομερειών, η θεώρηση περισσότερων από μία πηγών ελέγχου, ώστε η δράση του συστήματος να διευρυνθεί σε μια περιοχή στο χώρο αντί μόνο σε ένα σημείο. Συνίσταται επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων με δεδομένα από πειραματικές μετρήσεις σε χώρους παρουσία χαμηλόσυχνου θορύβου βιομηχανικής φύσης.

5. Βιβλιογραφία

- [1] K.S. Yee «Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **14**(3), pp 302 (1966)
- [2] D. Botteldooren «Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems» *The Journal of the Acoustical Society of America*, **98**, pp 3302-3308 (1995)
- [3] L. Savioja «Real-time 3D finite-difference time-domain simulation of low- and mid-frequency room acoustics» in *Proc. of the 13th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-10)*, (2010)
- [4] F. Aslan, R. Paurobally «Modelling and simulation of active noise control in a small room», *Journal of Vibration and Control*, **May 2016**, (2016)
- [5] K.S. Kunz, R.J. Luebbers *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics* CRC Press, New York (1993)
- [6] A. Taflove, S.C. Hagness *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method* Artech House, London (2005)
- [7] K. Kowalczyk «Boundary and medium modeling using compact finite difference schemes in simulations of room acoustics for audio and architectural design applications» *Sonic Arts Research Centre, School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science, Queen's University Belfast* (2008)
- [8] H. Kuttruff *Room Acoustics* Spon Press, New York (2009)
- [9] D.T. Murphy, A. Southern, L. Savioja «Source excitation strategies for obtaining impulse responses in finite difference time domain room acoustics simulation» *Applied Acoustics* **82**, pp 6-14 (2014)
- [10] S.K. Kuo, D.R. Morgan «Active noise control: a tutorial review» *Proceedings of the IEEE*, **87**(6), pp 943-973 (1999)

- [11] I.T. Ardekani, W.H. Abdulla «FxLMS-based active noise control: a quick review» in *Proc. of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association (APSIPA)*, (2011)
- [12] N. Nakrami, N. Patel «Feed-forward and feedback active noise control system using FxLMS algorithm for narrowband and broadband noise» in *Proc. of International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, pp 577-580 (2012)

« Αξιολόγηση - αντιμετώπιση κραδασμών μηχανολογικής εγκατάστασης σε κτίριο γραφείων »

Θεόδωρος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός
Σύμβουλος Ακουστικής
στην ΑΛΦΑ
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΠΕ.
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
teo@vibro.gr

Νικόλαος Αργουδέλης
Διπλ. Μηχανολόγος
Μηχανικός
M.Sc. Sound and
Vibration Studies
University of
Southampton
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
tech@alphacoustic.com

Αντώνιος Αργουδέλης
B. Eng Industrial
Engineering
M. Sc. Environmental and
Architectural Acoustics
M. Sc. Project
Management
Αποστολοπούλου 73,
Χαλάνδρι
antonios@alphacoustic.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή αφορά την εκτίμηση, καθώς και την αντιμετώπιση των κραδασμών από τη λειτουργία της μηχανολογικής εγκατάστασης (κυρίως των ψυκτών κλιματισμού) σε κτίριο γραφείων. Την αρχική μέτρηση κραδασμών για την αξιολόγηση και διερεύνηση του προβλήματος, ακολούθησε η πρόταση βελτιωτικών δράσεων για αντικραδασμική προστασία, η αποτελεσματικότητα της οποίας διαπιστώθηκε με μία σειρά μετρήσεων κραδασμών μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπέδων κραδασμού που επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης των εργαζομένων σε κτίρια γραφείων και η αξιολόγηση των επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν.

“Evaluation of the mechanical equipment’s vibration isolation in an office building”

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the vibration level affecting employees comfort and ability to work in an office building, as well as the methods to reduce the vibrations transmission. The study is based on the assessment and control of the vibration problem located at an office building in Athens Greece. The vibrations from the mechanical equipment (HVAC chillers) were measured and evaluated, then specific vibration isolation interventions took place and their

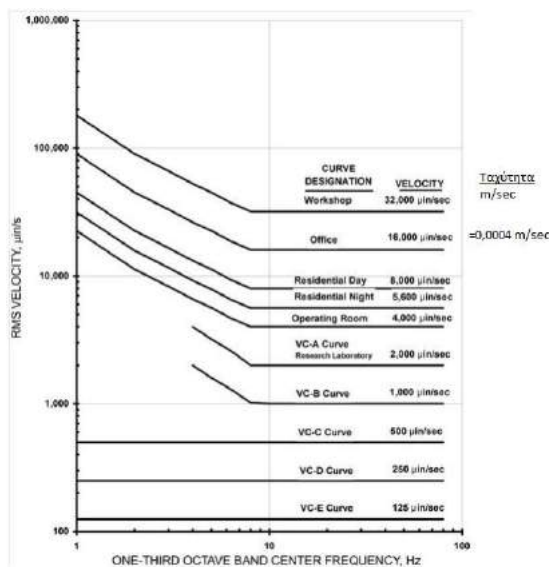
efficiency was documented through a post-implementation 2nd stage of vibration measurements.

Εισαγωγή

Η εργασία αυτή αφορά την εκτίμηση, καθώς και την αντιμετώπιση των κραδασμών από τη λειτουργία της μηχανολογικής εγκατάστασης σε κτίριο γραφείων στην Αθήνα. Στα συγκεκριμένα γραφεία υπήρχε σημαντικό πρόβλημα μεταφερόμενων κραδασμών εξαιτίας της λειτουργίας των δύο ψυκτών κλιματισμού (με 2 παλινδρομικούς συμπιεστές), που ήταν τοποθετημένοι στο δώμα. Την αρχική μέτρηση κραδασμών για την αξιολόγηση και διερεύνηση του προβλήματος, ακολούθησε η πρόταση βελτιωτικών δράσεων για αντικραδασμική προστασία, η αποτελεσματικότητα της οποίας διαπιστώθηκε με μία σειρά μετρήσεων κραδασμών μετά την ολοκλήρωση των εργασιών. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπέδων κραδασμού που επηρεάζουν τις συνθήκες άνεσης των εργαζομένων σε κτίρια γραφείων και η αξιολόγηση των επεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και λόγω της μέχρι τώρα έλλειψης θέσπισης 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.

1. Βασικές πληροφορίες από τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα



Εικόνα 1.8. Διάγραμμα ορίων ταχύτητας κραδασμού ανάλογα με χρήση του κτιρίου[1]

Στο εγχειρίδιο της ASHRAE, τα κριτήρια για τους κραδασμούς διαμορφώνονται ανάλογα με την ανθρώπινη απόκριση στον κραδασμό, τα επίπεδα του κραδασμού στο κτίριο και την ένταση του κραδασμού του μηχανήματος. Στο κεφάλαιο 48, «NOISE AND VIBRATION CONTROL», προτείνεται η χρήση συγκεκριμένων ορίων (τιμών ταχύτητας μετρούμενων σε ζώνες τριτοοκταβικών συχνοτήτων) ανάλογα με τη χρήση του κάθε κτιρίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8. Τα όρια αυτά βασίζονται σε οδηγίες που αναφέρονται στα πρότυπα ANSI S2.71-1983 και ISO Standard 2631-2.

Επίσης, στο πρότυπο BS6472:1 -1992, όπως αυτό αναφέρεται και στα [2] και [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].

2. Μεθοδολογία μέτρησης κραδασμών

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

Το μετρητικό όργανο κατέγραψε τους κραδασμούς ταυτόχρονα και στους τρεις άξονες, X, Y (οριζόντιοι άξονες) και Z (κατακόρυφος άξονας). Για την απλοποίηση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται οι καταγραφές μόνο της μετρηθείσας ταχύτητας κραδασμών (m/s).

Πίνακας 4.1 Ο εξοπλισμός για τις μετρήσεις δονήσεων

Όργανο μέτρησης	SVAN 958 Four Channel Analyser
Αισθητήρες μέτρησης	SV 207A_SO Building Vibration Measurement Set (3233A, SC242). Triaxial accelerometer 100 mV/g sensitivity
	SV 80 Accelerometer 100mV/g, with SA 27/10-32 Mounting Magnet
Λογισμικό επεξεργασίας σημάτων δονήσεων	SvanPC++ ver. 1.4.6

Οι μετρήσεις έγιναν σε διάφορα γραφεία και χώρους στον 5^ο όροφο του κτιρίου. Η επιλογή των αντίστοιχων θέσεων μέτρησης καθορίστηκε με βασικότερο κριτήριο την θέση τους, όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον κάθε ένα από τους δύο ψύκτες, καθώς εκεί το πρόβλημα ήταν εντονότερο.

3. Μέτρα αντικραδασμικής προστασίας

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των κραδασμών από τη λειτουργία του ψύκτη κλιματισμού, εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα μέτρα αντικραδασμικής προστασίας.

Όσον αναφορά τον ψύκτη κλιματισμού, τοποθετήθηκαν, κάτω από αυτόν, ειδικές αντικραδασμικές βάσεις ελατηρίου, τύπου Vibro-SMR complex, με πολύπλευρη συγκράτηση & με δυνατότητα ρύθμισης του ύψους τους. Τα εφέδρανα αυτά προσφέρουν αντιμετώπιση κραδασμών χαμηλών συχνοτήτων (ταχύτητα περιστροφής ~400 στρ./λεπτό), παρουσιάζουν ιδιοσυχνότητα 3Hz στο μέγιστο φορτίο, προσφέροντας ταυτόχρονη οριζόντια και κατακόρυφη συγκράτηση και παράλληλη προστασία από σεισμούς ή ισχυρές ανεμοπιέσεις.

Παράλληλα, για την έδραση των σωληνώσεων του ψύκτη χρησιμοποιήθηκαν αντικραδασμικές, μεταλλοελαστικές βάσεις Vibro-EP metal & strip. Οι βάσεις αυτές απαρτίζονται από ελαστικό εφέδρανο και από μεταλλικό γαλβανισμένο κάλυμμα. Το κάλυμμα αυτό εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου και παράλληλα προστατεύει το ελαστικό από την ηλιακή ακτινοβολία.

4. Αποτελέσματα μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κραδασμών σε συγκριτικά διαγράμματα με και χωρίς τη λειτουργία της πηγής κραδασμικής διέγερσης (ψύκτης στο δώμα του κτιρίου), πριν και μετά την τοποθέτηση της αντικραδασμικής προστασίας, για κάθε έναν από τους τρεις άξονες X, Y & Z.

Σημείωση:

“ON - ΠΡΙΝ” Προσδιορίζει τη μέτρηση με τη λειτουργία του ψύκτη **πριν** την εφαρμογή της αντικραδασμικής προστασίας

“ON -ΜΕΤΑ” Προσδιορίζει τη μέτρηση με τη λειτουργία του ψύκτη **μετά** την εφαρμογή της αντικραδασμικής προστασίας

“OFF” Προσδιορίζει τη μέτρηση **χωρίς** τη λειτουργία του ψύκτη

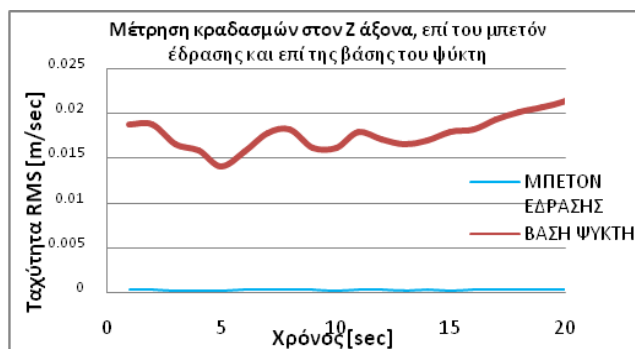
4.1 Θέση μέτρησης: Στο δώμα μετά την εφαρμογή των αντικραδασμικών επεμβάσεων



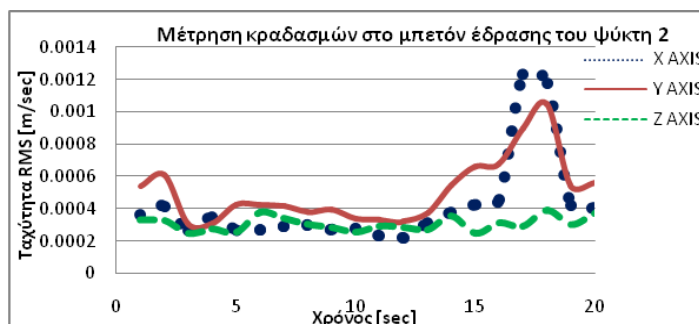
Εικόνα 4.1.1. Μέτρηση των κραδασμών μετά την τοποθέτηση των αντικραδασμικών πελμάτων. με το τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο επί του μπετόν έδρασης και με επιταχυνσιόμετρο επί της βάσης του ψύκτη.

Στη θέση αυτή πραγματοποιήθηκε μία συγκριτική μέτρηση κραδασμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.8, όπου μετρήθηκαν οι κραδασμοί επί του μπετόν έδρασης και της βάσης του μηχανήματος.

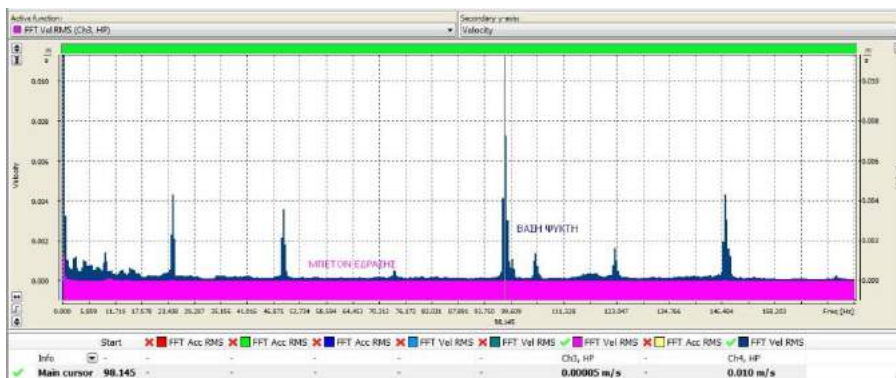
Η χρονική καταγραφή των κραδασμών (ως προς την ταχύτητα στον άξονα Z) και η ανάλυση Fourier αυτών παρουσιάζονται στο Γράφημα 4.1.1 (α) - (δ). Εκεί παρουσιάζεται η μείωση των κραδασμών από τα αντικραδασμικά εφέδρανα [Γράφημα 4.1.1 (α)], αλλά και η ύπαρξη εντονότερων κραδασμών του μηχανήματος σε συχνότητες που αντιστοιχούν στις ονομαστικές στροφές του συμπιεστή και πιθανότατα στις αρμονικές αυτών. Για λόγους πληρότητας, παρουσιάζεται και η χρονική καταγραφή των κραδασμών στο μπετόν έδρασης για τους 3 άξονες (X,Y,Z).



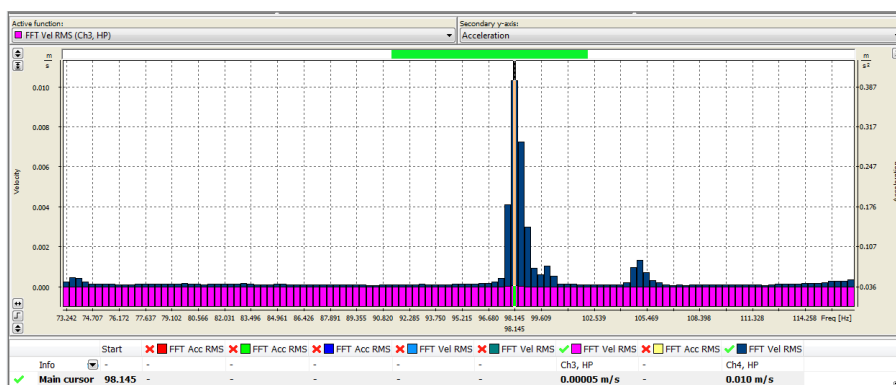
Γράφημα 4.1.1 (α)



Γράφημα 4.1.1 (β)



Γράφημα 4.1.1 (γ)



Γράφημα 4.1.1 (δ)

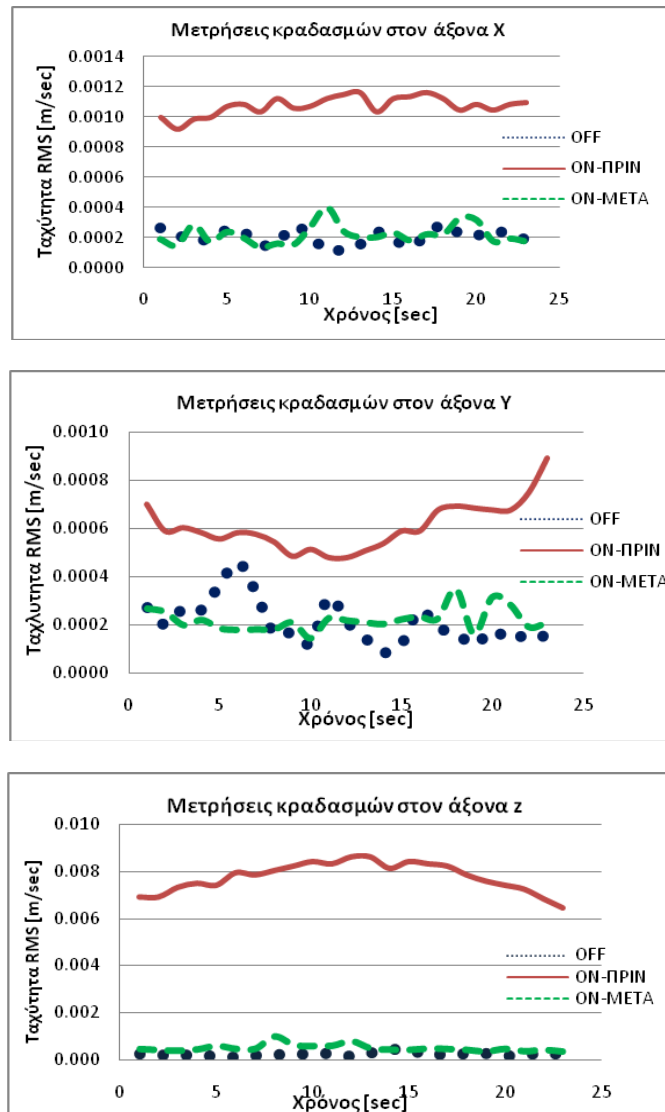
Γράφημα 4.1.1 : Χρονική καταγραφή μέτρησης κραδασμών στον ψύκτη (α) μόνο στον άξονα Z, (β) στους 3 άξονες X, Y, Z (γ) Φασματική ανάλυση κραδασμών (ταχύτητα στον άξονα z), (δ) Στιγμιότυπο από τη φασματική ανάλυση κραδασμών του οργάνου γύρω από τη συχνότητα 98Hz (μέγιστη τιμή επί της βάσης του ψύκτη 0.01m/sec και επί του μπετόν έδρασης 0.00005 m/sec).

5. Θέση μέτρησης: Στο γραφείο 509

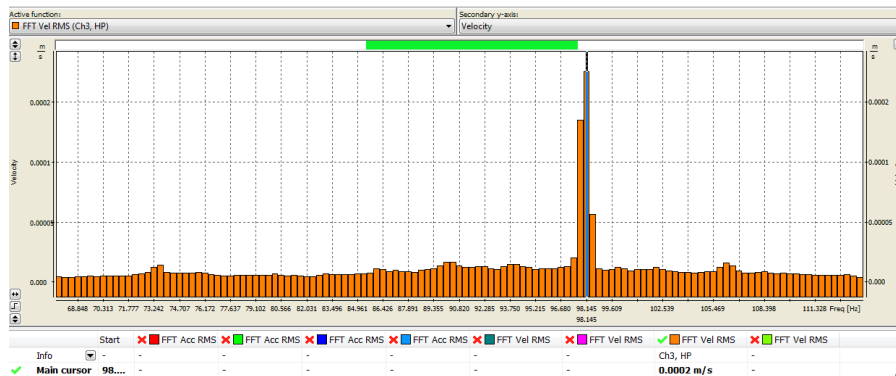
Το συγκεκριμένο γραφείο βρίσκεται κάτω από τον ψύκτη και τα αποτελέσματα των μετρήσεων κραδασμών δίδονται στο Γράφημα 4.3, ως προς την χρονική καταγραφή ταχύτητας στους άξονες x, y, και z, καθώς και τη φασματική ανάλυση των κραδασμών στον άξονα z. Αυτό που διαπιστώνεται από τα παρακάτω διαγράμματα, είναι ότι η εγκατάσταση των αντικραδασμικών πελμάτων συνέβαλλε στη δραστική μείωση του μεταφερόμενου κραδασμού από τον ψύκτη σε λειτουργία στα επίπεδα των μετρούμενων κραδασμών χωρίς τη λειτουργία του αυτού.

Επιπλέον, από το Γράφημα 4.31(β) παρουσιάζεται ότι η ύπαρξη μίας κύριας συνιστώσας ταχύτητας κραδασμού στη συχνότητα των 98Hz περίπου εξακολουθεί να υφίσταται. Αυτό βρίσκεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα από το Γράφημα 4.1.1 , καθώς είναι η κύρια συχνότητα στην οποία ο ψύκτης προκαλεί εντονότερο κραδασμό. Ωστόσο, η μετρούμενη τιμή της εντός του γραφείου 509,

είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν που είχε μετρηθεί πριν την εφαρμογή της αντικραδασμικής προστασίας.

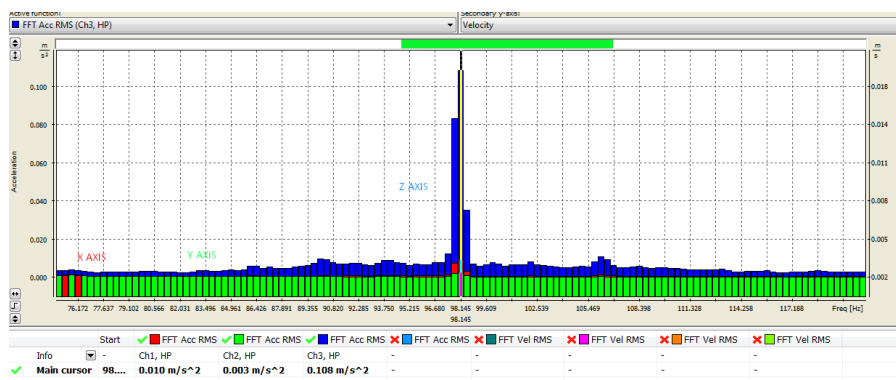


Γράφημα 4.1.1 (α)



Γράφημα 4.2.1 (β)

Γράφημα 4.3.1. Μετρήσεις κραδασμών στο γραφείο 509. (α) Χρονική καταγραφή της ταχύτητας στους άξονες X, Y και Z. (β) Ανάλυση Fourier της ταχύτητας στον άξονα Z (μέγιστη τιμή 0.0002m/sec στα 98Hz)



Γράφημα 4.2.2. Μετρήσεις κραδασμών στο γραφείο 509. Ανάλυση Fourier της επιτάχυνσης στους άξονες X, Y Z (μέγιστη τιμή για τον άξονα Z 0.108m/sec² στα 98Hz)

6. Συμπεράσματα

Η εγκατάσταση των αντικραδασμικών πελμάτων συνέβαλλε στη **δραστική μείωση του μεταφερόμενου κραδασμού από τον ψύκτη** σε λειτουργία στα επίπεδα των μετρούμενων κραδασμών χωρίς τη λειτουργία αυτού.

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

7. Αναφορές

- [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)

Σχεδιασμός και κατασκευή ηχομονωτικού κλωβού βιομηχανικής μηχανής παραγωγής με πολλαπλά υποσυστήματα

Γεώργιος Χαραλαμπίδης
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Γενικός Διευθυντής Group Science
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι 15124
charal@groupscience.gr
+306937353538

Σπυρίδων Μουζακίτης
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός
Τεχνικός Διευθυντής Group Science
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι 15124
smouzak@groupscience.gr
+306972363632

Γεώργιος Μπαμπάνης
Μηχανολόγος Μηχανικός
Δ. Γούναρη 48, Μαρούσι 15124
gbabanis@yahoo.gr
+306972440828

Keywords: Εργασιακός θόρυβος, έλεγχος θορύβου, βιομηχανική ηχομόνωση, ηχομονωτικός κλωβός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη μεθοδολογία ηχομόνωσης που ακολουθήθηκε σε μια εφαρμογή βιομηχανικής γραμμής παραγωγής μέσω κλωβού, καθώς και τα αποτελέσματα των ηχομετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά την κατασκευή του κλωβού. Στόχος του έργου ήταν η μείωση της ηχοέκθεσης των χειριστών της μηχανής σε επίπεδα κάτω των επιτρεπόμενων ορίων από τη Ελληνική νομοθεσία. Η εξεταζόμενη μηχανή παραγωγής αποτελείται από πλήθος θορυβωδών υποσυστημάτων, το καθένα εκ των οποίων συνεισφέρει διαφορετικά στην ηχοέκθεση των χειριστών της μηχανής λόγω της διάταξής του και των χρόνων λειτουργίας/παύσης.

Design and construction of a sound insulating enclosure in a manufacturing machine with multiple subsystems

ABSTRACT

The present paper outlines the methodology of sound-insulating in an industrial manufacturing line using an enclosure, as well as the results of the noise measurements that were conducted before and after the insulation application. The scope of the described project had been to reduce the sound exposure of the machine operators in levels below the limits of the Greek legislation. The examined machine consisted of multiple noisy subsystems, each contributing differently to the

operators' sound exposure because of their location and their operation time intervals.

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εστιάζεται σε τεχνικές μέτρησης και αντιμετώπισης του εργασιακού θορύβου και τον περιορισμό της ηχοέκθεσης των εργαζομένων σε εργοστάσια. Συγκεκριμένα η μελέτη αφορά την μέτρηση του θορύβου μηχανών συναρμολόγησης και των επιμέρους υποσυστημάτων τους με σκοπό την απαιτούμενη μείωση του θορύβου σχεδιάζοντας και κατασκευάζοντας εργονομικά ειδικούς κλωβούς που θα περικλείουν τέτοιες μηχανές ή/και τα υποσυστήματά τους. Ως εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση μιας μηχανής μικρού μεγέθους, με σχεδόν σταθερές θέσεις εργασίας, που περιλάμβανε περιφερειακά υποσυστήματα τροφοδοσίας.

Η αντιμετώπιση του εργοστασιακού θορύβου σε εγκαταστάσεις όπου οι πηγές θορύβου είναι πολλές και δύσκολα απομονώνονται ακουστικά ξεχωριστά, καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή μιας ειδικής μεθοδολογίας για να δοθεί μία αξιόπιστη και οικονομικότερη λύση ηχομόνωσης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει ηχομετρήσεις που δίνουν σαφή εικόνα για το επίπεδο του θορύβου ανά πηγή με αποτέλεσμα η κατασκευή των κλωβών να είναι ηχομονωτικά επαρκής και να κοστίζει το ελάχιστο δυνατό. 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.

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) σχετικά, 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 $L_{p,A,eq,T,m}$. 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 ηχώμετρα, ενώ οι υπόλοιπες απαιτούν δύο ηχοδοσίμετρα. Οι τρόποι αντιμετώπισης του θορύβου στον εργοστασιακό χώρο ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις ηχομείωσης και εργονομίας.

Πολύ συχνά τα προβλήματα θορύβου σε εργοστασιακούς χώρους εμφανίζονται σε κρούσεις και τριβές μεταλλικών πλακών, δονητικά συστήματα, τυρβώδη ροή ρευστών (κυρίως αέρα), μη ισορροπημένα περιστροφικά μέρη μηχανών, πτώση τεμαχίων σε γυμνές μεταλλικές πλάκες, ελεύθερες ταλαντούμενες πλάκες και άλλα.

Στη βιβλιογραφία ανάλογες εφαρμογές αυτών των προβλημάτων έχουν αντιμετωπιστεί σύμφωνα με τις παρακάτω γενικές τεχνολογίες [2]:

- Εντοπισμός της πηγής θορύβου ως μηχανισμός και αντικατάσταση αυτού με λιγότερο θορυβώδη μέρη εξοπλισμού
- Χρήση ηχοπετασμάτων τοπικά της πηγής
- Χρήση κλωβών για τα θορυβώδη μέρη μιας μηχανής ή την πλήρη ηχομόνωση της μηχανής
- Χρήση σιγαστήρων ανάλογα την επιθυμητή συχνότητα απόσβεσης
- Χρήση ηχοπαγίδων σε αγωγούς εξαερισμών
- Μείωση της αντήχησης τοπικά της πηγής με ηχοαπορροφητικά πάνελ (αποφεύγεται η χρήση ηχομονωτικών πάνελ στον ευρύ χώρο του εργοστασίου διότι η μείωση θα είναι αρκετά μικρή [$\sim 3-4$ dB] ενώ το κόστος εφαρμογής θα είναι πολύ μεγάλο)
- Active noise control (ενεργός έλεγχος θορύβου)

Αναφορικά με τους ηχομονωτικούς κλωβούς δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό αυτών με κύριο κριτήριο τα ανοίγματα από τα οποία μεταδίδεται ο θόρυβος από την πηγή στον δέκτη και η ιεραρχία των πηγών θορύβου. Ενδέχεται σε ορισμένες περιπτώσεις ο στερεόφερτος μεταδιδόμενος θόρυβος μεταξύ των μηχανικών μερών μιας μηχανής να είναι ισχυρότερος από τον αερομεταφερόμενο, οπότε πρέπει να υλοποιούνται ανάλογες μετρήσεις. Ως γενικές αρχές για τους κλωβούς συνήθως λαμβάνεται μέριμνα ώστε τα τοιχώματά τους να αποτελούνται από υλικά διαφορετικών συντελεστών απορρόφησης, ενώ οι διάδρομοι εξαερισμού και ανεμιστήρες να μονώνονται με κατάλληλες ηχοπαγίδες. Μεταξύ κλωβού και μηχανής δεν επιθυμείται να υπάρχουν σημεία σύνδεσης τα οποία να μεταφέρουν δονήσεις και να συντονίζεται ο κλωβός – αν υπάρχουν, τοποθετούνται ελαστικοί σύνδεσμοι οι οποίοι δημιουργούν «ασυνέχεια» μεταφοράς δονήσεων. Σε περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων όπου ο κλωβός συντονίζεται προτείνεται να τοποθετηθεί σε αντικραδασμικές βάσεις και παράλληλα να πληρωθεί το κενό μεταξύ αυτού και του εδάφους με πλωτό δάπεδο [2].

2. Περιγραφή μηχανής εφαρμογής και υποσυστημάτων αυτής

Για την εύληπτη παρουσίαση της μεθοδολογίας της εργασίας, χρησιμοποιείται μια απλή περίπτωση εφαρμογής που αφορά παραγωγική γραμμή η οποία αποτελείται από μία κύρια μηχανή συναρμολόγησης και τέσσερα επιμέρους τμήματα (υποσυστήματα) τα οποία τροφοδοτούν τα επί μέρους τμήματα του προϊόντος (αρκετά μικρά σε μέγεθος και βάρος) μέσω μηχανισμών αέρα και δόνησης στην κύρια μηχανή ώστε να συναρμολογηθεί το τελικό προϊόν. Σημαντικές πηγές θορύβου εκτός της κύριας μηχανής αποτελούν και τα υποσυστήματά της. Ο θόρυβος από τις δονητικές πλατφόρμες και ο θόρυβος της τυρβώδους ροής του αέρα των συστημάτων για την μεταφορά των τεμαχίων διατηρούν την συνολική ένταση του θορύβου σε μεγάλα επίπεδα.

Η λύση ηχομόνωσης γίνεται βάσει της απαιτούμενης ηχομείωσης και βάσει των εργονομικών απαιτήσεων πρόσβασης για το χειρισμό και τη συντήρηση της μηχανής. Με βάση αυτά, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, καταλληλότερη λύση αποτελεί ο σχεδιασμός κατάλληλου κλωβού.

3. Μετρήσεις διερεύνησης

3.1 Περιγραφή μετρήσεων διερεύνησης

Οι μετρήσεις διερεύνησης αποτελούν βασικό στάδιο αντιμετώπισης του προβλήματος ηχομόνωσης καθώς χαρτογραφούν τον εκπεμπόμενο θόρυβο όλων των πηγών ενδιαφέροντος. Τις πηγές θορύβου αποτελούν η κύρια μηχανή και τα υποσυστήματά της όπως και ο περιβαλλοντικός θόρυβος βάθους του εργοστασίου. Το πρόβλημα το οποίο καθιστά αναγκαία την διαδικασία αυτών των μετρήσεων είναι ότι στους χώρους του εργοστασίου δεν μπορεί να υφίσταται απόλυτη σιγή, ούτε συνθήκες απολύτως ελεύθερου πεδίου (free-field), που θα επέτρεπαν την ακριβή καταγραφή-μέτρηση των πηγών θορύβου. Επιπλέον, δεν είναι πάντα εφικτό να απομονώνονται απολύτως τα υποσυστήματα για να μετράται κάθε ένα σε ανεξάρτητη λειτουργία για το σκοπό των ηχομετρήσεων, το οποίο είναι και το επιθυμητό κατά την παρούσα μελέτη. Συνεπώς κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης μετράται αναπόφευκτα μία συνολική τιμή θορύβου, συνισταμένη πολλών επιμέρους πηγών. Στις μετρήσεις θορύβου ως *θόρυβος βάθους* (*Background Noise*) θεωρείται αυτός που προέρχεται από όλες τις 'άλλες πηγές' που μπορεί να επηρεάζουν ακουστικά τα σημεία μέτρησης εκτός από τις εγκαταστάσεις των οποίων η λειτουργία διερευνάται και καταγράφεται.

Κατά την καταγραφή, επιδιώκεται η κατά το δυνατόν ανεξάρτητη λειτουργία κάποιων υποσυστημάτων, αλλά και συνδυασμένα, με στόχο την ιεράρχηση των πηγών θορύβου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η κύρια μηχανή ήταν αδύνατο να λειτουργήσει σε ανεξαρτησία από κάποια υποσυστήματά της, έτσι ο μοναδικός τρόπος να μετρηθεί ο θόρυβός της είναι να μετρηθεί ο συνολικός όγκος θορύβου του ενδιαφερόμενου πεδίου και στη συνέχεια να αφαιρεθεί ανά όγκο η εκπομπή του εκάστοτε υποσυστήματος ώστε να βρεθεί υπολογιστικά η εκπομπή του «όγκου» της κύριας μηχανής.

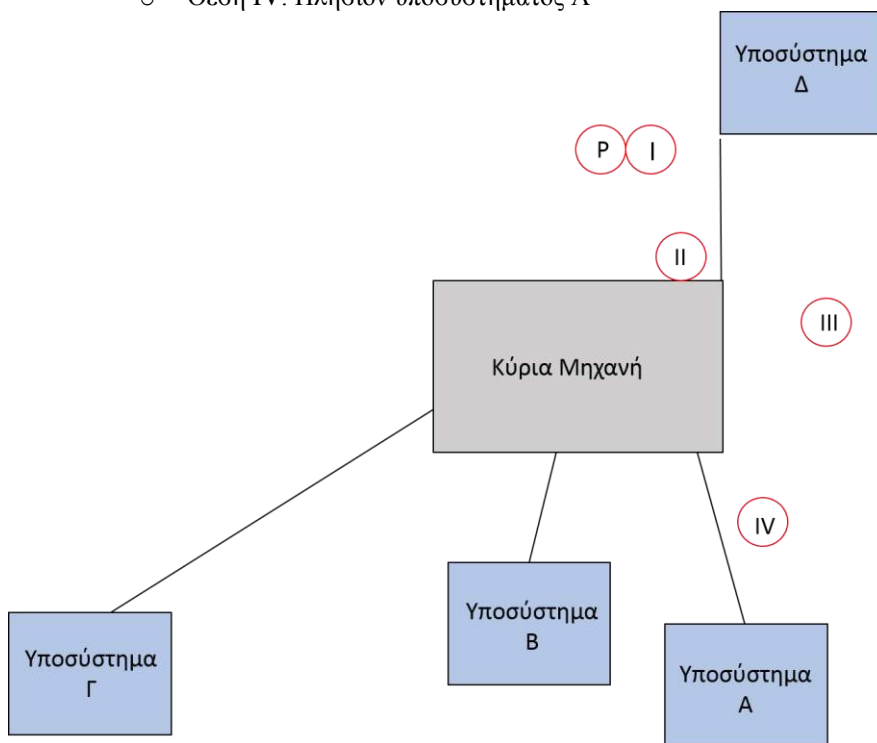
Έτσι μετρήθηκε το σύνολο των υποσυστημάτων σε μία **θέση εργασίας αναφοράς** αλλά και περιμετρικά της μηχανής (ανεξαρτήτως της ύπαρξης εργαζόμενου) για την πλήρη αποτύπωση των φαινομένων και τη λεπτομερή χαρτογράφηση του εκπεμπόμενου θορύβου σε όλα τα σημεία του χώρου. Ως θέση αναφοράς των μετρήσεων τέθηκε η βασική θέση των χειριστών της μηχανής (πρακτικά σταθερή).

Οι μετρήσεις ήταν διάρκειας 30-100 δευτερολέπτων, ανάλογα με το καταγραφόμενο φαινόμενο, καθώς τις περισσότερες περιπτώσεις, και κυρίως τις πιο επιβαρημένες εξ αυτών, ο μετρούμενος θόρυβος ήταν συνεχής ή επαναλαμβανόμενο/περιοδικός. Η δε μηχανή δεν μπορούσε να λειτουργήσει εκ των πραγμάτων για πολύ χρόνο με τα υποσυστήματά της ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Για την διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο ηχόμετρα, το ένα ηχόμετρο τοποθετήθηκε σε σταθερή θέση αναφοράς (θέση P) επί τρίποδα ώστε να ανιχνεύει τη *μεταδιδόμενη* εκπομπή στο κέντρο όλων των συστημάτων (θεωρούμενη θέση εργασίας αναφοράς). Το άλλο ηχόμετρο μετακινούνταν πλησίον (~1,0m) των επιμέρους πηγών θορύβου της μηχανής ώστε να εξετάσει το *απομονωμένο φάσμα* τους. Με αυτόν τον τρόπο μετρήθηκε ο θόρυβος ενεργοποιώντας/απενεργοποιώντας τα επί μέρους συστήματα. 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. Η τοποθέτησή του έγινε σε τέσσερις θέσεις, κοντά σε υποσυστήματα ενδιαφέροντος:

- Θέση I: Κέντρο cell (θέση εργασίας αναφοράς)
- Θέση II: Εντός κύριας μηχανής συναρμολόγησης
- Θέση III: Θέση τοποθέτησης των υποτεμαχίων
- Θέση IV: Πλησίον υποσυστήματος A



Σχήμα 3.9: Cell κύριας μηχανής με τα υποσυστήματά της

3.2 Αποτελέσματα ηχομετρήσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα πρωτογενή αποτελέσματα των ηχομετρήσεων που διενεργήθηκαν. Όπως προαναφέρθηκε, το ένα ηχόμετρο (Pulsar Model 93) είναι τοποθετημένο σε σταθερό σημείο ενώ το άλλο (RION NA-28) μετακινείται σε εγγύτητα στο εξεταζόμενο υποσύστημα/θέση εργασίας (θέση A – Δ).

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα ηχομετρήσεων

Συνθήκες – Θέση RION NA-28	RION		PULSAR
	Leq	Lmax	Leq
Θέσεις I – IV, Background noise	60.7-63.8	77.3	63.9

Συνθήκες – Θέση RION NA-28	RION		PULSAR
	Leq	Lmax	Leq
Θέσεις I – IV, Όλα τα συστήματα αέρα	85.9-93.7	94.1	85.6
Θέσεις I – IV, Δόνηση υποσυστήματος Δ	73.9-79.8	81.7	78.9
Θέσεις I – IV, Αέρας υποσυστήματος Δ	68.6-70.7	73.6	70.3
Θέσεις I – IV, Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος	78.7- 80.7	79.3	81.2
Θέσεις I – IV, Δόνηση υποσυστήματος Α	73.7-79.8	80.4	73.5
Θέσεις I – IV, Αέρας καζανιού υποσυστήματος Α	75.3- 86.2	86.5	75.1
Θέσεις I – IV, Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος	81.4-96.9	97.7	81.3
Θέσεις I – IV, Αέρας και δόνηση υποσυστήματος	77.0-79.5	81.2	76.9
Θέσεις I – IV, Μετακίνηση τεμαχίων εντός	76.9-79.8	82.3	75.7
Θέσεις I – IV, Δόνηση υποσυστήματος Γ	71.9-73.4	75.1	73.4
Θέσεις I – IV, Αέρας υποσυστήματος Γ	72.4-73.1	74.8	72.9
Θέσεις I – IV, Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος	75.7- 81.0	81.5	80.4
Θέσεις I – IV, Αέρας κύριας μηχανής (κλειστά	81.5-92.5	81.9	81.1
Θέσεις I – IV, Αέρας κύριας μηχανής (ανοιχτά	82.5-86.2	86.6	86.6
Θέσεις I – IV, Κανονική λειτουργία μηχανής	88.3-94.4	95.4	88.2
Θέσεις I – IV, Κανονική λειτουργία μηχανής	90.6-94.1	97.1	90.4

3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας της ταξινόμησης των επιμέρους πηγών θορύβου της μηχανής, με κριτήριο την επίδρασή της στο κέντρο του cell (σημείο μέτρησης Pulsar). Η ταξινόμηση πραγματοποιείται αφαιρώντας ενεργειακά τα αποτελέσματα κατάλληλων ηχομετρήσεων του ηχομέτρου Pulsar ώστε να απομονωθεί η κάθε μεμονωμένη συνεισφορά και στη συνέχεια οι συνεισφορές των ομάδων υποσυστημάτων αλλά και των συστημάτων τροφοδοσίας ως όγκοι.

Πίνακας 3.2 Ιεράρχηση πηγών θορύβου

Μέτρηση Προσθετέου	Μέτρηση Προσθετέου	Πηγή θορύβου	Συνεισφορά – ηχοστάθμη
16	1	Αέρας κύριας μηχανής (ανοιχτά πορτάκια)	86.6
9	1	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Α	81.2
6	1	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Δ	81.1
14	1	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Γ	80.3

4	1	Δόνηση υποσυστήματος Δ	78.8
10	1	Αέρας και δόνηση υποσυστήματος Β	76.7
11	1	Μετακίνηση τεμαχίων εντός κύριας μηχανής	75.4
8	1	Αέρας υποσυστήματος Α	74.8
7	1	Δόνηση υποσυστήματος Α	73.0
12	1	Δόνηση υποσυστήματος Γ	72.9
13	1	Αέρας υποσυστήματος Γ	72.3
5	1	Αέρας υποσυστήματος Δ	69.2
1	-	Background noise	63.9

Πίνακας 3.3 Ιεράρχηση ομάδων υποσυστημάτων

Μέτρηση μειωτέου	Μέτρηση αφαιρετέου	Πηγή θορύβου	Συνεισφορά -
18	1	Όλη η μηχανή (ανοιχτές θύρες)	90.4
17	1	Όλη η μηχανή (κλειστές θύρες)	88.2
3	1	Σύνολο συστημάτων αέρα όλων των υποσυστημάτων	85.6
16	1	Μόνο αέρας μηχανής (ανοιχτές θύρες)	86.6
17	3	Σύνολο συστημάτων χωρίς αέρα (κλειστές θύρες)	84.7
17-1	various	Block κύριας μηχανής (ανοιχτές θύρες)	87.1

Πίνακας 3.4 Ιεράρχηση υποσυστημάτων τροφοδοσίας

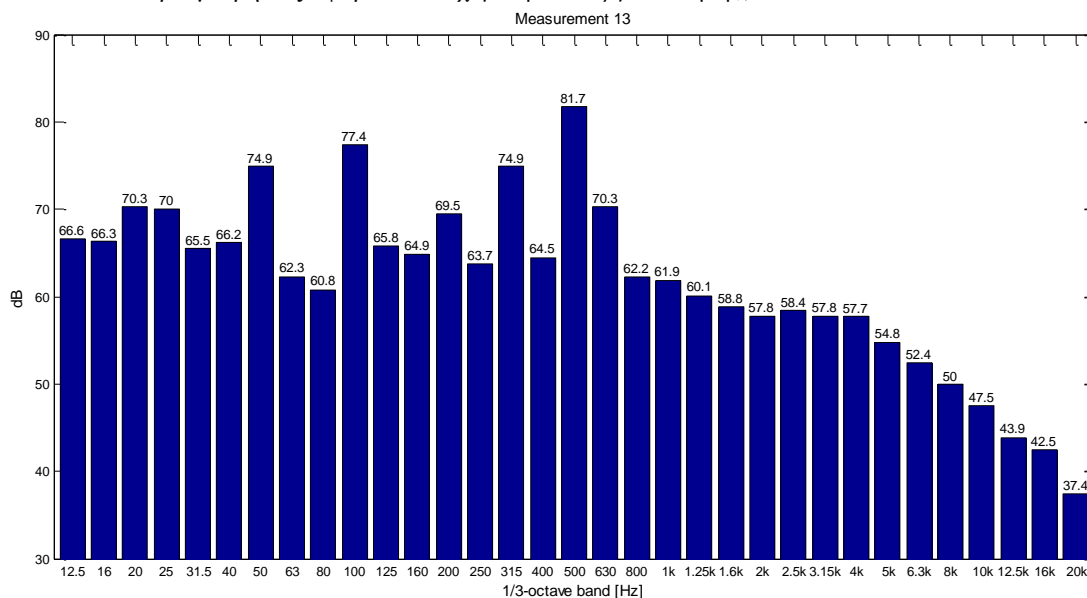
Μέτρηση Προσθετέου	Μέτρηση Προσθετέου	Πηγή θορύβου	Συνεισφορά - μειωτέου
4-1	5-1	Δονητικό τροφοδοσίας υποσυστήματος Δ	79.2
7-1	8-1	Δονητικό τροφοδοσίας υποσυστήματος Α	77.0
10-1	-	Δονητικό τροφοδοσίας υποσυστήματος Β	76.7
12-1	13-1	Δονητικό τροφοδοσίας υποσυστήματος Γ	75.6

Σημειώνεται ότι οι συνεισφορές που υπολογίζονται για κάθε πηγή αφορούν την εκπομπή που φτάνει στο σημείο μέτρησης του ηχομέτρου Pulsar (όχι στην αντικειμενική ισχύ κάθε πηγής), συμπεριλαμβάνοντας την απόσταση, τα εμπόδια κλπ.

Από τα ανωτέρω επεξεργασμένα αποτελέσματα προκύπτουν άμεσα τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τη συνεισφορά της κάθε πηγής:

1. Η μεγαλύτερη πηγή θορύβου στο cell είναι η κύρια μηχανή, η οποία καθιστά την ηχοστάθμη στο cell ανώτερη των 85dB(A) από μόνη της.
2. Το κάθε σύστημα τροφοδοσίας τεμαχίων μόνο του έχει χαμηλότερη συνεισφορά από 80dB(A) στο κέντρο του cell. Παρ' όλ' αυτά, όλα μαζί τα συστήματα δόνησης (μαζί με τον αέρα της, χωρίς τους διαδρόμους) οδηγούν σε συνεισφορά αρκετά άνω των 80dB(A). Ειδικά το υποσύστημα

Δ, έχει υψηλή συνεισφορά θορύβου, που οφείλεται κυρίως στη δόνηση (και όχι στον αέρα) των 50 και 100Hz (φασματική ανάλυση μέτρησης 13). Σημειώνεται πως η λειτουργία της δεν είναι σταθερή και διακυμαίνεται σημαντικά, ανάλογα με την ανάγκη τροφοδοσίας τεμαχίων στη μηχανή (οι ανωτέρω μετρήσεις αφορούν *συνεχόμενη λειτουργία δόνησης*).



Σχήμα 3.2 Φασματική ανάλυση μέτρησης κοντά στο υποσύστημα Δ

3. Η συνεισφορά του μεμονωμένου διαδρόμου του υποσυστήματος Γ (αέρας) είναι χαμηλότερη των 80dB(A), αλλά οι διάδρομοι τροφοδοσίας των υποσυστημάτων Α και Δ υπερβαίνουν τα 81dB(A). Από μόνι τους αυτοί οι δύο διάδρομοι είναι αρκετοί ο καθένας για την υπέρβαση των ορίων θορύβου στο cell.

4. Υπολογισμός ηχομονωτικών μέτρων – ωφέλεια χειριστή

Αφού υπολογίστηκαν και ιεραρχήθηκαν οι εκπομπές θορύβου των υποσυστημάτων και της κύριας μηχανής, θα πρέπει να ηχομονωθούν οι πηγές κατάλληλα ώστε το επίπεδο θορύβου στη θέση του χειριστή να μην ξεπερνά το όριο των 80dB(A), όπως είχε θεσπιστεί από τον κύριο του έργου. Αυτό σημαίνει πως το ενεργειακό άθροισμα θορύβου όλων των πηγών δε θα πρέπει να ξεπερνά αυτό το όριο. Έτσι, πρέπει να βρεθεί η απαραίτητη ηχοαπόσβεση ΔL κάθε πηγής ώστε να ισχύει:

$$(Leq_1 - \Delta L_1) + (Leq_2 - \Delta L_2) + (Leq_3 - \Delta L_3) + (Leq_4 - \Delta L_4) + \dots \leq 80dB(A) \tag{4.1}$$

όπου ο τελεστής ++ υποδηλώνει ενεργειακή πρόσθεση ηχοστάθμης.

Η απαραίτητη ηχοαπόσβεση ΔL_i κάθε επιμέρους πηγής θα τεθεί ως στόχος, βάσει της δυνατότητας ηχομόνωσης και της επιρροής της πηγής (κατευθυντικότητα) ως προς τη θέση του χειριστή. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να επωφεληθεί ο χειριστής μέσω των ηχομονωτικών μέτρων που θα ληφθούν είναι δύο: α) Ο πρώτος αφορά την ηχομόνωση των υποσυστημάτων κατασκευάζοντας ηχομονωτικούς κλωβούς που θα περικλείουν τα υποσυστήματα αυτά και β) ο δεύτερος αφορά τη δράση αυτών των κατασκευών ως φράγματα ήχου (ηχοπετάσματα) έναντι άλλων υποσυστημάτων με θέση αναφοράς τον χειριστή.

4.1 Ηχομονωτικοί κλωβοί

Οι κλωβοί αποτελούν διατάξεις μείωσης του θορύβου και είναι απαραίτητοι όταν οι απαιτήσεις για ηχομόνωση είναι μεγάλες όπως στην περίπτωση μείωσης θορύβου στις μηχανές. Η ηχητική ενέργεια στο χώρο εκπομπής αποτελείται από την απευθείας διαδιδόμενη από την πηγή (w), και από τη διάχυτη η οποία δίδεται από τον τύπο ws/R , όπου R είναι η σταθερά του δωματίου και s το εμβαδόν των τοιχωμάτων του κλωβού. Η απευθείας διαδιδόμενη προσπίπτει κάθετα στα τοιχώματα του χώρου ενώ η διάχυτη με τυχαία γωνία πρόσπτωσης. Για την ισχύ που διαφεύγει από τον κλωβό ισχύει [3]:

$$w = \frac{\overline{p_1^2}}{\rho c} = w\tau_N + \frac{w}{R_c} s\tau \quad (4.2)$$

όπου w η ενέργεια που εκπέμπει η πηγή ανά μονάδα χρόνου, R_c ($R_c = \frac{s\alpha}{1-\alpha}$) η σταθερά του «δωματίου», τ ο συντελεστής διάδοσης για τυχαία πρόσπτωση και τ_N ο συντελεστής διάδοσης για κάθετη πρόσπτωση ($\tau_N = 0,3\tau$ για απλότητα στις εφαρμογές μας)

Με λογαρίθμηση των παραπάνω σχέσεων προκύπτει η ηχοστάθμη L_p εκτός του κλωβού:

$$L_p = L_w - R_w + 10\log\left(0.3 + \frac{s}{R_c}\right) \quad (4.3)$$

όπου L_w η εκπομπή ηχητικής ισχύος εντός του κλωβού-«δωματίου» και R_w ο δείκτης ηχομείωσης του κλωβού.

4.2 Ηχοπετάσματα

Τα φράγματα ήχου χρησιμοποιούνται για την μείωση του θορύβου τόσο σε ανοιχτούς όσο και σε κλειστούς χώρους. Το ηχοπέτασμα παρά το γεγονός ότι στην περιοχή που βρίσκεται η πηγή, η στάθμη λόγω της ανάκλασης αυξάνει, δημιουργεί πίσω του μια περιοχή «σκιάς» που μειώνει το θόρυβο που θα υπήρχε χωρίς την παρουσία του. Για τον υπολογισμό της στάθμης του ήχου πίσω από την επιφάνεια του φράγματος στην περιοχή της σκιάς, χρησιμοποιούνται οι νόμοι της γεωμετρικής οπτικής αφού ληφθεί υπόψη και η ανάκλαση από το έδαφος. Σύμφωνα με την

προσεγγιστική θεωρία του Kirchoff η ηχομείωση από τα φράγματα μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση [3]:

$$A = -10 \log \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} - X \right)^2 + \left(\frac{1}{2} - Y \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

όπου:

$$X = \int_0^{v_1} \cos \left(\frac{\pi}{2} v^2 \right) dv, Y = \int_0^{v_1} \sin \left(\frac{\pi}{2} v^2 \right) dv, v = h \sqrt{\frac{2}{h} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)} \quad (4.5)$$

και a, b, h είναι τα γεωμετρικά στοιχεία του ηχοπετάσματος.

4.3 Υπολογισμός ηχομονωτικών λύσεων

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα φάνηκε ότι οι κύριες πηγές θορύβου είναι η μηχανή συναρμολόγησης με τους μεταφορικούς διαδρόμους της και ένα από τα δονητικά συστήματα τροφοδοσίας. Έτσι, σχεδιάζεται η **υλοποίηση επεμβάσεων μείωσης θορύβου με ιεράρχηση τις σημαντικότερες πηγές θορύβου** με στόχο την **τεχνο-οικονομικά** βέλτιστη λύση. Αναλυτικά οι επεμβάσεις αφορούν:

1. Ηχομονωτική κατασκευή κλωβού επί της κύριας μηχανής συναρμολόγησης,
2. Ηχομονωτική κατασκευή κλωβού σε όλους του μεταφορικούς διαδρόμους,
3. Ηχομονωτική κατασκευή κλωβού επί του δονητικού υποσυστήματος Δ.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις ελάχιστες απαιτούμενες αποδόσεις των κατασκευών 1 – 3, ώστε να επιτευχθεί ηχοστάθμη κατώτερη των 80dB(A) στη θέση χειριστή αναφοράς του cell από τα υποσυστήματα της κύριας μηχανής [ηχοστάθμες σε dB(A)]:

Πίνακας 4.5 Ελάχιστες απαιτούμενες αποδόσεις κατασκευών

A/A	Noise source	Leq πριν	ΔL	Τελικό Leq
1	Block κύριας μηχανής	87.1	17	70.1
2	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Δ	81.1	15	66.1
3	Δόνηση υποσυστήματος Β	76.7	10	66.7
4	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Γ	80.3	9	71.3
5	Αέρας διαδρόμου υποσυστήματος Α	81.2	10	71.2
6	Δόνηση υποσυστήματος Α	77.0	5	72.0
7	Δόνηση υποσυστήματος Δ	79.2	7	72.2
8	Δόνηση υποσυστήματος Γ	75.6	2	73.6
			Σύνολο	80.0

Σημειώνεται βέβαια πως βάσει της αβεβαιότητας των αρχικών μετρήσεων πρέπει να ληφθεί και στο σχεδιασμό μια ανοχή τουλάχιστον 3dB(A).

Αφού επιλέχθηκε το μέγεθος της ηχομείωσης που θέλουμε να επιτύχουμε καθώς και ο τρόπος με τον οποίο θα αντιμετωπιστεί (κλωβός/ηχοπέτασμα), έγινε

σχεδιασμός των ηχομονωτικών λύσεων για κάθε υποσύστημα με κριτήριο την εργονομία ως όπως τον χειριστή και την συντήρηση της μηχανής και το κόστος κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψιν τις ανωτέρω θεωρίες για την κατασκευή - απόδοση του ηχομονωτικού κλωβού, την ηχομονωτική ικανότητα (συντελεστής απορρόφησης) των υλικών και την ηχομονωτικά ορθή εγκατάστασή της στην τελική κατασκευή, επεμβαίνουμε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχουμε την τελική επιθυμητή ηχομείωση. Επίσης, μία εναλλακτική λύση αντιμετώπισης του θορύβου των υποσυστημάτων είναι να γίνει εντοπισμός των πηγών θορύβου ως εξαρτήματα και να γίνει αντικατάσταση αυτών με άλλα παρόμοιου τύπου αλλά με μειωμένη εκπομπή θορύβου. Ο σχεδιασμός των ανωτέρω επεμβάσεων γίνεται έτσι ώστε να είναι εργονομική η κατασκευή, όπως με την καθημερινή χρήση των χειριστών και με τις πιθανές απαιτήσεις συντήρησης.

5. Αποτελέσματα μετρήσεων θορύβου μετά την υλοποίηση ηχομονωτικών επεμβάσεων

Μετά την ολοκλήρωση των κατασκευών ηχομόνωσης πραγματοποιήθηκαν ηχομετρήσεις τεκμηρίωσης του αποτελέσματος. Οι ηχομετρήσεις είχαν τις ίδιες συνθήκες που είχαν και πριν τις κατασκευές, αλλά δεν ήταν απαραίτητη η αναλυτική διερεύνηση σε κάθε σημείο και από κάθε υποσύστημα, αλλά μόνο στη θέση αναφοράς (θέση χειριστή – κέντρο cell). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηχομετρήσεων μετά τις επεμβάσεις:

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ηχομετρήσεων μετά την ηχομόνωση

A/M	Θέση - Περιγραφή	Leq [dB(A)]	Lmax [dB(A)]
1	Θέση αναφοράς – Κανονική	79.2	81.0
2	Θέση χειριστή – Λειτουργία με	91.6	93.6
3	Θέση χειριστή – Background noise	73.0	75.5

Με βάση τις ανωτέρω μετρήσεις, φαίνεται ότι μετά την ολοκλήρωση των κατασκευών ηχομόνωσης η ηχοστάθμη μετρήθηκε χαμηλότερη των 80dB(A), όπως ήταν ο στόχος. Συγκεκριμένα, αφαιρώντας το background noise, η επίδραση της εξεταζόμενης παραγωγικής μηχανής στη θέση χειριστή προκύπτει **78.0dB(A)**. Σημειώνεται ότι η ηχοστάθμη στην ίδια θέση πριν τις επεμβάσεις ηχομόνωσης ήταν 88.2dB(A).

6. Συμπεράσματα

Από την ανωτέρω ανάλυση φαίνεται ότι η μεθοδολογία αντιμετώπισης εργασιακού θορύβου με βάση τη διερεύνηση και ιεράρχηση υποσυστημάτων ενδείκνυται για την επίτευξη ηχοστάθμης εντός ορίων χωρίς να απαιτηθεί ο εγκλεισμός όλης της γραμμής παραγωγής. Έτσι, εξυπηρετούνται οι απαιτήσεις πρόσβασης από χειριστές – συντηρητές στην ίδια τη μηχανή, αλλά και δεν

μεταβάλλεται η παραγωγική διαδικασία αναφορικά με την τροφοδοσία και έξοδο υλικών. Επίσης, η μεθοδολογία ενδείκνυται για εφαρμογές βελτιστοποίησης κόστους και χρόνου εφ' όσον δεν απαιτεί καθολικές εργασίες ηχομόνωσης, αλλά εντοπισμένες.

7. 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 (2012) 172e177

[2] Professor Colin H. Hansen, Dr Berenice I.F. Goelzer, ENGINEERING NOISE CONTROL, Department of Mechanical Engineering World Health Organization, University of Adelaide

[3] Δ.Σκαρλάτος, Εφαρμοσμένη Ακουστική, 4^η έκδοση

Κτυπογενής θόρυβος στα αυτοκίνητα: Η αναλύση και η μείωση του με νέες τεχνολογίες ενεργού ελέγχου

Νίκος Ζαφειρόπουλος
Μηχανικός Δονήσεων και Θορύβου /
Harman Becker Gmbh, Straubing
Germany
Nikos.Zafeiropoulos@harman.com

Στέλιος Ποτηράκης
Αναπληρωτής
Καθηγητής/ Α.ΤΕΙ
Πειραιά, Τμήμα
Ηλεκτρονικής
spoti@teipir.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια πολλά μοντέλα αυτοκινήτων που κυκλοφορούν στην αγορά είναι εξοπλισμένα με τεχνολογίες ενεργού ελέγχου θορύβου και δονήσεων με σκοπό την απόσβεση συντονισμών που προέρχονται από τον κινητήρα και άλλα μηχανικά μέρη του αυτοκινήτου.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση και η ενεργός μείωση χτυπογενούς θορύβου που προέρχεται από τις διεγέρσεις που δέχονται τα ελαστικά του αυτοκινήτου. Σαν παράδειγμα χρησιμοποιείται ένα μοντέρνο SUV και η εφαρμογή global RNC (Road Noise Cancellation) με πλήρως προσαρμοστικό αλγόριθμο, ο οποίος υλοποιήθηκε σε πραγματικό χρόνο σε automotive DSP amplifier. Με βάση τα αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν σε πίστα δοκιμών, το σύστημα προσφέρει την προσδοκώμενη μείωση ανεξαρτήτως επιφανείας.

Structure-borne noise in vehicles: Analysis and reduction with modern active control technologies

ABSTRACT

Many modern vehicles are equipped with active noise technologies for reducing engine orders or other powertrain noise components. In this paper the analysis and the active control of structure-borne road noise that is generated by road surface excitations. As an implementation example a modern SUV is used for global active control with an adaptive algorithm that was ported for the real-time application in a modern DSP amplifier. Measurement results on roads and test tracks are shown in order to demonstrate the targeted acoustic performance that is independent the road surface.

Εισαγωγή

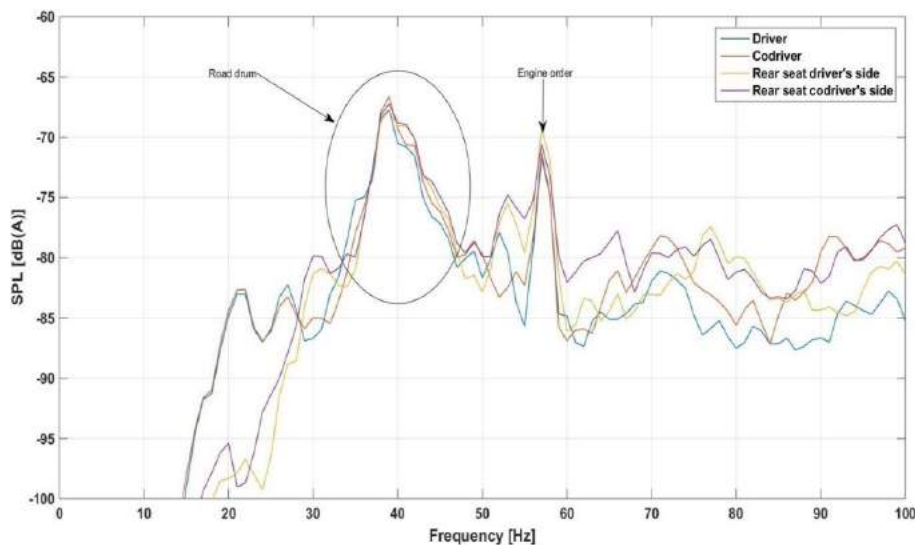
Τα περισσότερα σύγχρονα οχήματα είναι γενικότερα αρκετά καλά σχεδιασμένα για τη απόσβεση της διάδοσης δονήσεων που προκαλούν κτυπογενή θόρυβο στη καμπίνα λόγω της κατασκευής του οδοστρώματος. Παρόλα αυτά προβλήματα κτυπογενή θορύβου μπορούν να μεταφερθούν σε οχήματα γραμμής παραγωγής και στις μελλοντικές πλατφόρμες, εάν οι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τους ίδιους άξονες και παρόμοιο αμάξωμα. Η τεχνολογία Road Noise Cancellation (RNC) μπορεί να εφαρμοστεί στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του οχήματος, ώστε οι κύριοι συντελεστές του θορύβου που βρέθηκαν από την ανάλυση των κτυπογενών πηγών να χρησιμοποιηθούν ως θέσεις για τους αισθητήρες δόνησης που είναι αναγκαίοι για τον ελεγκτή.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση για την ανάλυση του οχήματος χρησιμοποιούμε την πολλαπλή συνοχή (multiple coherence) με τέτοιο τρόπο ώστε να βρούμε τις καλύτερες θέσεις και κατευθύνσεις δονήσεων που μπορούν επίσης να επαληθευτούν και από άλλες τεχνικές Noise, Vibration and Harshness (NVH). Σε προηγούμενες εργασίες, η τοποθέτηση των αισθητήρων έγινε με βάση πόσες ανεξάρτητες δονητικές πηγές ενεργούν σε κάθε ανάρτηση και σαν γενικότερο κανόνα προτείνονται 3-6 δονητικά σήματα αναφοράς ανά τροχό, προκειμένου να εξασφαλιστούν υψηλές τιμές συνοχής στη συχνοτική περιοχή δρόμο του θορύβου [1,2]. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν είναι απολύτως έγκυρη, αφού οι διάφορες δονητικές πηγές που ασκούνται στο αμάξωμα εξαρτώνται από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης και των αξόνων. Ως αποτέλεσμα, η υπόθεση της 3-6 σημάτων αναφοράς ανά τροχό μπορεί να οδηγήσει σε ένα υψηλότερο ή χαμηλότερο αριθμό των αισθητήρων που δεν σχετίζονται με τις πραγματικές πηγές κτυπογενούς θορύβου. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση μας λάμβανουμε υπόψη τη γεωμετρία του οχήματος και το γεγονός ότι ο εμπρός και πίσω άξονας είναι μηχανικά μη συζευμένα συστήματα προκειμένου να απομονωθούν οι πηγές του εμπρός και πίσω άξονα και να προσδιορίσει τη βέλτιστη θέση για τους αισθητήρες με βάση τη χαρτογράφηση των πηγών στους άξονες.

Ως παράδειγμα γίνεται χρήση ενός τετρακίνητου οχήματος που έχει μια πολύ πρόβλημα πολύ χαμηλών συχνοτήτων (<100 Hz). Σε αυτό το εύρος συχνοτήτων και η διάταξη των μεγάλων είναι επίσης κρίσιμοι παράμετροι και ενεργό σύστημα, το οποίο πρέπει να έχει μέγιστη μείωση 10 dB(A) στη συχνότητα του κτυπογενή συντονισμού και σε κάθε προσκέφαλο στη καμπίνα.

1. Κτυπογενής θόρυβος στη καμπίνα

Επί του παρόντος, οι εξελίξεις στην υπολογιστικές ακουστικές προβλέψεις και άλλες προηγμένες τεχνικές μέτρησης NVH βοηθούν στην μηχανική και ακουστική σχεδίαση του αυτοκινήτου. Το αυτοκίνητο που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή έχει γενικότερα χαμηλές στάθμες αερόφερτου θορύβου αλλά όπως παρουσιάζετε στην παρακάτω γραφική σε κάθε προσκέφαλο γίνεται αντιληπτός ένας χαμηλών συχνοτήτων συντονισμός στα 40 Hz.



Τέτοιου τύπου συντονισμοί απαιτούν αύξηση της μάζας των αξόνων ώστε να μειωθούν το πλάτος των μηχανικών συντονισμών και ειδικότερα κάτω από τα 100 Hz μια τέτοια αύξηση μπορεί να έχει συνέπειες στη δυναμική συμπεριφορά του οχήματος.

Σχήμα 1: Θόρυβος στα τέσσερα προσκέφαλα. FL: Οδηγός .FR: Συνοδηγός .RL: Θέση πίσω από τον οδηγό. RR: Θέση πίσω από το συνοδηγό. Ο κτυπογενής συντονισμός εμφανίζεται στα 40 Hz και κάποιοι στενής ζώνης θόρυβοι εμφανίζονται επίσης λόγω της λειτουργίας του κινητήρα σε ECO mode.

1.2. Μεθοδολογία για την τοποθέτηση των αισθητήρων

Οι θέσεις των κτυπογενών πηγών και οι κύριες κατευθύνσεις τους, μπορούν να βρεθούν με μετρητικές μεθόδους και συγκεκριμένα με Transfer Path Analysis (TPA) μεθόδους. Η ανάλυση των πηγών και των διαδρομών των δονήσεων που προσφέρει η TPA μέθοδος μπορεί να προσφέρει σημαντική κατεύθυνση στη τοποθέτηση των αισθητήρων. Η ανάλυση πολλαπλής συνοχής όπως προτάθηκε στο παρελθόν μελέτες για την ανάλυση κτυπογενή θορύβου [3] μπορεί επίσης να βρει τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων και να επαληθεύσει τις θέσεις και κατευθύνσεις τους που βρέθηκαν από τη TPA. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται διαφορετικά υποσύνολα των σημάτων επιτάχυνσης όπως στη TPA, προκειμένου να ελεγχθεί η συνάρτηση συνοχής. Σε δεύτερο στάδιο γίνεται ο υπολογισμός των μήτρων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης στο πεδίο των συχνοτήτων ώστε να εφαρμοστεί Principal Component Analysis για την αποσυσχέτιση των σημάτων αναφοράς και να υπολογιστεί η πολλαπλή συνοχή μεταξύ των δονητικών και ακουστικών σημάτων [4]. Ως εκ τούτου, κάθε μήτρα του εκάστοτε υποσυνόλου μπορεί να αποκαλύψει πόσες πηγές ενεργούν για κάθε θέση και πόσο μεγάλη είναι η πολλαπλή συνοχή μεταξύ του υποσυνόλου και μια θέση μικροφώνου στην καμπίνα.

Τα δονητικά σήματα επιτάχυνσης αν σημειωθούν ως k -είσοδοι αναφοράς του συστήματος, $\mathbf{x}(t)$, στο σύστημα του οχήματος και ως έξοδο τα σήματα l -

μικρόφωνα στην καμπίνα του οχήματος, $\mathbf{y}(t)$, τότε μπορούμε να ορίσουμε τους παρακάτω ανύσματα

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dots \ x_k(t)] \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ y_3(t) \ \dots \ y_l(t)] \quad (2)$$

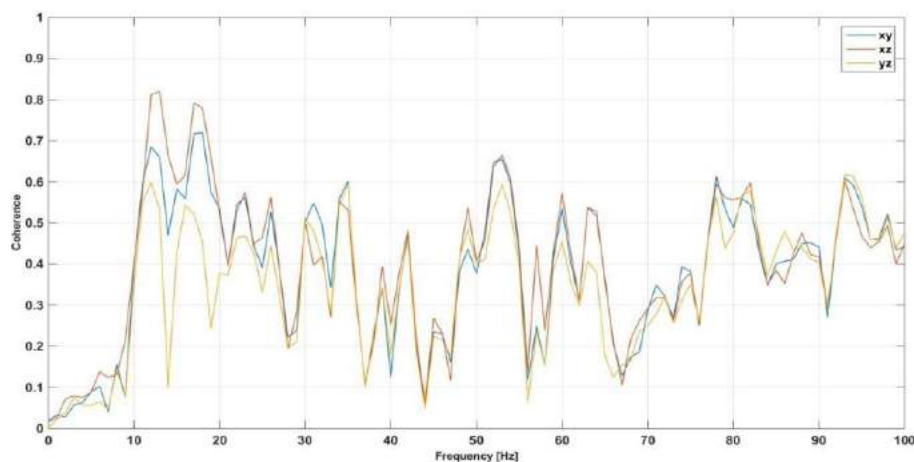
Τα σήματα αναφοράς μπορούν περαιτέρω να χωριστούν σε δύο σετς με βάση τους δύο άξονες, οι οποίοι είναι μηχανικά αποσυζευγμένοι. Με βάση αυτόν τον χωρισμό των δονητικών σημάτων μπορεί να αρχικά να αποκαλυφθεί ποιος άξονας είναι σημαντικότερος για το συντονισμό στα 40 Hz.

$$\mathbf{x}_{\text{front}}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dots \ x_k(t)] \quad (3)$$

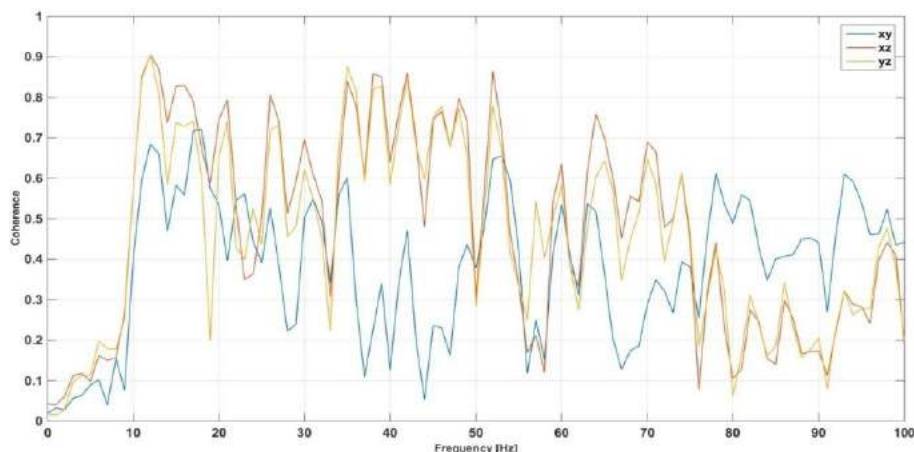
$$\mathbf{x}_{\text{rear}}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ \dots \ x_k(t)] \quad (4)$$

Μπορούμε να δημιουργήσουμε επιπλέον υποσύνολα που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θέσεις στους άξονες για να βρεθεί πόσο συμβάλλουν στο σήμα θόρυβο που καταγράφεται στο εσωτερικό του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση θα δείξουμε πώς οι είσοδοι των εμπρός και πίσω αξόνων υπολογίζονται με την τεχνική της εικονικής συνοχής (virtual coherence) [4,5]. Αν θέλουμε να δούμε τις εισφορές των θέσεων μέτρησης μπορούμε να διατυπώσουμε την πολλαπλή συνοχή ως εξής

$$\gamma_{l:k\text{front}}^2(f) = \mathbf{S}'_{lk}{}^2 \mathbf{S}'_{ll}{}^{-1} \mathbf{S}'_{kk}{}^{-1} \quad (3)$$



όπου $\mathbf{S}'_{lk}{}^2$ η εικονική ετεροσυσχέτιξη στο πεδίο των συχνοτήτων μεταξύ των l -ακουστικών και k -δονητικών σημάτων και $\mathbf{S}'_{kk}{}^{-1}$ ο πίνακας με τα φάσματα των αυτοσυσχετίσεων των εικονικών σημάτων αναφοράς. Η ίδια διαδικασία



ακολουθείτε για κάθε σετ σημάτων αναφορών, ώστε να ξεχωριστούν οι εισφορές των εκάστοτε σημείων μέτρησις στην δομή του οχήματος [6]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μόνο δύο σετ αναφοράς αναλύονται αφού το πρόβλημα κτυπογενή θορύβου είναι στη συχνοτική περιοχή όπου μηχανικές δονήσεις δεν είναι τοπικές σε κάποιο μηχανικό εξάρτημα της ανάρτησης. Στις παρακάτω γραφικές εμφανίζεται η εφαρμογή της μεθόδου μεταξύ του θορύβου στο προσκέφαλο του οδηγού.

Σχήμα 2: Πολλαπλή συνοχή μεταξύ δονητικών σημάτων από τον μπροστινό άξονα και το καταγεγραμμένο θόρυβο στο προσκέφαλο του οδηγού.

Σχήμα 2: Πολλαπλή συνοχή μεταξύ δονητικών σημάτων από τον πίσω άξονα και το καταγεγραμμένο θόρυβο στο προσκέφαλο του οδηγού.

Όπως φαίνεται εμφανίζεται υψηλή συνοχή μεταξύ 30-50 Hz για τα σήματα αναφοράς του πίσω άξονα και συγκεκριμένα για τις κατευθύνσεις x-z και y-z. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης ψηφιακοί αισθητήρες τοποθετήθηκαν στον πίσω άξονα και σε αυτές τις κατευθύνσεις.

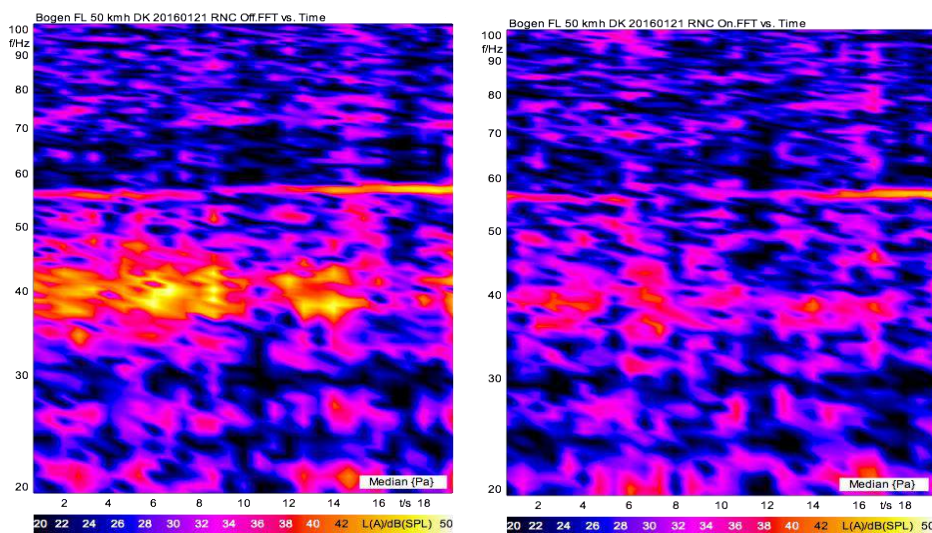
1.3. Περιγραφή ενεργού συστήματος

Το όχημα ήταν εφοδιασμένο με έναν ψηφιακό ενισχυτή Harman που ήταν σε θέση να οδηγήσει τα τρία μεγάφωνα χαμηλής συχνότητας που είναι ήδη τοποθετημένα από τον κατασκευαστή. Επιπλέον, έξι θέσεις επιταχυνσιόμετρων χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των δονήσεων δρόμο τύμπανο στο μπροστινό και πίσω άξονα. Από την άποψη της διάταξης μικροφώνου τέσσερα μικρόφωνα χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση του εσωτερικού θορύβου στο ταβάνι της καμπίνας πάνω από το κεφάλι των επιβατών. Αυτή η ρύθμιση μπορεί να οδηγήσει σε ένα παγκόσμιο σύστημα ANC (global), που μπορεί να ακυρώσει εξίσου 10 dB (A) σε όλες τις θέσεις καθημένων.

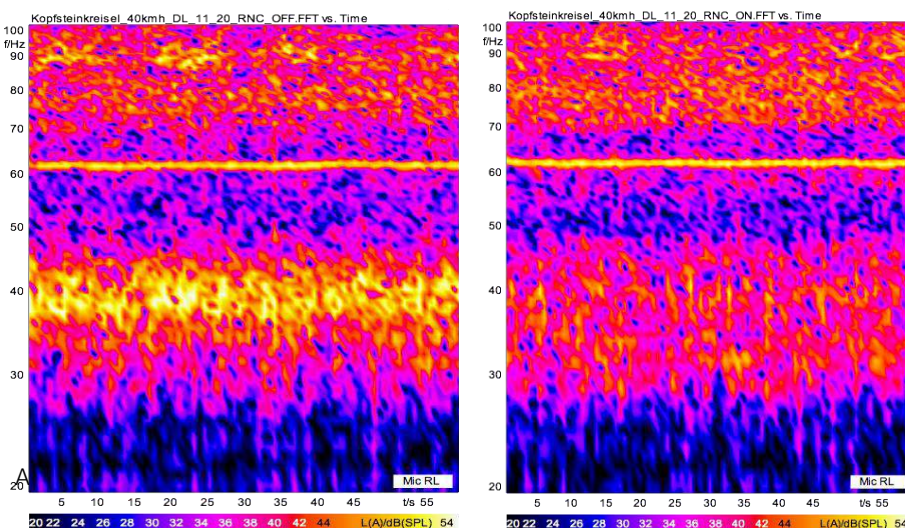
2. Γενική διάταξη κειμένου

Το προσαρμοστικό αξιολογήθηκε κάτω από διάφορες συνθήκες οδήγησης και οδικές επιφάνειες. Στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται μετρήσεις όπου το πρόβλημα του συντονισμού των 40 Hz βρέθηκε να κυριαρχεί στο ηχητικό πεδίο της καμπίνας. Ο χρόνος προσαρμογής μετρήθηκε επίσης αρχίζοντας με μηδενικές τιμές στα προσαρμοστικά φίλτρα. Μετά από 1,5 λεπτό οδήγηση, ο αλγόριθμος είχε συγκλίνει σε ένα σύνολο φίλτρων που είχε ως αποτέλεσμα σε 10 dB (A) μείωση του συντονισμού. Το σύστημα RNC κατόπιν αφέθηκε να προσαρμόζεται συνεχώς σε διάφορες οδικές επιφάνειες και στη συνέχεια μετρήθηκε η μείωση.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα φασματογραφήματα των 20 δευτερόλεπτων καταγραφής στο προσκέφαλο του οδηγού, όταν το όχημα κινείται πάνω από μια τραχιά άσφαλτο. Ο συντονισμός είναι ακουστικά αντιληπτός μεταξύ 35-45 Hz και μέγιστη 12 dB (A) επιτεύχθηκε σε αυτήν την περίπτωση. Η υποκειμενική βελτίωση ήταν αρκετά αισθητή, ώστε ένα αίσθημα ενός αρκετά ήσηχου ακουστικού περιβάλλοντος στην καμπίνα βιώθηκε από τους μη ειδικούς σε θέματα ακουστικής.



Σχήμα 3: Απόδοση RNC συστήματος στο προσκέφαλο του οδηγού, μέτρηση σε τραχιά επιφάνεια στα 50 χλμ/ώρα. Δεξιά: Ανενεργό RNC σύστημα Αριστερά: Ενεργοποιημένο.



Σχήμα 4: Απόδοση RNC συστήματος στο προσκέφαλο του οδηγού, μέτρηση σε τραχιά επιφάνεια στα 50 χλμ/ώρα. Δεξιά: Ανενεργό RNC σύστημα. Αριστερά: Ενεργοποιημένο.

Η απόδοση του συστήματος μετρήθηκε και σε επιφάνεια πετρόχτιστου δρόμου, όπου καταγράφονται μεγάλες στάθμες κτυπογενή θορύβου. Στις γραφικές του σχήματος 3, εκτός από το κτυπογενή συντονισμό, εμφανίζεται και μια αρμονική του κινητήρα, η οποία μπορεί εύκολα να ακυρωθεί από πάλι ένα ενεργό προσαρμοστικό σύστημα το οποίο λαμβάνει υπόψιν τις στροφές του κινητήρα. Σημαντικό είναι ότι και σε αυτή την επιφάνεια το σύστημα πετυχαίνει και εδώ μεγάλη μείωση η οποία γίνεται αντιληπτή από τον οδηγό και τους επιβάτες.

3. Συμπεράσματα

Η τελευταία εξέλιξη πολυκαναλικού feedforward RNC συνοψίζεται στο παρόν έγγραφο για την αντιμετώπιση ενός κτυπογενή συντονισμού πολύ χαμηλής συχνότητας (<100 Hz). Αποδείχθηκε ότι η πολλαπλή συνοχή είναι μόνο ένας δείκτης για τον προσδιορισμό των μηχανικών εισόδων του θορύβου κύλισης, η οποία στην πραγματικότητα συσχετίζεται με άλλες μεθόδους ανάλυσης NVH που χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Διαπιστώθηκε επίσης σημαντικό ότι απορρίπτοντας μία θέση που αντιστοιχεί σε μία από τις κύριες οδικές τύπανο συνεισφέρων μπορεί να υποβαθμίσει την RNC απόδοση όπως ο ελεγκτής πρέπει να τηρούν όλους τους κύριους συντελεστές των συστατικών οδικού θορύβου για την επίτευξη σταθερή απόδοση σε διάφορα οδοστρώματος.

4. Αναφορές

[1] Stothers I.M., David C.Q. and Saunders T.J. «Computationally Efficient LMS based Hybrid Algorithm applied to the Cancellation of Road Noise» In Internoise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, pages 727-734, Institute of Noise Control Engineering, 1995.

[2] Park C.G., Fuller C.R., Kidner M.R.F. «Evaluation and Demonstration of Advanced Active Noise Control in a Passenger Automobile» In International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Active 2002, 2002.

[3] Heatwole C.M., Dian X. and Bernhard R.J. «Determination of the Number of Input Transducers required for Active Control of Road Noise inside Automobiles» In Internoise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings, volume (1), pages 207-211, Institute of Noise Control Engineering, 1993.

[4] Otte, D., P. Van de Ponsele, and J. Leuridan. «Operational deflection shapes in multisource environments» Proc. 8th Int. Modal Analysis Conf., Kissimmee, FL, USA, Jan., 1990.[5] M.A. Συγγραφέας *Τίτλος βιβλίου σε πλάγια* Εκδοτικός οίκος και πόλη, σελίδες εάν αναφέρονται (Έτος).

[6] Zafeiropoulos, N., Ballatore, M., Moorhouse, A. and Mackay, A. «Active control of structure-borne road noise based on the separation of front

and rear structural road noise related dynamics» SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 8(3), pp.886-891, 2015.

Συνεδρία Β8: Υπολογιστική ακουστική

Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων Μέσου Ωτός: Προσομοίωση αντικατάστασης της οσταριακής αλυσίδας από τεχνητή πρόθεση

Νικόλαος Έλληνας, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ/ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, ngreek54@gmail.com

Παναγιώτης Κατρακάζας, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ/ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, pan.katrakazas@gmail.com

Νικόλαος Τάχος, Μηχανολόγος Μηχανικός/Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Παν. Ιωαννίνων, ntachos@gmail.com

Αντώνης Σακελλάριος, Βιολόγος/Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Παν. Ιωαννίνων, ansakel13@gmail.com

Δημήτρης Φωτιάδης, Καθηγητής/Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Παν. Ιωαννίνων, dimitris.fotiadis30@gmail.com

Δημήτρης Κουτσούρης, Καθηγητής/ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, dkoutsou@biomed.ntua.gr
Αθανάσιος Μπίμπας, Αν. Καθηγητής ΩΡΛ/Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ, thanosbibas67@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε περιπτώσεις βαρηκοΐας όπου η οσταριακή αλυσίδα δεν είναι ακέραια, κρίνεται απαραίτητη η αντικατάσταση τμήματος αυτής ή ολόκληρης με κάποια τεχνητή πρόθεση. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων πάνω σε ένα απλουστευμένο τρισδιάστατο μοντέλο του ανθρώπινου μέσου ωτός στο οποίο η οσταριακή αλυσίδα έχει αντικατασταθεί από τεχνητή πρόθεση. Το μοντέλο περιβάλλεται από την κοιλότητα του μέσου ωτός. Ως αποτέλεσμα λαμβάνεται η απόκριση συχνότητας της μετατόπισης της βάσης του αναβολέα, που αποτελεί και την έξοδο του συστήματος και κυρίως στις συχνότητες που μελετώνται στο ακοόγραμμα.

Finite Element Model of the Middle Ear: Simulation of ossicular chain replacement by artificial prosthesis

ABSTRACT

In cases of poor hearing where the ossicular chain is not intact, it is considered necessary to replace a part or the whole chain by an artificial prosthesis. In this study we perform Finite Element analysis in a simplified 3D human middle ear model in which the ossicular chain is replaced by a prosthesis. The model is surrounded by the middle ear cavity. As a result we obtain the frequency response of

the displacement of the stapes footplate, which is the output of the system and specifically the frequencies which are studied in the audiogram.

1. Εισαγωγή

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η κατασκευή ενός μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων το οποίο θα περιλαμβάνει την κοιλότητα του μέσου ωτός και στο οποίο θα έχει αντικατασταθεί η οσταριακή αλυσίδα από τεχνητή πρόθεση. Τα τρισδιάστατα μοντέλα μέσου ωτός τα οποία περιέχουν την κοιλότητα είναι περιορισμένα. Τα πιο σημαντικά είναι δύο με απλουστευμένη γεωμετρία [1], [2] και ένα με πιο λεπτομερή [3].

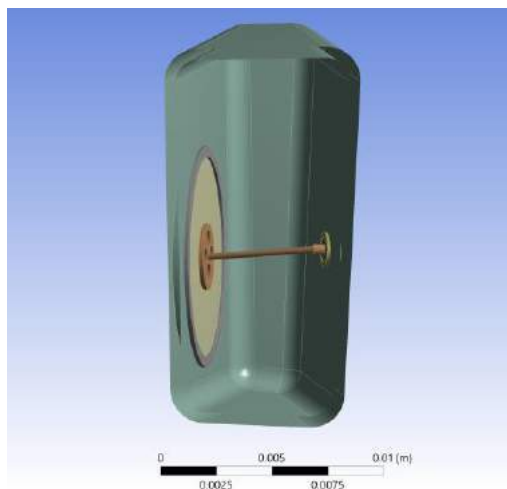
Με την αντικατάσταση της οσταριακής αλυσίδας από τεχνητή πρόθεση υπάρχουν διάφορες πρόσφατες μελέτες. Εκτός από τις κλινικές μελέτες που αφορούν τη συμπεριφορά των ασθενών μετεγχειρητικά [4], υπάρχουν και έρευνες με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Αφορούν τη μερική αντικατάσταση της οσταριακής αλυσίδας [5], αλλά και την ολική της αντικατάσταση. Από αυτές, η πρώτη μελέτη ασχολείται μόνο με τη θέση της τεχνητής πρόθεσης [6], ενώ η δεύτερη με την τοποθέτηση χόνδρου ανάμεσα στην τυμπανική μεμβράνη και την πρόθεση [7].

Βασισμένοι πάνω στις παλαιότερες δημοσιευμένες έρευνες, παρουσιάζουμε αναλύσεις πάνω σε διαφορετικές τεχνικές τυμπανοπλαστικής βασισμένες στην ολική αντικατάσταση της οσταριακής αλυσίδας (Total Ossicular Replacement).

2. Γεωμετρία μοντέλου

Η γεωμετρία του μοντέλου που κατασκευάστηκε απεικονίζει μία απλοποιημένη δομή του ανθρώπινου μέσου ωτός, στην οποία η σύζευξη τυμπανικής μεμβράνης και βάσης του αναβολέα γίνεται μέσω μίας τεχνητής πρόθεσης τύπου TORP (Total Ossicular Replacement Prosthesis). Οι διαστάσεις του μοντέλου, οι ιδιότητες των υλικών των ανατομικών στοιχείων, καθώς και η γωνία μεταξύ τυμπανικής μεμβράνης και βάσης του αναβολέα βασίζονται σε προηγούμενη δημοσίευση [8].

Όσον αφορά την κατασκευή της γεωμετρίας, αρχικά σχεδιάστηκε η κοιλότητα



Σχήμα 2.1 Γεωμετρία του μοντέλου

του μέσου ωτός και προστέθηκε στην ακριβή γεωμετρία του αρχικού μοντέλου. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση της τυμπανικής μεμβράνης, της βάσης του αναβολέα και των αντίστοιχων δακτυλοειδών συνδέσμων τους με απλοποιημένες γεωμετρίες, με διαστάσεις κοντά στις πραγματικές. Συγκεκριμένα, η τυμπανική μεμβράνη και ο δακτυλοειδής της σύνδεσμος αντικαταστάθηκαν από κύλινδρο και κυλινδρικό δακτύλιο αντίστοιχα, ενώ ο αναβολέας και ο σύνδεσμός του από ελλειπτικό δίσκο και ελλειπτικό δακτύλιο. Επίσης, η οσταριακή αλυσίδα αντικαταστάθηκε με τεχνητή πρόθεση τύπου TORP. Οι διαστάσεις όλων των επιμέρους στοιχείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Διαστάσεις στοιχείων μοντέλου

Γεωμετρικό Στοιχείο	Διάμετρος (mm) (Μεγάλη-Μικρή)	Πάχος (mm)
Τυμπανική Μεμβράνη (TM)	9.67	0.13
Βάση αναβολέα (BA)	2.46 – 1.13	0.18
	Μήκος (mm)	-
Δακτυλοειδής Σύνδεσμος TM	0.48	0.42
Δακτυλοειδής Σύνδεσμος BA	0.21	0.23

Η τεχνητή πρόθεση που χρησιμοποιήθηκε εφάπτεται στην τυμπανική μεμβράνη με ένα κύλινδρο διαμέτρου 3mm και πάχους 0.2mm. Επίσης, εφάπτεται στη βάση του αναβολέα με κύλινδρο διαμέτρου 0.5mm και πάχους 0.5mm. Οι δύο κύλινδροι ενώνονται με άξονα διαμέτρου 0.3mm.

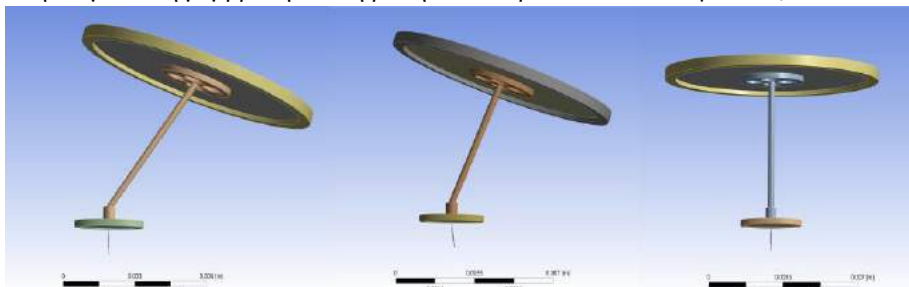
Μία τομή της γεωμετρίας του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

3. Μεθοδολογία

Στις προσομοιώσεις ορίστηκε ως οριακή συνθήκη εισόδου, σταθερή πίεση στην εξωτερική επιφάνεια της τυμπανικής μεμβράνης ή των διάφορων δομών με τις οποίες αντικαταστάθηκε και ίση με 90dB SPL (Sound Pressure Level) ακουστικής πίεσης. Το κοχλιακό υγρό προσομοιώθηκε με ένα στοιχείο Kelvin-Voight, τοποθετημένο στην εξωτερική επιφάνεια της βάσης του αναβολέα και με συντελεστή απόσβεσης $5.4 \cdot 10^{-2}$ N·s/m [9]. Ακόμη, ως έξοδος των προσομοιώσεων προτιμήθηκε η απόκριση συχνότητας της μετατόπισης της βάσης του αναβολέα, η οποία αποτελεί και την έξοδο του συστήματος. Το διάστημα συχνοτήτων στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις είναι από 100 – 8100 Hz -ώστε να ληφθούν οι κρίσιμες τιμές των 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hz- οι οποίες παρατηρούνται στο ακούγραμμα. Σημειώνεται ότι η κοιλότητα του μέσου ωτός αποκρύπτεται από τα παρακάτω σχήματα, για να αναδειχθεί η εσωτερική γεωμετρία.

3.1 Τοποθέτηση πρόθεσης υπό διαφορετικές γωνίες

Η τεχνητή πρόθεση μπορεί να τοποθετηθεί υπό διαφορετικές γωνίες ανάμεσα στην τυμπανική μεμβράνη και τη βάση του αναβολέα. Για το λόγο αυτό,



Σχήμα 3.1 Γωνίες 45°, 60°, 90° τοποθέτησης πρόθεσης

πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε τρεις διαφορετικές γωνίες τοποθέτησης: κάθετη τοποθέτηση, γωνία 60° και γωνία 45°. Οι 3 αυτές διαφορετικές διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

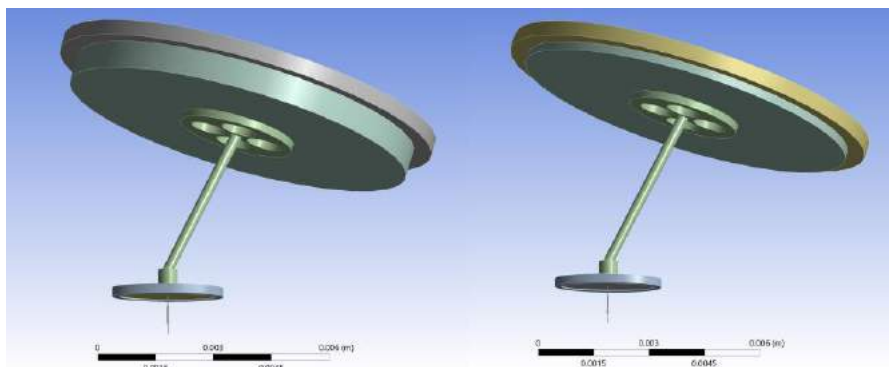
3.2 Αντικατάσταση τυμπανικής μεμβράνης από χόνδρο διαφορετικού πάχους

Σε αρκετές περιπτώσεις στην τυμπανοπλαστική, η τυμπανική μεμβράνη αντικαθίσταται με χόνδρο, ο οποίος έχει μεγαλύτερο πάχος και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

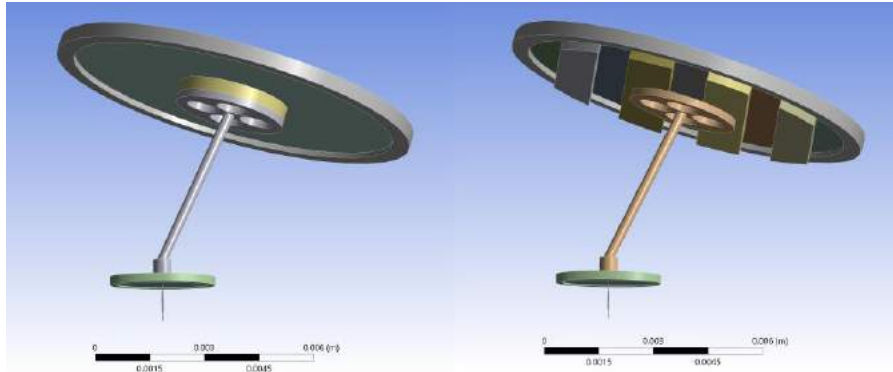
Πίνακας 3.1 Ιδιότητες χόνδρου

Γεωμετρικό Στοιχείο	Πυκνότητα (g/cm ³)	Σταθερά Young (Pa)
Χόνδρος	1.3	2.8·10 ⁶

Το πάχος του είναι συνήθως 1 mm, αλλά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα με χόνδρο μικρότερου πάχους [7]. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και με χόνδρο 0.5 mm και έγινε η σύγκριση τους με την απόκριση της τυμπανικής μεμβράνης. Οι αντίστοιχες γεωμετρίες των προσομοιώσεων φαίνονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Αντικατάσταση με χόνδρο πάχους 1 mm και 0.5 mm

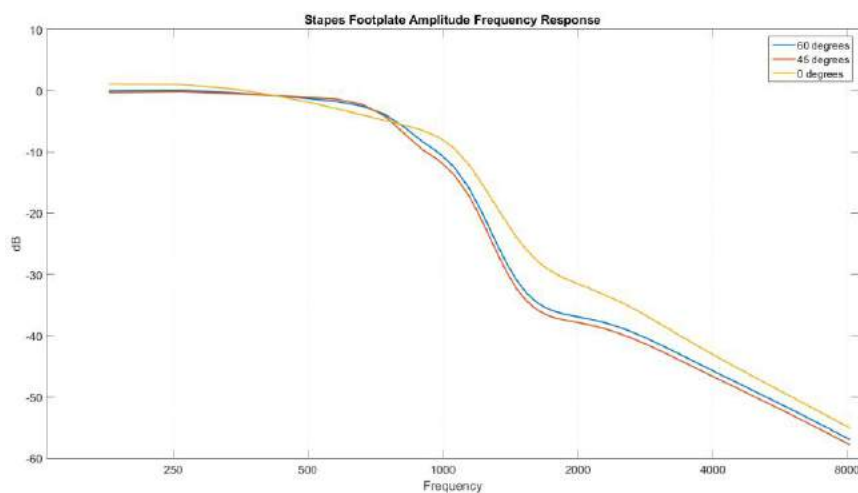


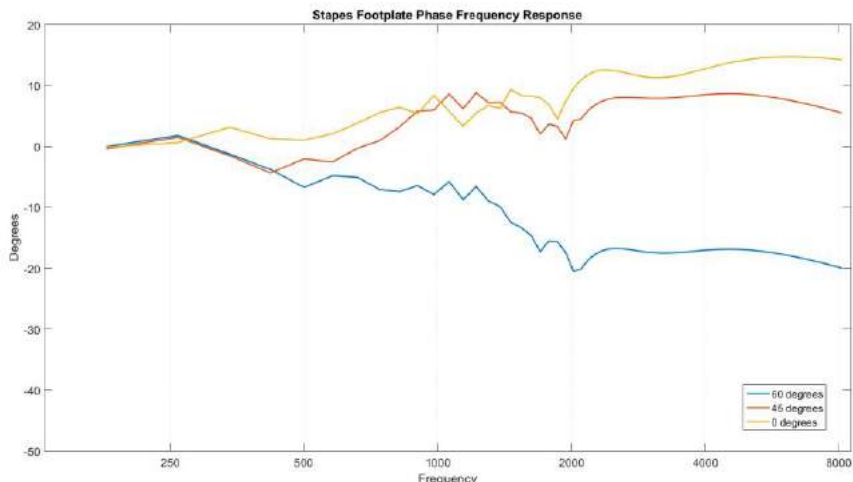
Σχήμα 3.3 Τεχνικές μικρού τμήματος χόνδρου και «δίκην πασσάλων»

3.3 Διαφορετικές τεχνικές τοποθέτησης χόνδρου

Ο χόνδρος που αντικαθιστά την τυμπανική μεμβράνη μπορεί να τοποθετηθεί με διάφορες τεχνικές. Πρώτον, μπορεί να αντικαταστήσει ολόκληρη την επιφάνεια της μεμβράνης, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.2. Δεύτερον, είναι δυνατή η αντικατάσταση μόνο του τμήματος της μεμβράνης που εφάπτεται με την κεφαλή της τεχνητής πρόθεσης. Σε αυτή την περίπτωση ο χόνδρος έχει διάμετρο ίση με τη διάμετρο της κεφαλής. Η τρίτη τεχνική ονομάζεται «δίκην πασσάλων» (palisade technique), κατά την οποία αφαιρούνται λωρίδες τυμπανικής μεμβράνης και αντικαθίστανται από λωρίδες χόνδρου ίδιου μεγέθους, με το προεξέχον τμήμα τους να είναι προς το εσωτερικό της κοιλότητας του μέσου ωτός. Οι δύο τελευταίες διατάξεις φαίνονται στο Σχήμα 3.3.

4. Αποτελέσματα



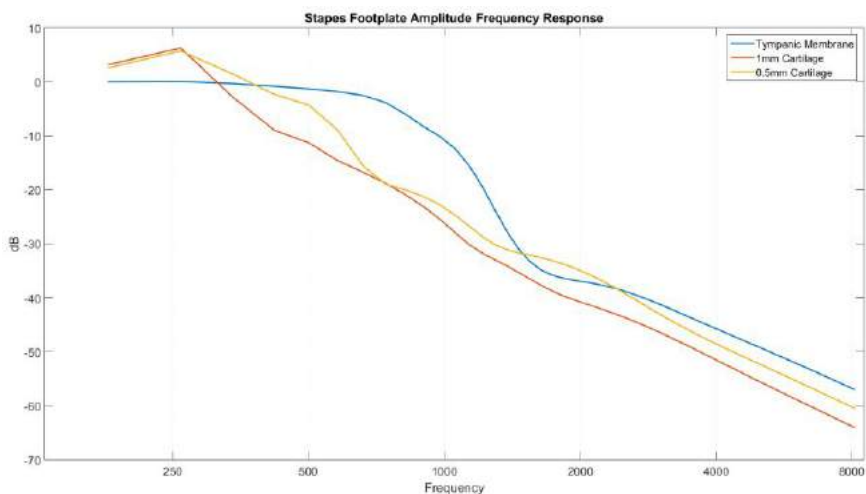


Σχήμα 4.1 Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα σε γωνίες 45°, 60°, 90°

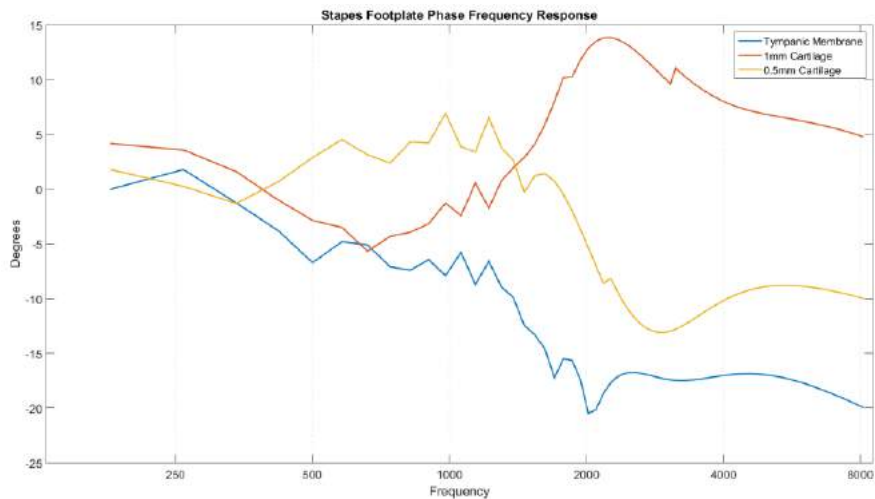
Σχήμα 4.2 Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα σε γωνίες 45°, 60°, 90°

5. Συμπεράσματα

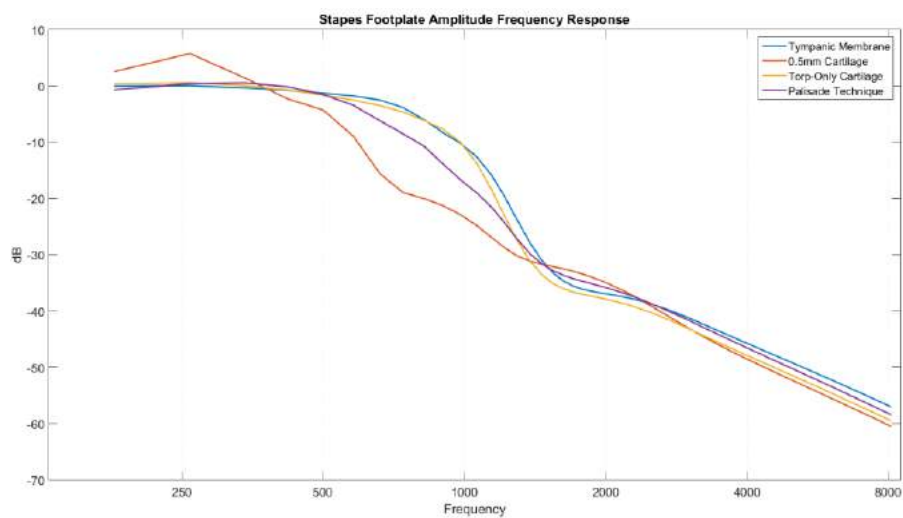
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι οι διαφορές στην απόκριση συχνότητας πλάτους και φάσης ανάλογα με τη γωνία τοποθέτησης της πρόθεσης, παρατηρούνται στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων και συγκεκριμένα στην περιοχή του 1 kHz. Όσον αφορά το πάχος του χόνδρου αντικατάστασης της τυμπανικής μεμβράνης, τα 0.5 mm παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις από τα αποτελέσματα της αρχικής απόκρισης, επιβεβαιώνοντας τις αρχικές υποθέσεις. Τέλος, η σύγκριση μεταξύ των τεχνικών τυμπανοπλαστικής δείχνει ότι όλες προσεγγίζουν ικανοποιητικά την αρχική απόκριση συχνοτήτων, με την περίπτωση χόνδρου ίσης διαμέτρου με την πρόθεση να είναι η βέλτιστη, μετά η τεχνική «δίκην πασσάλων» και τέλος η ολική αντικατάσταση της τυμπανικής μεμβράνης με χόνδρο.



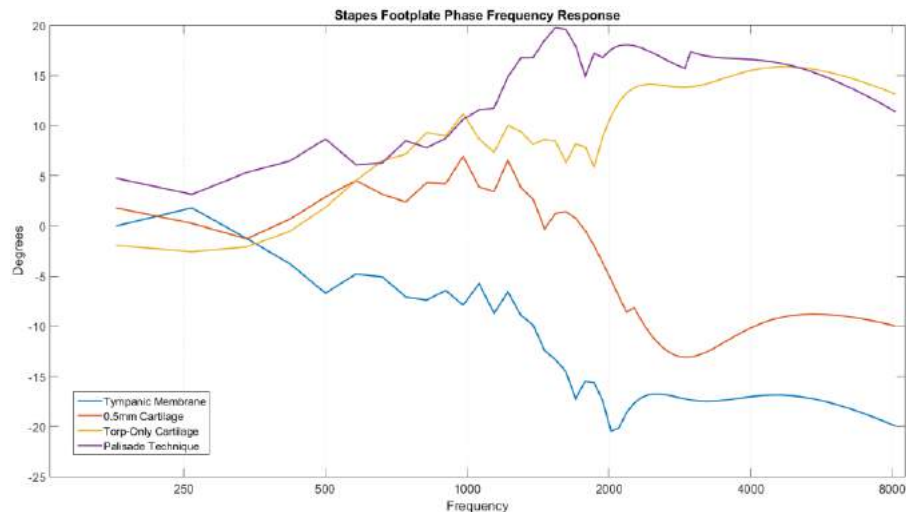
Σχήμα 4.3 Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα για χόνδρο διαφορετικού πάχους



Σχήμα 4.4 Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα για χόνδρο διαφορετικού πάχους



Σχήμα 4.5 Απόκριση πλάτους βάσης αναβολέα για διαφορετικές τεχνικές τυμπανοπλαστικής



Σχήμα 4.6 Απόκριση φάσης βάσης αναβολέα για διαφορετικές τεχνικές τυμπανοπλαστικής

6. Αναφορές

- [1] T. Koike, H. Wada, T. Kobayashi, «Modelling of the human middle ear using the finite-element method» *J. Acoust. Soc. Am.* **111**(3), pp 1306-17 (2002)
- [2] S. Ihrle, M. Lauxmann, A. Eiber, P. Eberhard, «Nonlinear modeling of the middle ear as an elastic multibody system – applying model order reduction to acousto-structural coupled systems» *ACOMEN* **246**, pp 18-26 (2013)
- [3] X. Zhang, X. Guan, D. Nakmali, V. Palan, M. Pineda, R.Z. Gan, «Experimental and modeling study of human tympanic membrane motion in the presence of middle ear liquid» *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* **15**(6), pp 867-881 (2014)
- [4] A.O. Gostian, D. Pazen, J.C. Luers, K.B. Huttenbrink, D. Beutner «Titanium ball joint total ossicular replacement prosthesis – Experimental evaluation and midterm clinical results» *MEMRO* **301**, pp 100-104 (2013)
- [5] P. Ferris, P.J. Prendergast «Middle-ear dynamic before and after ossicular replacement» *Journal of Biomechanics* **33**(5), pp 581-590 (2000)
- [6] W. Yao, B. Li, X. Huang, C. Guo, X. Luo, W. Zhou, M. Duan «Restoring hearing using total ossicular replacement prostheses-analysis of 3D finite element model» *Acta Otolaryngol* **132**(2), pp 152-159 (2012)
- [7] F. Gentil, M. Marques, M. Parente, P. Martins, C. Santos, R.N. Jorge «Total ossicular replacement prosthesis of the middle ear: A biomechanical analysis» *J. Mech. Med. Biol.* **15**(2), 1540006 (2015)
- [8] I. Spiridon, A. Sakellarios, G. Rigas, A. Tagaris, C. Bellos, A. Bibas, F. Böhnke, D. Iliopoulou, D. Koutsouris, D. Fotiadis «Effect of Modelling Parameters on the Frequency Response of the Middle Ear by Means of Finite Element Analysis» *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* **2015**, pp 925-928 (2015)
- [9] N. Tachos, A. Sakellarios, G. Rigas, A. Bibas, F. Böhnke, D. Fotiadis «The influence of ossicular ligaments in middle ear transfer function: Insights into normal Physiology and Pathology»

Υπολογιστικό μοντέλο διάδοσης ήχου σε μονωμένο σωλήνα και πειραματική επαλήθευση

Γεώργιος Μπαμπάνης
Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ
M.Sc. Computational Mechanics
+30 6972440828
Ηρ. Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
gbabanis@yahoo.gr

Χριστόφορος Προβατίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Πολυτεχνείου
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ
+30 6979846846
Ηρ. Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου
cprovat@central.ntua.gr

Keywords: Υπολογιστική προσομοίωση πορώδους, Υπολογιστική Ακουστική, Ηχοαπορρόφηση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η ακουστική ανάλυση ενός πορώδους μέσου, που είναι η αφρώδης μελαμίνη, η οποία χρησιμοποιείται ως υλικό ηχοαπορρόφησης και μείωσης της αντήχησης σε κλειστούς χώρους. Αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο τρισδιάστατου ορθογώνιου αγωγού επενδυμένο στις δύο πλευρές του με αφρό μελαμίνης και μελετήθηκε η απώλεια ενός εκπεμπόμενου ήχου διαμέσου του αγωγού κατά την έξοδο από αυτόν, πριν και μετά την τοποθέτηση της μελαμίνης. Στη συνέχεια, για την ορθή κρίση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε πείραμα σε ορθογώνιο αγωγό ίδιων διαστάσεων μετρώντας την αφρώδης μελαμίνη της πιστοποιημένης εταιρίας BASF και ακολούθησε σύγκριση μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Πραγματοποιείται σχολιασμός της πειραματικής διαδικασίας και των παραδοχών που λαμβάνονται στην υπολογιστική ανάλυση, ενώ παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής και υπολογιστικής ανάλυσης.

Computational model of sound transmission in lined duct and experimental verification

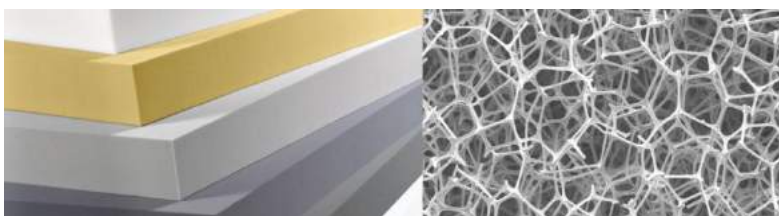
ABSTRACT

The topic of this paper is the acoustic analysis of a porous medium, which is foamed melamine and is being used as a sound absorption material and reduction of reverberation in closed spaces. A computational model of a 3D rectangular duct coated with melamine foam on both sides has been developed and the loss of the transmitted sound along the tube, before and after the placement of melamine has been studied. For more accurate results an experiment has been carried out on a rectangular duct of the same dimensions in order to measure the melamine foam of the certified company BASF followed by a comparison between computational and

experimental results. The experimental procedure and the assumptions made in computational analysis are being commented, while results of experimental and computational analysis are presented and compared.

1. Εισαγωγή

Το προϊόν Basotekt είναι ένα εύκαμπτο αφρώδες υλικό ανοιχτών πόρων φτιαγμένο από ρητίνη μελαμίνης και το ειδικό χαρακτηριστικό της είναι η τρισδιάστατη δομή της αποτελούμενη από δίκτυο πολύ λεπτών και εύκαμπτων ινών. Η ηχοαπορρόφηση είναι η κύρια ιδιότητά του ενώ πλεονεκτεί ως υλικό διότι είναι ελαφρύ, θερμομονωτικό, μη εύφλεκτο, εύκαμπτο και μη επιβλαβές για τον άνθρωπο. Η ανοιχτών πόρων επιφάνειά του επιτρέπει στα προσπίπτων ηχητικά κύματα να διεισδύουν εύκολα στο πορώδες μέσο μειώνοντας αποτελεσματικά την ηχητική ενέργεια αυτών. Η εφαρμογή του είναι απλή και κατάλληλη για εσωτερικούς χώρους όπως recording/control rooms, εργασιακούς χώρους, call centers, εργοστάσια και άλλα. Συνήθως εγκαθίσταται σε τοίχους, οροφές υπό την μορφή πλάκας ή κυλινδρικού τεμαχίου κρεμάμενου από την οροφή, μπορεί να εφαρμοστεί πίσω από διάτρητες σανίδες/υφάσματα ή και σε «γυμνή» εφαρμογή. Χρησιμοποιείται ως υλικό ηχοαπορρόφησης σε κατασκευές όπως ηχομονωτικοί κλωβοί, ηχοπαγίδες, σιγαστήρες, και ως επενδυτής εσωτερικών επιφανειών σε μέσα μαζικής μεταφοράς (τρένα, αυτοκίνητα, αεροπλάνα κ.α.). Η επιλογή του συγκεκριμένου υλικού προς μελέτη έγινε λόγω ευκολίας εύρεσής του στην αγορά καθώς και ότι οι παράμετροι του πορώδους μέσου που χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση έχουν υπολογιστεί ήδη πειραματικά σε δημοσίευση σχετικής βιβλιογραφίας. Απώτερος στόχος της εργασίας αυτής είναι να ελεγχθεί η ρεαλιστικότητα των μαθηματικών μοντέλων του πορώδους του λογισμικού ANSYS σε ακουστικές εφαρμογές, καθώς και ο σωστός προγραμματισμός τους.

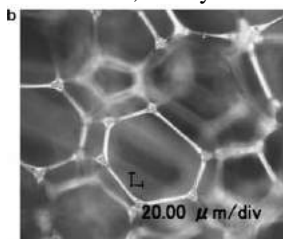


Σχήμα 10.1: Πλάκες αφρώδους μελαμίνης και η δομή τους

2. Περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου και των ιδιοτήτων του πορώδους

Η ακουστική ανάλυση της αφρώδους μελαμίνης πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας το υλικό σε έναν ορθογώνιο αγωγό τριών μέτρων μετατρέποντάς τον σε ηχοπαγίδα. Το υπολογιστικό-πειραματικό μοντέλο αφορά έναν ορθογώνιο αγωγό τριών μέτρων όπου στο μέσον του τοποθετήθηκαν παράλληλα στη ροή δύο φύλλα Μελαμίνης τα οποία δεν μείωναν κατά την τοποθέτησή τους την διάμετρο του αγωγού. Στην είσοδο του αγωγού τοποθετείται πηγή που εκπέμπει ροζ θόρυβο και στην έξοδο του τοποθετείται δυναμικό μικρόφωνο που μετρά την πτώση της

έντασης. Τα τοιχώματα του αγωγού είναι πλήρως ανακλαστικά και άκαμπτα. Επίσης η γεωμετρία και η διάταξη του μοντέλου προσεγγίζει αρκετά τις ηχοπαγίδες αγωγών εξαερισμού που χρησιμοποιούνται σε χώρους βιομηχανίας και γενικότερα εγκαταστάσεων. Οι διαστάσεις του αγωγού επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι πρακτικές κατά την μετέπειτα πειραματική διάταξη. Οι ιδιότητες της αφρώδους μελαμίνης που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα, λήφθηκαν από δημοσίευση των Naoki Kino, Takayasu Ueno [17, Table 2] και είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 2.1: Ψηφιακή φωτογραφία πόρων μελαμίνης

- Πορώδες φ (porosity)
- Ελίκωση α_{∞} (tortuosity)
- Αντίσταση ροής σ (resistivity)
- Χαρακτηριστικά μήκη Λ, Λ' (Viscous/ Thermal characteristic lengths)

Μετρήθηκαν τρία δείγματα μελαμίνης διαφορετικού πάχους από διαφορετικά σημεία του πάνελ όπως παρουσιάζεται παρακάτω και στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση μελαμίνη που έχει τις μέσες ιδιότητες αυτών [14] :

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες τριών δειγμάτων αφρώδους μελαμίνης

Absorbent			Melamine	Melamine	Melamine
			31	32	33
Density of porous media	ρ	kg/m^3	8,6	10,3	13,27
Thickness		mm	32	25,5	10,5
Flow resistivity	σ	$Pa s/m^2$	10500	13100	17500
Material porosity	φ		0,995	0,993	0,992
Material tortuosity	α_{∞}		1,0059	1,00553	1,0055
Viscous characteristic length	Λ	μm	240	199	161
Thermal characteristic length	Λ'	μm	470	445	375

Έγιναν δύο μοντέλα προσομοιώσεων, αρχικά αναλύεται η απώλεια μετάδοσης (**Transmission Loss**) του παραγόμενου ήχου από την είσοδο έως την έξοδο του χωρίς την επένδυση της μελαμίνης και αντίστοιχα η απώλεια μετάδοσης με την επένδυση. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απώλεια έντασης πριν και μετά την εφαρμογή του ηχοαπορροφητικού υλικού (**Insertion Loss**). Άλλη ανάλυση η οποία δεν εντάσσεται στην παρούσα εργασία αφορά τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές του ορθογώνιου αγωγού, προκειμένου να γίνει γνωστή η ακουστική απόκρισή του, οι θέσεις μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης της πίεσης. Η προσομοίωση έγινε στο λογισμικό ANSYS. Η μοντελοποίηση αφορά τρισδιάστατη ηχοαπορροφητική επένδυση (Bulk reacting liner), όπου τα διαδιδόμενα κύματα προσπίπτουν προς όλες τις κατευθύνσεις, κάνοντας εφικτή την διάδοση του ήχου παράλληλα στον οριζόντιο άξονα του αγωγού [23, p.322].

Το λογισμικό ANSYS (Release 16) για να προσομοιώσει ένα πορώδες υλικό, χρησιμοποιεί το μοντέλο των Johnson-Champoux-Allard, το οποίο μαθηματικά προσομοιώνει το πορώδες υλικό ως ένα ισοδύναμο ρευστό ενός διάτρητου υλικού άκαμπτης επιφάνειας [1-15]. Σύμφωνα με το manual των θεωρητικών περιεχομένων του Ansys [14, εξ.(8-84)] η κυματική εξίσωση που ορίζεται για ένα «διάτρητο υλικό» είναι:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho_{eff}} \nabla p_{\alpha} \right) + \frac{\omega^2}{\rho_{eff} c_{eff}^2} p_{\alpha} = 0 \quad (2.1)$$

όπου p_{α} είναι η ακουστική πίεση, ρ_{eff} η τελική πυκνότητα (effective), η τελική ταχύτητα c_{eff} και ω η συχνότητα. Είναι προφανές ότι οι όροι ‘effective’ που χρησιμοποιεί το ANSYS είναι οι ίδιοι με τους όρους που περιγράφουν την κατάσταση του ρευστού στους πόρους του πορώδους μέσου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Harmonic Analysis του ANSYS. Από αυτή την ανάλυση θα προκύψει ένα διάγραμμα πιέσεων ή έντασης συναρτήσει της συχνότητας

3. Συνοριακές συνθήκες

3.1 Πηγή ήχου

Η συνοριακή συνθήκη που ορίστηκε ως διέγερση της ακουστικής κοιλότητας του μοντέλου μας, αφορά πηγής μάζας αέρα η οποία εισήχθηκε στην ακουστική κυματική εξίσωση [12].

Η ακουστική κυματική εξίσωση προκύπτει από τις εξίσωσης ορμής (Navier-Stokes) και τις εξισώσεις συνέχειας οι οποίες έχουν απλοποιηθεί σύμφωνα με τις παρακάτω παραδοχές:

Το ρευστό θεωρείται συμπιεστό (η πυκνότητα αλλάζει λόγω της διακύμανσης της πίεσης) ενώ δεν υπάρχει ροή στο ρευστό. Η ακουστική κυματική εξίσωση είναι:

$$\nabla \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \right] = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) + \nabla \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) \right] \quad (3.1)$$

c = η ταχύτητα του ήχου ($\sqrt{K/\rho_0}$) στο ρευστό μέσο
 ρ_0 = μέση πυκνότητα του ρευστού
 K = μέτρο ελαστικότητας του ρευστού
 μ = δυναμική συνεκτικότητα
 p = ακουστική πίεση
 Q = πηγή μάζας (από την εξ. συνέχειας)
 t = χρόνος

3.2 Άκαμπτα τοιχώματα αγωγού

Τα άκαμπτα τοιχώματα του αγωγού αφορούν συνοριακή συνθήκη τύπου Neumann. Η διείσδυση του ρευστού στο στερεό είναι μηδενική, έτσι θα ισχύει $\hat{n} \cdot \nabla p = 0$ [13].

3.3 Ηχοαπορροφητική επένδυση με πάχος (Bulk Reacting Liner)

Η συνοριακή συνθήκη που αντιπροσωπεύει τη συγκεκριμένη μορφή στερεού σώματος είναι η συνθήκη Robin [13] και στην συγκεκριμένη περίπτωση επειδή η επιφάνεια του ηχοαπορροφητικού υλικού είναι άκαμπτη, η κάθετη ταχύτητα του ρευστού θα είναι $v_{n,s} = 0$. Η ασθενής διατύπωση του μοντέλου ισοδύναμου ρευστού Johnson-Champoux-Allard δίνεται:

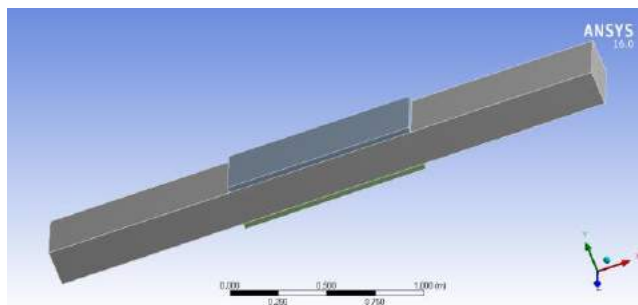
$$-\omega^2 \iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_{eff} c_{eff}^2} w p_a dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{1}{\rho_{eff}} \nabla p_a \right) dv - \iint_{\Gamma_F} w \frac{1}{\rho_{eff}} \nabla p_a \cdot d\vec{s} = 0 \quad (1.2)$$

Πίνακας 3.1: Μοντέλο ορθογώνιου αγωγού με ηχοαπορρόφηση

ΑΓΩΓΟΣ			
Length	L	3	m
Height	H	0,362	m
Width	D	0,193	m
ANSYS MASS SOURCE		1	$kg/s/m^2$
Termination absorption coefficient	α	1	–
Silencer			
Length	L_s	1	m
Thickness	l	0,03	m

4. Μοντελοποίηση - Αποτελέσματα

Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Είναι ένα ορθογώνιο αγωγός με μη συμμετρικές πλευρές, σχεδόν διπλάσια η μία από την άλλη και εκατέρωθεν των μεγάλων πλευρών και στο μέσο του αγωγού τοποθετούνται τα πάνελ της μελαμίνης χωρίς να μειώνεται η διατομή του αγωγού. Κατά τη δημιουργία του μοντέλου, η επιφάνεια της μελαμίνης και η ακουστική κοιλότητα του αγωγού ορίζονται ως ένα σώμα με κοινούς κόμβους στο σύνορο, ώστε να θεωρηθεί συνεχής η διάδοση των ακουστικών κυμάτων και στο σώμα της μελαμίνης. Το πεπερασμένο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το τετραγωνικό ακουστικό στοιχείο 20 κόμβων Fluid220. Πραγματοποιώντας ανάλυση ευαισθησίας, το κατάλληλο μήκος στοιχείου για το φάσμα συχνοτήτων $0 - 4000 \text{ Hz}$ είναι το $0,014m$.



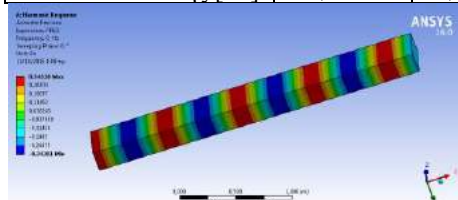
Σχήμα 4.1: Τρισδιάστατο μοντέλο επενδυμένου ορθογώνιου αγωγού

Παρακάτω αναλύεται η ακουστική κοιλότητα του ορθογώνιου αγωγού ως προς τις απώλειες έντασης (Insertion Loss) πριν και μετά την εφαρμογή του απορροφητικού υλικού αφού πρώτα υπολογιστούν οι εντάσεις στην είσοδο και στη έξοδο του αγωγού. Παρουσιάζονται ποιοτικά διαγράμματα πίεσης και έντασης για διαφορετικές συνοριακές συνθήκες στο πεδίο της συχνότητας. Η έξοδος του αγωγού μοντελοποιείται ως επιφάνεια πλήρους απορρόφησης με συντελεστή απορρόφησης $\alpha = 1$, ώστε να προσομοιώνεται η πλήρης μετάδοση του ήχου στο ελεύθερο πεδίο.

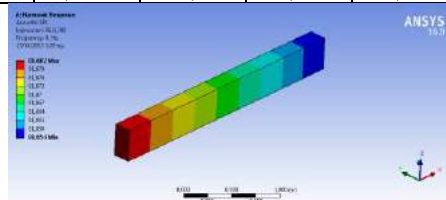
4.1 Εκπομπή επίπεδων κυμάτων χωρίς την επένδυση μελαμίνης

Πίνακας 4.1: Εκπομπή επίπεδων κυμάτων σε μη επενδυμένο αγωγό

Plane wave	Δεδομένα-αποτελέσματα					
Συχνότητα	125	250	500	1000	2000	4000
Μήκος στοιχείου [m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,025	0,014
Πλάτος πίεσης [Pa]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ένταση πηγής [db]	75,66	75,66	75,66	75,65	75,66	75,66
Ένταση εξόδου [db]	75,65	75,65	75,63	75,55	75,23	73,93
Απώλεια έντασης [db]	0,0026	0,007	0,0276	0,1	0,43	1,73



Σχήμα 4.2: Διάδοση επίπεδου κύματος για συχνότητα $f = 500 \text{ Hz}$

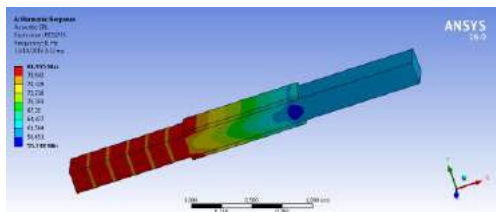


Σχήμα 4.3: Κατανομή της έντασης κατά μήκος του αγωγού για συχνότητα $f = 500 \text{ Hz}$

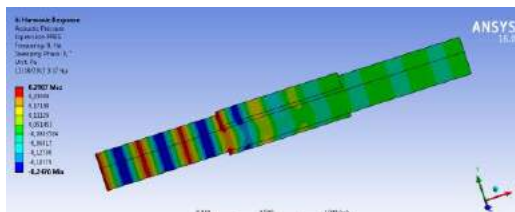
4.2 Εκπομπή επίπεδων κυμάτων με την επένδυση μελαμίνης

Πίνακας 4.2: Εκπομπή επίπεδων κυμάτων σε επενδυμένο αγωγό

Plane wave, Melamine 31	Δεδομένα-αποτελέσματα					
Συχνότητα	125	250	500	1000	2000	4000
Μήκος στοιχείου [m]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,025	0,014
Πλάτος πίεσης [Pa]	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ένταση πηγής [db]	80,77	83,81	79,67	78,89	80,57	82,07
Ένταση εξόδου [db]	80,78	81,07	74,23	59,038	60,22	76,29
Απώλεια έντασης [db]	-0,01	2,74	5,44	19,852	20,35	5,78



Σχήμα 4.4: Διάδοση επίπεδου κύματος για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$

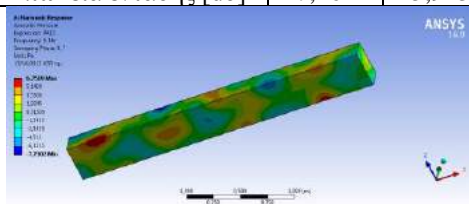


Σχήμα 4.5: Κατανομή της έντασης κατά μήκος του αγωγού για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$

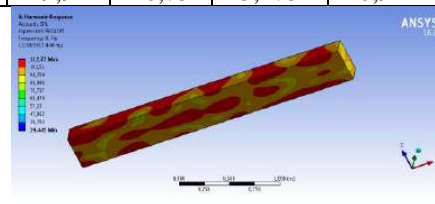
4.3 Εκπομπή σφαιρικών κυμάτων χωρίς την επένδυση μελαμίνης

Πίνακας 4.3: Εκπομπή σφαιρικών κυμάτων σε μη επενδυμένο αγωγό

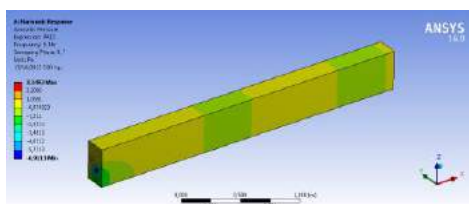
Spherical wave	Δεδομένα-αποτελέσματα					
	125	250	500	1000	2000	4000
Συχνότητα						
Μήκος στοιχείου [m]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,014
Πλάτος πίεσης [Pa]	15	15	15	15	15	15
Ένταση πηγής [db]	90,3714	90,9232	99,6	105,9	101,873	101,44
Ένταση εξόδου [db]	72,91	65	89,7	95,15	96,7	100,5
Απώλεια έντασης [db]	17,4614	25,9232	9,9	10,75	5,173	0,94



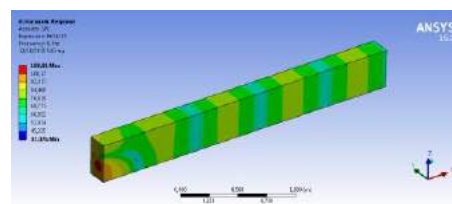
Σχήμα 4.6: Διάδοση σφαιρικού κύματος για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$



Σχήμα 4.7: Κατανομή της έντασης κατά μήκος του αγωγού για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$



Σχήμα 4.8: Διάδοση σφαιρικού κύματος για συχνότητα $f = 250 \text{ Hz}$



Σχήμα 4.9: Κατανομή της έντασης κατά μήκος του αγωγού για συχνότητα $f = 250 \text{ Hz}$

4.4 Εκπομπή σφαιρικών κυμάτων με την επένδυση μελαμίνης

Πίνακας 4.4: Εκπομπή σφαιρικών κυμάτων σε επενδυμένο αγωγό

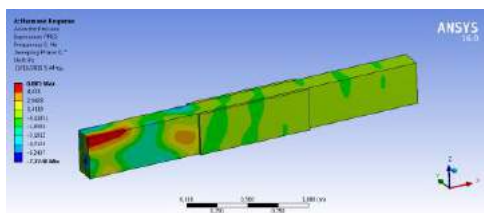
Spherical wave, Mean Melamine	Δεδομένα-αποτελέσματα
-------------------------------	-----------------------

Συχνότητα	125	250	500	1000	2000	4000
Μήκος στοιχείου [m]	0,02	0,02	0,02	0,14	0,02	0,014
Πλάτος πίεσης [Pa]	15	15	15	15	15	15
Ένταση πηγής [db]	90,33	90,6	95,9	101,82	104,67	102,43
Ένταση εξόδου [db]	71,45	75,62	80,91	72,2	75,32	91,29
Απόλεια έντασης [db]	18,88	14,98	14,99	29,62	29,35	11,14

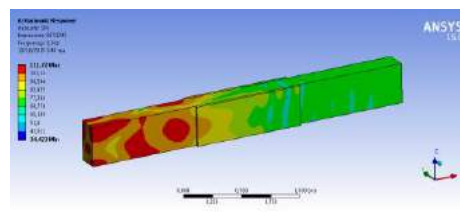
Mean melamine: ορίζεται η μέση μελαμίνη η οποία υπολογίστηκε βάση της μέσης τιμής των ιδιοτήτων της, και οι οποίες είναι:

Πίνακας 4.5: Ιδιότητες Mean melamine

Absorbent			Mean
Density of porous media	ρ	kg / m^3	8,6
Thickness		mm	32
Flow resistivity	σ	$Pa s / m^2$	13700
Material porosity	ϕ		0,993
Material tortuosity	α_{∞}		1,005643
Viscous characteristic length	Δ	μm	200
Thermal characteristic length	Δ'	μm	430



Σχήμα 4.10: Διάδοση σφαιρικού κύματος για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$



Σχήμα 4.11: Κατανομή της έντασης κατά μήκος του αγωγού για συχνότητα $f = 1000 \text{ Hz}$

5. Πειραματική διάταξη - Αποτελέσματα

Η σχεδίαση του υπολογιστικού μοντέλου έγινε βάσει του πειραματικού εξοπλισμού αλλά και της πρακτικής διάταξής του. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε απαρτίζεται από ένα ηχείο το οποίο παρήγαγε τα σφαιρικά κύματα, ένα δυναμικό μικρόφωνο για να λαμβάνει σημειακά την ένταση στην έξοδο, τον ορθογώνιο αγωγό μήκους 3 μέτρων και τα πάνελ της αφρώδους μελαμίνης. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις στον αγωγό, σύμφωνα με την παρακάτω διάταξη:

- 1) Τοποθέτηση μικροφώνου στην είσοδο του αγωγού.
- 2) Τοποθέτηση μικροφώνου στην έξοδο του αγωγού χωρίς την επένδυση μελαμίνης.
- 3) Τοποθέτηση μικροφώνου στην έξοδο του αγωγού με τον αγωγό επενδυμένο με την μελαμίνη.

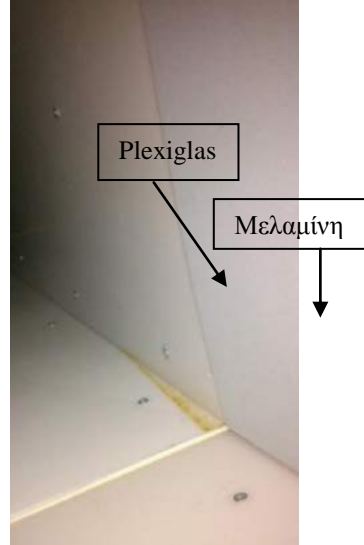
Παρακάτω επισυνάπτονται φωτογραφίες κατά την κατασκευή του αγωγού και την πειραματική διάταξη.



Σχήμα 0.3: Συνολικό μήκος του αγωγού εξωτερικά

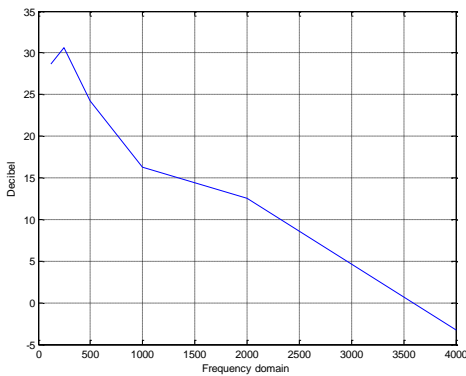


Σχήμα 0.4: Κομμάτι αγωγού σε τομή

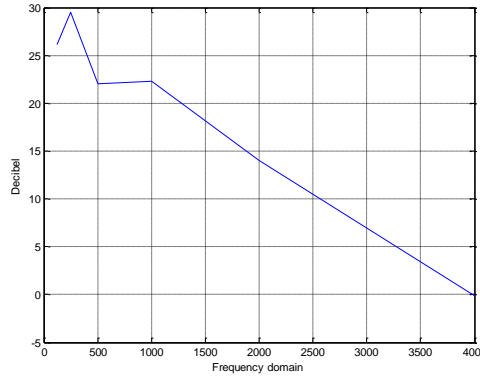


Σχήμα 0.5: Πάνελ μελαμίνης τοποθετημένο μέσα στον αγωγό

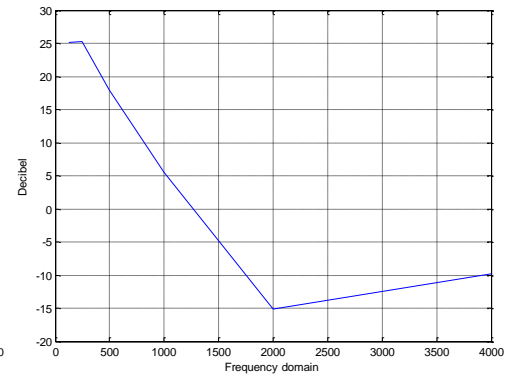
5.1 Αποτελέσματα των μετρήσεων του πειράματος



Σχήμα 5.6: Κανονικοποίηση ένταση στις συχνότητες ενδιαφέροντος



Σχήμα 5.7: Κανονικοποίηση ένταση στις συχνότητες ενδιαφέροντος



Σχήμα 5.8: Κανονικοποίηση ένταση στις συχνότητες ενδιαφέροντος

5.2 Αποτελέσματα στο ANSYS

Η ένταση της πηγής ήχου είναι διαφορετική ανά περίπτωση, αυτό δεν δημιουργεί κάποια αλλαγή στα αποτελέσματα καθώς το Insertion Loss αφορά την διαφορά έντασης αρχικής-τελικής κατάστασης και είναι και ανεξάρτητο από το επίπεδο έντασης. Γι' αυτό το λόγο γίνεται μία κανονικοποίηση των εντάσεων του

επενδυμένου αγωγού σύμφωνα με την ένταση της πηγής του αγωγού χωρίς την επένδυση

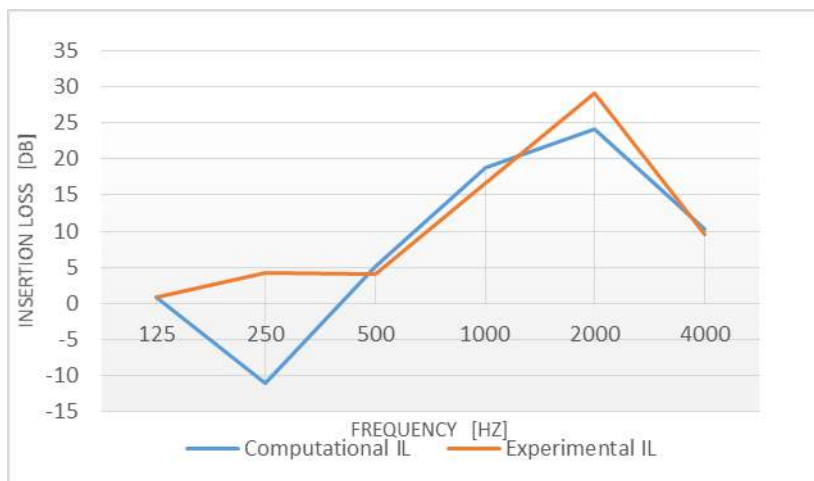
Πίνακας 0.3: Insertion loss μεταξύ των εξόδων αγωγού χωρίς επένδυση και αγωγού με επένδυση (κανονικοποιημένη στάθμη) μέσης μελαμίνης

TERMINATION OF DUCT [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
spherical wave, no lined [dB]	72,91	65	89,7	95,15	96,7	100,5
spherical wave, Mean melamine lined [dB]	71,45	75,62	80,91	72,2	75,32	91,29
Κανονικοποίηση ως προς την πηγή [dB]	71,99	76,02	84,61	76,28	72,62	90,3
IL [dB]	0,92	-11,02	5,09	18,87	24,08	10,2

5.3 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων
 Insertion loss του ορθογώνιου αγωγού για τις έξι τιμές συχνοτήτων

$$\begin{aligned}
 IL &= SPL_{no\ lined} - SPL_{lined} = 20 \log \left(\frac{\frac{Amplitude_{no\ lined}}{P_{ref}}}{\frac{Amplitude_{lined}}{P_{ref}}} \right) \\
 &= 20 \log \left(\frac{Amplitude_{no\ lined}}{Amplitude_{lined}} \right)
 \end{aligned}$$

TERMINATION OF DUCT	ΠΕΙΡΑΜΑ					
Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Experimental IL	0,90	4,21	4,06	16,74	29,18	9,65
Computational IL	0,92	-11,02	5,09	18,87	24,08	10,2
Divergence	0.02	-15	1.03	2.3	-5	0.5



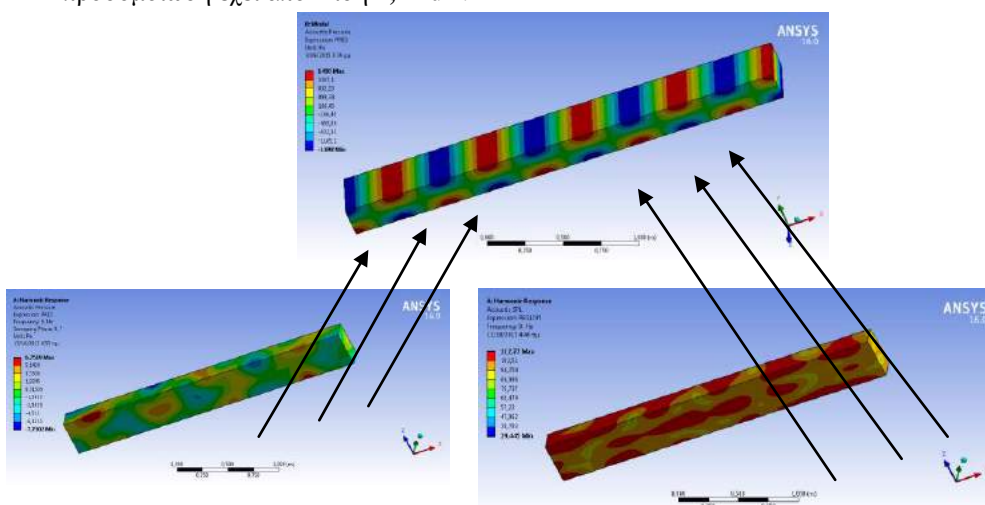
Σχήμα 0.9: Σύγκριση Insertion Loss μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών μετρήσεων της μέσης μελαμίνης

6. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών μετρήσεων της μέσης μελαμίνης είναι αρκετά θετικά εξαιρώντας τις εντάσεις των πολύ χαμηλών συχνοτήτων οι οποίες λόγω πειραματικής διάταξης ήταν αδύνατο να υπολογιστούν επ' ακριβώς. Αυτό δείχνει πως υπάρχει αξιοπιστία όσον αφορά την ρεαλιστικότητα των μαθηματικών μοντέλων του λογισμικού ANSYS και στον προγραμματισμό αυτών. Οι ιδιότητες των τριών δειγμάτων μελαμίνης που χρησιμοποιήθηκαν, είναι δοσμένες από τη βιβλιογραφία όπου και εκεί υπολογίστηκαν με πρωτυποποιημένη διαδικασία κατά ISO. Όσον αφορά το πειραματικό μέρος, είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί πως τα τοιχώματα του αγωγού αν και ήταν λεία εσωτερικά και ελαστικά «σκληρά» λόγω της ξύλινης επένδυσης, μερικά ποσά ενέργειας χανόντουσαν μέσω της ελαστικότητας των τοιχωμάτων ειδικά στις χαμηλές συχνότητες.

6.1 Η συχνότητα των 1000Hz

Στην συχνότητα των 1000Hz ο εκπεμπόμενος ήχος κατανέμεται στην ακουστική κοιλότητα σύμφωνα με την ιδιομορφή του παρακάτω σχήματος χωρίς όμως να την συντονίζει πλήρως. Χαρακτηριστικά φαίνεται η μεγιστοποίηση της πίεσης σε κάποιες κοινές θέσεις μεταξύ των στιγμιοτύπων της πίεσης και της αντίστοιχης ιδιομορφής. Το Insertion Loss ανάμεσα στο πείραμα και στη προσομοίωση έχει απόκλιση 2,12 dB.



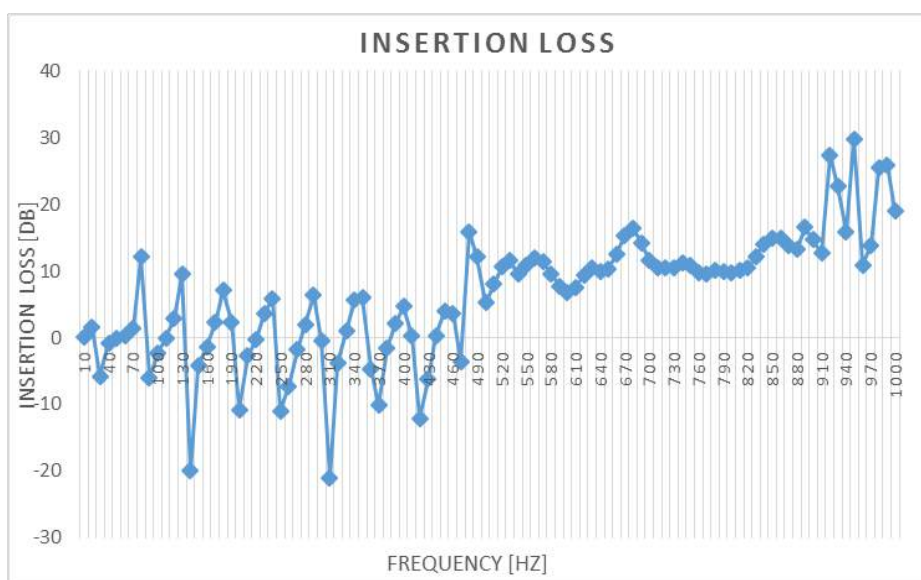
Σχήμα 6.1: Σύγκριση ιδιομορφής και ακουστικής απόκρισης της κοιλότητας κατά τη διάδοση κυμάτων

6.2 Η συχνότητα των 2000Hz

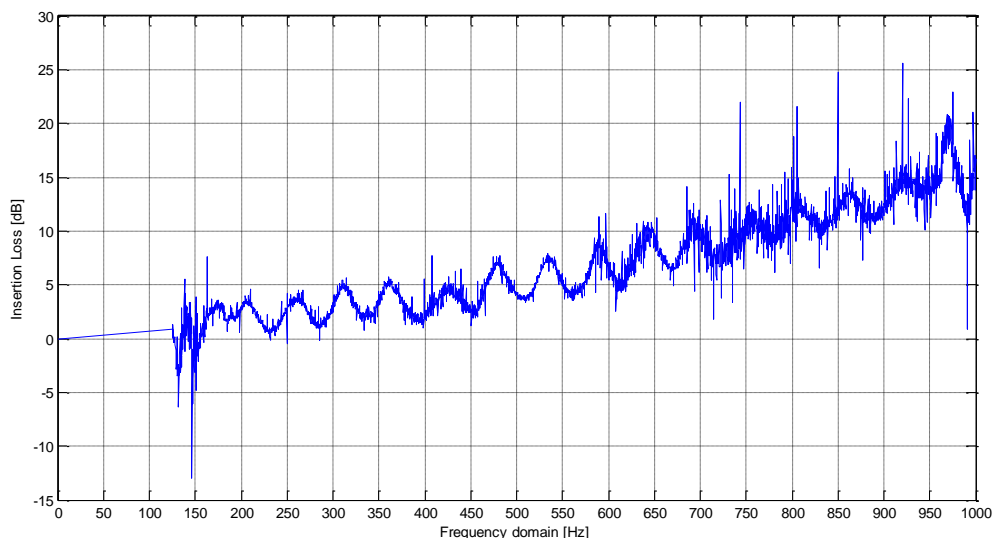
Η απόκλιση της πειραματικής από υπολογιστικής απώλειας (IL) βρέθηκε στα 5 dB. Η απόσβεση που βρέθηκε στο πείραμα ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με το υπολογιστικό μοντέλο. Η κατανομή της πίεσης στην κοιλότητα μοιάζει με αυτή στα 1000Hz οπότε η απόκλιση ίσως να περιέχεται στο πειραματικό μέρος.

6.3 Η συχνότητα των 250Hz

Στη συχνότητα των 250Hz παρατηρείται αρκετά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο Insertion loss. Για να αποφανθούμε για την απόκριση του αγωγού στην περιοχή των 250Hz, θα γίνει ανάλυση του πεδίου συχνοτήτων από 10-1000 Hz στο υπολογιστικό και στο πειραματικό μοντέλο, ώστε να δούμε ποια είναι η γενικότερη απόκριση του αγωγού εκατέρωθεν των 250Hz. Στο σχήμα 6.2 παρατηρείται η απόκριση του αγωγού η οποία θεωρείται πολύ φυσιολογική για τη διάδοση κυμάτων σε ένα κυματοδηγό, και έτσι με αυτό το διάγραμμα γίνεται αντιληπτό το peak έντασης που υφίσταται η κοιλότητα του αγωγού στα 250Hz ενώ σε διπλάνες συχνότητες ελαττώνεται η στάθμη. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι η σημαντική απόκλιση των υπολογιστικών και πειραματικών IL της συχνότητας 250Hz είναι μεμονωμένη περίπτωση. Το σχήμα 6.3 αναφέρεται στο πειραματικό Insertion Loss για το πεδίο συχνοτήτων 125-1000Hz. Παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες μεταξύ αυτού και του υπολογιστικού IL.



Σχήμα 6.2: Insertion Loss για το πεδίο συχνοτήτων 10-1000 Hz



Σχήμα 6.3: Insertion Loss μεταξύ των μετρήσεων 2 και 3 για το εύρος συχνοτήτων 125-1000 Hz

6.4 Μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η ακουστική ανάλυση ορθογώνιου κυματοδηγού, πορώδους υλικού αλλά και το σύστημα αυτών των δύο, αποτελεί βασικό στάδιο μιας επιστημονικής ακουστικής μελέτης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η πραγματοποίηση του πειράματος και η επικύρωση των αντίστοιχων υπολογιστικών αποτελεσμάτων, προσδιορίζει την αξιοπιστία της συγκεκριμένης μοντελοποίησης και του λογισμικού ανάλυσης τέτοιων φαινομένων συμπεριλαμβάνοντας παράλληλα και τα αντίστοιχα υπολογιστικά σφάλματα. Εφόσον, το συγκεκριμένο λογισμικό ανάλυσης (ANSYS) και η χρήση των κατάλληλων παραδοχών χαρακτηριστούν αξιόπιστα, τότε η παρούσα ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο ανάλυσης σχετικών ακουστικών φαινομένων. Επίσης, αναφερόμενοι στην παρούσα εργασία, θα ήταν ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθούν και συναφή μοντέλα πορώδους υλικού και να συσχετιστούν μεταξύ τους. Ενδιαφέρον αντικείμενο για μελλοντική έρευνα, είναι η ακουστική ανάλυση κοιλοτήτων κλειστών χώρων με εύκαμπτα τοιχώματα, είτε με πορώδες και διάτρητες επιφάνειες, η μελέτη αντήχησης μικρών και μεγάλων χώρων, η σύζευξη ρευστού (αέρα) και στερεού (FSI) και άλλα.

7. Αναφορές

- [1] Jean Allard and Nouredine Atalla. Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials. John Wiley and Sons, second edition, November 2009.
- [2] M. A. Biot, J. Acoust. Sot. Am. 28, 168 (1956).
- [3] R. J. S. Brown, Geophysics 45, 1269 (1980).

- [4] D. L. Johnson, T. J. Plona, C. Scala, F. Pasieb, and H. Kojima, *Phys. Rev. Lett.* 49, 1840 (1982).
- [5] D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, *J. Fluid Mech.* 176, 379 (1987)
- [6] X. Olny and R. Panneton. Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(2):814 - 824, 2008.
- [7] L. Jaouen and F.-X. Becot. Acoustical characterization of perforated facings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3):1400 - 1406, 2011.
- [8] L. Jaouen. Acoustical porous material recipes. Website. URL: <http://apmr.matelys.com/>.
- [9] R. Panneton and X. Olny. Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4):2027 - 2040, 2006.
- [10] L. Jaouen and F.-X. Becot. Acoustical characterization of perforated facings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(3):1400 - 1406, 2011
- [11] ANSYS, SAS IP, Inc. ANSYS 16 Help. ANSYS Help System //Mechanical APDL // Theory Reference // 8. Acoustics // 8.3. Propagation, Radiation, and Scattering of Acoustic Pressure Waves // 8.3.5.2 Equivalent Fluid of Perforated Materials.
- [12] ANSYS, SAS IP, Inc. ANSYS 16 Help. ANSYS Help System //Mechanical APDL // Theory Reference // 8. Acoustics // 8.1. Acoustic Fundamentals// 8.1.1. Governing Equations
- [13] ANSYS, SAS IP, Inc. ANSYS 16 Help. ANSYS Help System //Mechanical APDL // Theory Reference // 8. Acoustics // 8.3. Propagation, Radiation, and Scattering of Acoustic Pressure Waves// 8.3.1. Acoustic Boundary Conditions
- [14] Naoki Kino, Takayasu Ueno. Comparisons between characteristic lengths and fibre equivalent diameters in glass fibre and melamine foam materials of similar flow resistivity. Shizuoka Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture, November 2006.
- [15] Carl Q.Howard and Benjamin S. Cazzolato, “Acoustic Analyses Using Matlab and Ansys”, CRC Press (711 Third Avenue New York)

**Μοντελοποίηση Ηχητικής Καθοδήγησης Σμήνους
Nanobots με χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων
Στοιχείων: Διερεύνηση Αντικειμενικότητας Ηχητικών
Σημάτων σε Ωτολογικές Παθολογίες**

Καλογεροπούλου Μαρία
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ
marykal314@gmail.com

Κατρακάζας Παναγιώτης
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Η/Υ, Υ.Δ. Εργαστήριο Βιοϊατρικής
Τεχνολογίας, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών,
ΕΜΠ
pkatrakazas@biomed.ntua.gr

Κουτσούρης Δημήτριος-Διονύσιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας, Σχολή Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ
dkoutsou@biomed.ntua.g

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την προσομοίωση της καθοδήγησης ενός ρομποτικού σμήνους μέσω του αλγορίθμου νυχτερίδας στο κεφάλι ενός ασθενή και εστιάζει στην καθοδήγηση του σμήνους με ηχητικά κύματα προς τα αντίστοιχα σημεία του εγκεφάλου για τον εντοπισμό του ηχητικού σήματος όπως το αντιλαμβάνεται ένας ασθενής, καθώς και τη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου καθοδήγησης. Σε δεύτερο χρόνο θα μελετηθεί η αντικειμενικότητα λήψης μετρήσεων από ανάλογες ακουομετρικές εξετάσεις σε περιοχή κοντά στο τύμπανο του ασθενή.

**Modelling of Acoustic Navigation of a Nanobots Swarm
using Finite Element Method: Investigation of the
Acoustic Signals' Objectivity in Otologic Pathologies**

ABSTRACT

In this paper we are investigating the simulation of navigating a nanobots swarm via the bat algorithm, inside the head of a patient. We are mainly focusing on a navigation using sound waves to corresponding brain regions in order to detect the audio signal as perceived by a patient, and the optimization of the navigation

algorithm. On a second note, we are going to investigate the objectivity of taking measurements from audiometric tests by placing the swarm in a region close to the patient's eardrum.

Εισαγωγή

Ως Nanorobot ή Nanobot ορίζεται ένα ρομποτικό σύστημα μικροσκοπικών διαστάσεων (0.1 μm έως 10 μm) ικανό να αλληλεπιδρά κατάλληλα με τα ανθρώπινα κύτταρα ούτως ώστε να συμβάλλει στην διάγνωση και την θεραπεία πολλαπλών παθήσεων σε κυτταρικό επίπεδο. Καθίσταται όμως σαφές ότι λόγω του εξαιρετικά μικρού του μεγέθους, οι ενέργειες που μπορεί να επιτελέσει κάθε nanobot είναι περιορισμένες. Λύση στο ανωτέρω πρόβλημα αποτελεί η χρήση ενός μεγάλου αριθμού nanobot και τη δημιουργία ενός εξωτερικά ελεγχόμενου ρομποτικού σμήνους, είτε ομογενούς (αποτελείται από ίδιου τύπου nanobot) είτε ετερογενούς (αποτελείται από παραπάνω του ενός τύπου nanobot καθένα εκ των οποίων αναλαμβάνει συγκεκριμένες εργασίες). Για τον προγραμματισμό των ενεργειών που καλείται να εκτελέσει το σμήνος χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους (swarm intelligence). Η ανάπτυξη ενός σμήνους nanobots μπορεί να παρουσιάσει μια εξαιρετικά ελκυστική εναλλακτική λύση συγκριτικά με τη χρήση ενός μόνο περίπλοκου και δαπανηρού ρομποτικού συστήματος, καθώς αποτελεί μία ελάχιστη επεμβατική μέθοδο διάγνωσης και θεραπείας με ένα σημαντικό αριθμό σεναρίων εφαρμογής. Επιπλέον παρέχει την ικανότητα στοχευμένης θεραπείας σε κυτταρικό επίπεδο, αφού τα nanobots είναι ικανά να εντοπίζουν και να θεραπεύουν/καταστρέφουν τα πάσχοντα κύτταρα και μόνο αυτά.

Μια από τις προσεγγίσεις όσον αφορά στην καθοδήγηση του ρομποτικού σμήνους, βασίζεται στην στρατηγική αναζήτησης μέσω ακουστικών σημάτων που παράγονται από ταλαντώσεις κατά την κίνηση των nanobots και προσομοιώνει τη συμπεριφορά των μελισσών κατά την αναζήτηση τροφής [1]. Ένας άλλος αλγόριθμος ο οποίος εκμεταλλεύεται ηχητικά σήματα, είναι ο μεταευρετικός αλγόριθμος νυχτερίδας (Bat Algorithm) ο οποίος χρησιμοποιεί μια τεχνική εντοπισμού συχνότητας, για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σμήνους και προσομοιώνει τον τρόπο προσανατολισμού, κίνησης και εύρεσης τροφής ενός είδους νυχτερίδας (Microchiroptera) [2].

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την προσομοίωση της καθοδήγησης ενός ρομποτικού σμήνους μέσω του αλγορίθμου νυχτερίδας στο κεφάλι ενός ασθενή και εστιάζει στην καθοδήγηση του σμήνους με ηχητικά κύματα προς τα αντίστοιχα σημεία του εγκεφάλου για τον εντοπισμό του ηχητικού σήματος όπως το αντιλαμβάνεται ένας ασθενής, καθώς και τη βελτιστοποίηση του αλγορίθμου καθοδήγησης. Η επιλογή του αλγορίθμου των νυχτερίδων θα εξεταστεί ως προς την καταλληλότητα της, δεδομένου ότι χρειάζεται μία παράμετρος πλοήγησης του σμήνους που να εξαρτάται από τη συχνότητα και το πλάτος του ηχητικού σήματος που θα ανίχνευε το κάθε nanobot.

Σε δεύτερο χρόνο θα μελετηθεί η αντικειμενικότητα λήψης μετρήσεων από ανάλογες ακουομετρικές εξετάσεις μέσω εισαγωγής του σμήνους από μια

μικροσκοπική οπή σε περιοχή κοντά στο τύμπανο του ασθενή. Στην περίπτωση αυτή, θα εστιάσουμε περισσότερο στα χαρακτηριστικά διάταξης του σμήνους (π.χ. αν θα είναι σε πλέγμα πίσω από το τύμπανο). Θα εφαρμοστούν οι θεμελιώδεις αρχές νοημοσύνης σμήνους του Reynolds και θα εξεταστούν αντίστοιχοι αλγόριθμοι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη υλοποίηση. Σκοπός της προσέγγισης αυτής, είναι η αντικειμενική καταγραφή της απόκρισης του ωτός στο πεδίο των συχνοτήτων για τις διάφορες περιπτώσεις ακουομετρικών εξετάσεων (ωτοακουστικές εκπομπές, ακουομετρία καθαρού τόνου) αλλά και για διάφορες περιπτώσεις απώλειας ακοής (νευροαισθητήρια βαρηκοΐα, ωτοσκλήρυνση, τυμπανοσκλήρυνση). Η αντικειμενική μέτρηση της αντίληψης του ήχου και η συλλογή των ηχητικών σημάτων από το ρομποτικό σμήνος, έχουν απώτερο στόχο την αντικειμενική κατανόηση του εκάστοτε προβλήματος ακοής, όπως το αντιλαμβάνεται το σμήνος σε συνδυασμό με την υποκειμενική αντίληψη του ασθενή.

1. Περιγραφή Συστήματος

Για την περιγραφή του συστήματός μας, απαιτείται η προσομοίωση του από ένα σύστημα πολλών μαζών με πολλούς βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι και εξαρτώνται άμεσα από το πλήθος των δεδομένων που θα εισάγουμε. Η τυμπανική μεμβράνη και ο αέρας στο κανάλι του αυτιού προσομοιάζονται με ελαστικά σώματα ενώ συνδυαστικά είναι απαραίτητη η χρήση μαθηματικών τεχνικών για να διατηρηθεί το σύστημα στην τάξη που θέλουμε.

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στην παρούσα μελέτη θα υλοποιηθεί με το σχεδιασμό και την εισαγωγή ενός μοντέλου ρομποτικού σμήνους με πεπερασμένα στοιχεία μέσω του λογισμικού 3D CAD Solidworks, στο υπάρχον μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων MIDA [3], το οποίο προσομοιώνει μέσω υψηλής ανάλυσης εικόνων την ανατομία του κεφαλιού ενός ασθενή και ενδείκνυται για ανάλογες προσομοιώσεις.

Με την παραπάνω προσέγγιση, επικεντρώνουμε το πεδίο της έρευνας μας στην ολοένα και αυξανόμενη εφαρμογή, μελέτη και βελτιστοποίηση αλγορίθμων ρομποτικής σμήνους με χρήση ηχητικών σημάτων και την αξιοποίηση τους στην αξιολόγηση διάφορων σημαντικών παθολογιών αλλά και εξετάσεων που σχετίζονται με τη διάγνωση των αντίστοιχων παθολογιών μέσω της χρήσης λογισμικού προσομοίωσης. Τα χαρακτηριστικά των εξαγόμενων ηχητικών κυμάτων, η πίεση στο χώρο του εγκεφάλου αλλά και οι ανά πάσα χρονική στιγμή θέση (μετατόπιση στο χώρο) και ταχύτητα (καθοδήγηση) του ρομποτικού σμήνους στο χώρο υπό μελέτη, είναι τα μεγέθη εκείνα που λαμβάνονται υπόψιν για την εργασία μας.

1.1 Αλγόριθμος Νυχτερίδας (Bat algorithm)

Ο Αλγόριθμος Νυχτερίδας (Bat Algorithm) προτάθηκε από τον X.-S. Yang το 2010. Η βασική ιδέα δημιουργίας του αλγορίθμου συνοψίζεται σε μία θεωρητική και εξιδανικευμένη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των νυχτερίδων κατά την

αναζήτηση της τροφής τους. Οι απλοποιημένοι κανόνες που διέπουν τη μοντελοποίηση αυτή, όπως παρουσιάστηκαν από τον Yang είναι οι εξής:

1. Όλες οι νυχτερίδες χρησιμοποιούν ηχοεντοπισμό για να εκτιμήσουν την απόσταση και γνωρίζοντας παράλληλα την διαφορά μεταξύ τροφής/λείας και άλλων εμποδίων που βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο.
2. Οι νυχτερίδες πετούν κατά τρόπο τυχαίο έχοντας ταχύτητα u_i στη θέση x_i εκπέμποντας παλμούς σταθερής συχνότητας f_{min} , μεταβλητού μήκους κύματος λ και πλάτους A_0 για να αναζητήσουν την τροφή τους. Μπορούν να προσαρμόσουν το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου παλμού καθώς και το ρυθμό εκπομπής αυτού, ανάλογα με την απόσταση από το στόχο τους.
3. Παρόλο που το πλάτος μπορεί να παρουσιάσει διάφορες διακυμάνσεις, δεχόμαστε ότι είναι φραγμένο, δηλαδή κυμαίνεται μεταξύ ενός ελάχιστου A_{min} και ενός μεγίστου A_{max} . [2]

Οι εικονικές νυχτερίδες προσαρμόζουν τη θέση τους βάσει των εξισώσεων:

$$F_i = F_{min} + (F_{max} - F_{min})\beta \quad (1)$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (X_i^t - X^*)F_i \quad (2)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad (3)$$

όπου β είναι ένα τυχαίο διάνυσμα στο $[0,1]$ επιλεγμένο από την ομοιόμορφη κατανομή, X^* είναι η τρέχουσα ολικά καλύτερη θέση, F_{min} και F_{max} η μέγιστη και η ελάχιστη απαιτούμενη συχνότητα (ανάλογα με το πρόβλημα) αντίστοιχα και V_i είναι το διάνυσμα της ταχύτητας.

Προκειμένου το σμήνος των νυχτερίδων να εκτελέσει μία τοπική αναζήτηση χρησιμοποιείται η τεχνική του τυχαίου περιπάτου (Random Walk), όπως φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$X_{new} = X_{old} + \varepsilon A^t \quad (4)$$

όπου A^t είναι το μέσο πλάτος παλμού όλων των νυχτερίδων την χρονική στιγμή t και ε η παράμετρος ελέγχου του πλάτους, δηλαδή ένας τυχαίος αριθμός που έχει επιλεγεί ομοιόμορφα από την κανονική κατανομή στο διάστημα $[-1,1]$. Η παράμετρος ελέγχου χρησιμοποιείται για την αποδοχή ή απόρριψη μίας νέας θέσης της νυχτερίδας. Συγκεκριμένα, αν μία νυχτερίδα εντοπίσει μία θέση καλύτερη από την παρούσα θέση της, μετατοπίζεται προς την θέση αυτή με τρόπο που εξαρτάται από το πλάτος εκπομπής, όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοπική αναζήτηση είναι καλύτερο να γίνεται πιο εντατικά στις τελευταίες επαναλήψεις του αλγορίθμου προκειμένου ο αλγόριθμος να επιστρέψει τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα.

Η θέση κάθε νυχτερίδας την χρονική στιγμή $t+1$ ενημερώνεται με εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης:

$$r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (5)$$

όπου r_i^0 είναι ο αρχικός ρυθμός εκπομπής των ακουστικών παλμών και γ είναι μία σταθερά μεγαλύτερη του 0.

Αντίστοιχα, το πλάτος του εκπεμπόμενου παλμού ενημερώνεται από την εξίσωση:

$$A_i^{t+1} = \alpha A^t \quad (6)$$

όπου α μία σταθερά που επιλέγεται μέχρι στιγμής πειραματικά. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον ακόλουθο αλγόριθμο, που αποτελεί την κλασική μορφή του αλγορίθμου νυχτερίδας:

```

input : Q frequency band
         fi pulse frequency
         ri pulse emission rate
         Ai loudness
          $\epsilon$  sound amplitude control parameter
          $\gamma$  pulse rate control parameter
output: Optimal Bat position and the corresponding fitness
Initialize a population of n bats' positions at random
Find the best solution based on fitness; g*;
while Stopping criteria not met do
  foreach bati do
    Generate new solution by adjusting frequency (xinew);
    if rand > ri then
      Perform local search around global best (xinew);
    end
    if rand < Ai and fitness of new solution is better than the original then
      Update position of bati to xinew;
      Increase emission rate ri;
      Decrease loudness Ai;
    end
  end
  Update the best solution
end [1]

```

1.2 Εφαρμογή στην περίπτωση του ακουστικού σήματος

Εφόσον το ακουστικό αντανακλαστικό είναι ουσιαστικά μια συστολή των μυών του μέσου ωτός, που προκαλείται από ένα έντονο ακουστικό ερέθισμα, η διέγερση είτε στην ομόπλευρη είτε στην αντίπλευρη περιοχή, θα πρέπει να οδηγήσει σε μια διμερή σύσπαση των μυών σε ένα κανονικό σύστημα ακοής. Ωστόσο, στην περίπτωση της νευροαισθητήριας απώλειας ακοής (sensorineural hearing loss), το κατώφλι ακουστικού αντανακλαστικού έχει δείχθει να μειώνεται κατά τουλάχιστον δύο διαφορετικούς παράγοντες: το βαθμό συγχρονισμού της νευρωνικής δραστηριότητας όσον αφορά τη συχνότητα, και το γρήγορο μηχανισμό συμπίεσης που δρα στον κοχλία [4].

Κατά συνέπεια, ο έλεγχος του ακουστικού σήματος και της πιθανής εξασθένησης του στην περίπτωση μιας νευροαισθητήριας απώλειας ακοής, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παρακολούθησης του σήματος, εφόσον αυτό θεωρείται ακόμα «ήχος». Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης τεσσάρων (4) μικρο-αισθητήρων που θα τοποθετηθούν στα κраниακά νεύρα CN7 (προσωπικό νεύρο) και CN8

(στατικοακουστικό νεύρο), οι οποίοι λαμβάνουν το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, προκειμένου να εντοπίσουν το πρόβλημα, σε συντονισμό με τα nanobots.

Εάν ένα νεύρο βρεθεί να είναι προβληματικό, μια απλή μέθοδος αναζήτησης μπορεί να εφαρμοστεί (π.χ. η μέθοδος διχοτόμησης) για τον έλεγχο του υποδιαστήματος στο οποίο υπάρχει το πρόβλημα (η εξασθένιση του σήματος). Σε αυτή την περίπτωση, το σμήνος των nanobots θα κινηθεί παράλληλα με το νεύρο για να εντοπίσει την προβληματική περιοχή.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην πλοήγηση nanobots περιγράφεται σε προηγούμενη εργασία μας [5], όπου ακουστικά κύματα χρησιμοποιούνται για να επηρεάσουν ελάχιστα ιστούς του εγκεφάλου. Οι ανατομικές παραμέτρους για τα νεύρα CN7 και CN8 λαμβάνονται από την εργασία των Nakamichi et al [6], μέσω της οποίας καθορίζονται οι παράμετροι σχεδιασμού των nanobots, καθώς και η θέση τους κατά μήκος των νεύρων, καθώς και η περιοχή κοντά στην τυμπανική μεμβράνη.

Η εξακρίβωση/επαλήθευση του σήματος, καθώς και η αντικειμενικότητα των μετρήσεων που προέρχονται από αντίστοιχες ακουολογικές εξετάσεις (ωτοακουστικές εκπομπές, ακουομετρία καθαρού τόνου), θα υλοποιηθούν μέσω μετρήσεων μικροφώνου-καθετήρα (Probe Microphone Measurements, PMM), οι οποίες θα πραγματοποιηθούν αρχικά για να αξιολογήσουν το επίπεδο του σήματος που ένας ασθενής (με ή χωρίς) απώλεια ακοής λαμβάνει κοντά στην τυμπανική μεμβράνη. Ο σκοπός των μετρήσεων PMM είναι να εξασφαλιστεί ότι το κατάλληλο κέρδος ακουστικού σήματος λαμβάνεται από ένα άτομο, όπου τα ακριβή κατώφλια ακουστότητας μετατρέπονται μέσω των μετρήσεων του ακουογράμματος του ασθενή (dB HL) σε εξαγόμενο σήμα σε ακουστικό βαρηκοΐας (dB SPL). [7]

Αυτό το σήμα θα λαμβάνεται επίσης από τα nanobots, τα οποία βρίσκονται παράλληλα με τα νεύρα και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως σήμα αναφοράς, ενώ την ίδια στιγμή θα καταγράφεται η πορεία του σήματος κατά τη διαδρομή του στα νεύρα. Η διαφορά μεταξύ της μέτρησης που λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο μέτρησης του σήματος και του αναφορικού σήματος, θα μας παρέχει το επίπεδο της εξασθένησης που τυχόν υπάρχει σε ολόκληρη την ακουστική διαδρομή [8].

2. Συμπεράσματα

Η παραπάνω διαδικασία θα μας δώσει μια καλύτερη εικόνα για το πού λαμβάνει χώρα η απώλεια ακοής και θα μας παρέχει μια πιο ολιστική άποψη της διαδρομής του ακουστικού σήματος, προκειμένου να αξιολογηθούν καλύτερα τα επίπεδα απώλειας ακοής. Επιπλέον, η διαδικασία αυτή θα παρέχει μια πιο αντικειμενική αντίληψη της ακουστότητας ενός ασθενή, καθώς δεν θα εμπλέκεται ο χρήστης, όπως αυτό συμβαίνει κατά τη διάρκεια των μέχρι σήμερα γνωστών ακουολογικών εξετάσεων, δίνοντας μια καλύτερη εικόνα στους γιατρούς για το πού ακριβώς συμβαίνει η απώλεια του ακουστικού σήματος κατά μήκος των νεύρων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναμένεται να αποτελέσουν ένα σημαντικό βοήθημα στην κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας των αναφερθέντων ασθενειών και την επίδρασή τους στην απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος ακοής, αλλά και στη βελτιστοποίηση υπαρχόντων μεθόδων καθοδήγησης ρομποτικών σημνών για επεμβάσεις στην ευαίσθητη περιοχή του εγκεφάλου.

3. Αναφορές

- [1] V. Loscrí, V. Mannara, E. Natalizio, and G. Aloí, “Efficient acoustic communication techniques for nanobots,” pp. 36–39, Feb. 2012.
- [2] X.-S. Yang, “A new metaheuristic bat-inspired algorithm,” in *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)*, Springer, 2010, pp. 65–74.
- [3] M. I. Iacono, E. Neufeld, E. Akinnagbe, K. Bower, J. Wolf, I. Vogiatzis Oikonomidis, D. Sharma, B. Lloyd, B. J. Wilm, M. Wyss, K. P. Pruessmann, A. Jakab, N. Makris, E. D. Cohen, N. Kuster, W. Kainz, and L. M. Angelone, “MIDA: A Multimodal Imaging-Based Detailed Anatomical Model of the Human Head and Neck,” *PLoS One*, vol. 10, no. 4, p. e0124126, Jan. 2015.
- [4] M. Müller-Wehlau, M. Mauermann, T. Dau, and B. Kollmeier, “The effects of neural synchronization and peripheral compression on the acoustic-reflex threshold,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, no. 5, pp. 3016–27, May 2005.
- [5] M. Kalogeropoulou, P. Katrakazas, and D.-D. Koutsouris, “Bat Algorithm Guided Navigation of Nanobots Swarm inside Brain,” in *38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, to be published*, 2016, p. 1.
- [6] R. Nakamichi, M. Yamazaki, M. Ikeda, H. Isoda, H. Kawai, M. Sone, T. Nakashima, and S. Naganawa, “Establishing normal diameter range of the cochlear and facial nerves with 3D-CISS at 3T,” *Magn. Reson. Med. Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 241–7, Dec. 2013.
- [7] L. E. Jorgensen, “Verification and validation of hearing aids: Opportunity not an obstacle,” *J. Otol.*, 2016.
- [8] M. Kalogeropoulou, P. Katrakazas, K. Giokas, and D.-D. Koutsouris, “A Nanobots-based Methodology for Assessing the Acoustic Signal’s Attenuation in the Auditory System’s Pathway,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 10, 2016.

Ακουστική Πίεση στο Εσωτερικό των Ηχείων

Χαράλαμπος
Παπαδάκος¹
Ερευνητής
paradakos@upatras.gr
r
+30 2610996838

Γαβριήλ Καμάρης¹
Ερευνητής
gpkamaris@upatras.gr
.gr
+30 2610996838

Ιωάννης
Μουρτζόπουλος¹
Καθηγητής
mourjop@upatras.gr
+30 261099647

¹Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, 26504

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μελέτη σχετικά με τη στάθμη και το συχνοτικό προφίλ της ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό συστημάτων μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού. Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού COMSOL και μετρήσεων σε αντίστοιχα συστήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν καλή συμφωνία εξομοιώσεων και μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό τέτοιων συστημάτων φθάνει και ενίοτε υπερβαίνει τα **130 dB**, ενώ είναι πρακτικά σταθερή σε πολύ χαμηλές συχνότητες και εμφανίζει ορισμένους ισχυρούς συντονισμούς σε υψηλότερες συχνότητες. Τέτοια επίπεδα, παραδοσιακά αποτελούν πρόκληση για την αεροστεγανότητα και την ακαμψία του κουτιού, ωστόσο μπορούν να παρέχουν χρήσιμη ακουστική ενέργεια για συλλογή και μετατροπή.

Προτεινόμενη θεματική ενότητα: Ηλεκτροακουστική
Λέξεις κλειδιά: Ηχεία, Ακουστική Πίεση, Ακουστική Ενέργεια

Sound Pressure Inside Closed-Box Loudspeaker Enclosures

ABSTRACT

This paper presents a study with respect to the level and frequency profile of sound pressure inside closed-box loudspeaker systems. The study is carried out via COMSOL software and via measurements in such systems. The results show good agreement between simulations and measurements. More specifically, the sound pressure level within such systems reaches and sometimes exceeds 130 dB, while it is practically constant at very low frequencies and displays some strong resonances at higher frequencies. Such levels traditionally challenge enclosure air-tightness

and box rigidity, but they can provide useful acoustic energy for harvesting and transduction.

Topic: Electroacoustics

Keywords: Loudspeakers, Sound pressure, Acoustic Energy

Εισαγωγή

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μελέτη σχετικά με την ακουστική πίεση στο εσωτερικό των ηχείων και πιο συγκεκριμένα συστημάτων μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού. Σήμερα, τέτοια συστήματα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή και χρησιμοποιούνται ευρέως σε μια πληθώρα φορητών και σταθερών εφαρμογών.

Η ακουστική πίεση στο εσωτερικό αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι εξαιρετικά ισχυρή. Επιπλέον, το εσωτερικό των ακουστικών κλειστού τύπου λειτουργεί σα θάλαμος σταθερής πίεσης στις χαμηλές-μεσαίες συχνότητες και στο εσωτερικό των ηχείων κλειστού τύπου η πίεση είναι σταθερή σε συχνότητες χαμηλότερες από τον πρώτο συντονισμό [1].

Τέτοια συστήματα έχουν μελετηθεί εκτενώς στο παρελθόν, κυρίως για το χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση της απόκρισής τους [2-4]. Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να επαληθεύσει τη στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό τέτοιων συστημάτων καθώς επίσης και το προφίλ της στη συχνότητα για πιθανή συλλογή και μετατροπή της ακουστικής ενέργειας [5].

Η εργασία οργανώνεται ως εξής. Στην Ενότητα 2 παρουσιάζεται η μέθοδος για τη διεξαγωγή της μελέτης. Στην Ενότητα 3 παρουσιάζονται μετρήσεις σε συστήματα μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού. Στην Ενότητα 4 πραγματοποιείται σύνοψη και παρατίθενται τα συμπεράσματα.

1. Μέθοδος φυσικής μοντελοποίησης

Η μελέτη της ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό συστημάτων μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό COMSOL Multiphysics 5.0. Σε αυτό το περιβάλλον, αρχικά σχεδιάστηκε ένα *2D-Axisymmetric* μοντέλο μεγάφωνου προσαρμοσμένου σε άπειρη μπάφλα. Η ανάπτυξή του βασίστηκε στις διεπαφές *Magnetic Fields*, *Pressure Acoustics-Frequency Domain* και *Solid Mechanics*. Τα επιμέρους στοιχεία επενδύθηκαν με υλικά που αντλήθηκαν από γνωστό μοντέλο [6]. Το μεγάφωνο μελετήθηκε (α) για ένα μέγεθος αναφοράς (ακτίνα κώνου **7.3 cm**) και (β) για την περίπτωση που έχει συρρικνωθεί ισοτροπικά δέκα φορές.

1.1 Συστήματα μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν *3D* μοντέλα του αρχικού μεγάφωνου προσαρμοσμένου αυτή τη φορά σε κλειστά κουτιά διαφορετικού μεγέθους. Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων βασίστηκε στις διεπαφές *Pressure Acoustics-Frequency Domain* και *Shell*. Σε αντίθεση με τη διδιάστατη προσέγγιση (Ενότητα 1), το πηνίο και η κυλινδρική φόρμα σχεδιάστηκαν ως συσσωμάτωμα, ενώ ο κώνος, η αράχνη, η ανάρτηση και η κυλινδρική φόρμα σχεδιάστηκαν ως *shell boundaries*

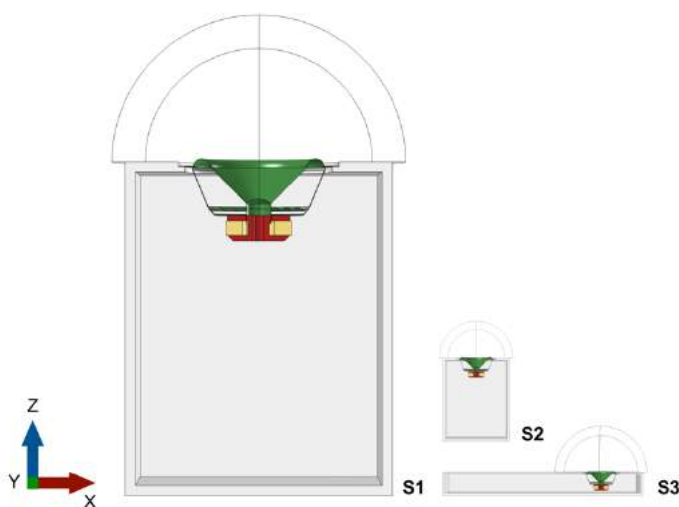
και όχι ως *solid domains*. Λόγω της συμμετρίας που εμφανίζουν στο επίπεδο $-xz$, τα μοντέλα σχεδιάστηκαν κατά το ήμισυ, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, και οι διαστάσεις τους δίνονται παρακάτω.

S1 («Υπογούφερ»): Μεγάφωνο αναφοράς (Ενότητα 1) - Κλειστό κουτί με $l_x = l_y = 37 \text{ cm}$ και $l_z = 47 \text{ cm}$ ($V = 64.34 \times 10^3 \text{ cm}^3$)

S2 («Μικρή πολυμεσική συσκευή»): Ισοτροπικά συρρικνωμένο **S1** κατά δέκα φορές ($V = 64.34 \text{ cm}^3$)

S3 («Κινητό τηλέφωνο»): Ισοτροπικά συρρικνωμένο μεγάφωνο (Ενότητα 1) - Κλειστό κουτί με $l_x = 13 \text{ cm}$, $l_y = 6.5 \text{ cm}$ και $l_z = 1.5 \text{ cm}$ ($V = 126.75 \text{ cm}^3$)

Για λόγους απλότητας, τα τοιχώματα των κλειστών κουτιών του Σχ. 1 θεωρήθηκαν άκαμπτα, αν και στην πράξη η δόνησή τους δεν είναι αμελητέα και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε μια πιο λεπτομερή ανάλυση [4]. Επίσης, στο εσωτερικό των κουτιών δεν σχεδιάστηκαν ηχοαπορροφητικά υλικά, αν και στην πράξη είναι συνήθης η χρήση τέτοιων υλικών, όπως για παράδειγμα υαλοβάμβακας, υφάσματα κ.α.



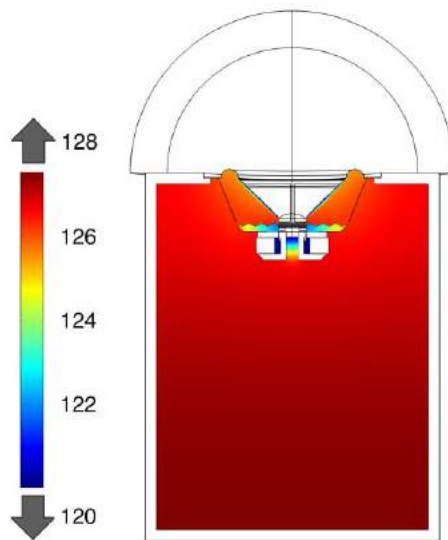
Σχήμα 1. 3D μοντέλο συστήματος μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού μεγέθους: (**S1**) «Υπογούφερ» ($V = 64.34 \times 10^3 \text{ cm}^3$), (**S2**) «Μικρή πολυμεσική συσκευή» ($V = 64.34 \text{ cm}^3$) και (**S3**) «Κινητού τηλεφώνου» ($V = 126.75 \text{ cm}^3$).

1.2 Εξομοιώσεις

Για τα παραπάνω μοντέλα πραγματοποιήθηκαν εξομοιώσεις στο COMSOL στην περιοχή συχνοτήτων 20 Hz έως 4 KHz , για τάση τροφοδοσίας μεγάφωνου $V_0 = 4 \text{ V}$. Για την επίλυση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε πλέγμα από τετράεδρα,

τα οποία ανήλθαν σε 230872, 230066 και 216819 για τα συστήματα **S1**, **S2** και **S3** αντίστοιχα.

Το Σχ. 2 απεικονίζει τη στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό του **S1** στα **60 Hz**, στο επίπεδο - **xz**, για $y = l_y/2$. Από αυτό το σχήμα γίνεται φανερό ότι η στάθμη ακουστικής πίεσης κατανέμεται ομοιόμορφα στο εσωτερικό του εν λόγω συστήματος και εν προκειμένω φθάνει περίπου τα **128 dB**.



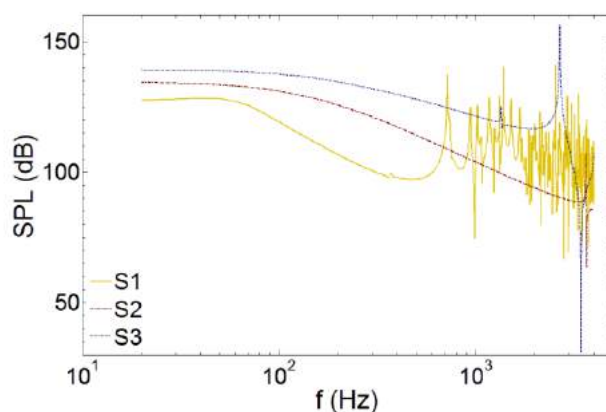
Σχήμα 2. Στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό του **S1** (βλ. Εν. 1.1) στα **60 Hz**, για $y = l_y/2$.

Δεδομένου ότι οι ιδιοτιμές ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου κουτιού διαστάσεων l_x , l_y και l_z με άκαμπτα τοιχώματα υπολογίζονται από την Εξ. (1), όπου $n_n = \omega/c$, $\omega = 2\pi f(\text{rad/sec})$, $c = 343(\text{m/sec})$ η ταχύτητα του ήχου, n_x , n_y , n_z θετικοί ακέραιοι [7], η συχνότητα του πρώτου συντονισμού για το συγκεκριμένο κουτί προκύπτει **365 Hz**, μεγαλύτερη δηλαδή από τη συχνότητα εξομοίωσης (**60 Hz**). Συνεπώς, το ότι η πίεση στο εσωτερικό ενός τέτοιου συστήματος είναι σταθερή σε συχνότητες μικρότερες από τον πρώτο συντονισμό του επαληθεύεται [1].

$$n_n^2 = \left(\frac{\pi n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{\pi n_z}{l_z}\right)^2 \quad (1)$$

Στο Σχ. 3 απεικονίζεται η στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό των υπό μελέτη συστημάτων συναρτήσει της συχνότητας, στο σημείο $(l_x/2, l_y/2, l_z/2)$. Από αυτό το σχήμα, γίνεται φανερό ότι σε συχνότητες μικρότερες από τον πρώτο

συντονισμό, η στάθμη ακουστικής πίεσης είναι πολύ ισχυρή φθάνοντας τα **128 dB**, **135 dB** και **139 dB** στο εσωτερικό των **S1**, **S2** και **S3** αντίστοιχα, ανεξάρτητα από το μέγεθος και το σχήμα του κουτιού. Παράλληλα, είναι σχεδόν σταθερή σε πολύ χαμηλές συχνότητες και φθίνει σημαντικά σε συχνότητες πλησίον του πρώτου συντονισμού. Οι συντονισμοί που εμφανίζονται είναι αρκετά αιχμηροί και εξαιρετικά ισχυροί λόγω της απουσίας ηχοαπορρόφησης, όπως έχει προαναφερθεί. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, ότι οι συντονισμοί που υπολογίζονται από την Εξ. (1) συμφωνούν αρκετά με τους συντονισμούς που προκύπτουν από τις εξομοιώσεις. Λόγου χάρη, από την Εξ. (1) προκύπτει ότι ο πρώτος συντονισμός για το **S1** εμφανίζεται στα **365 Hz**, για το **S2** στα **3.65 KHz** και για το **S3** στα **1.32 KHz**, ενώ με βάση το COMSOL στα **360 Hz**, στα **3.64 KHz** και τα **1.35 KHz** αντίστοιχα. Η μικρή απόκλιση οφείλεται κυρίως στην ανάλυση συχνότητας των εξομοιώσεων (**10 Hz**).



Σχήμα 3. Στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό των **S1**, **S2** και **S3** (βλ. Εν.

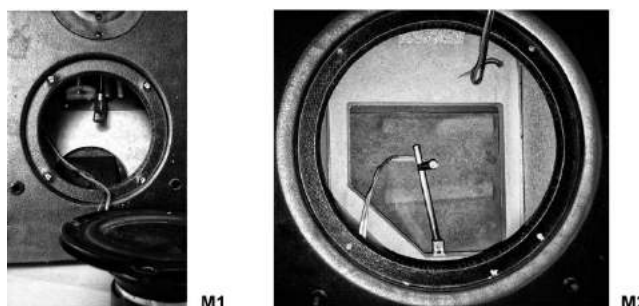
1.1) στην περιοχή συχνοτήτων **20 Hz – 4 KHz**, στο σημείο

$$l_x/2, l_y/2, l_z/2$$

2. Μετρήσεις

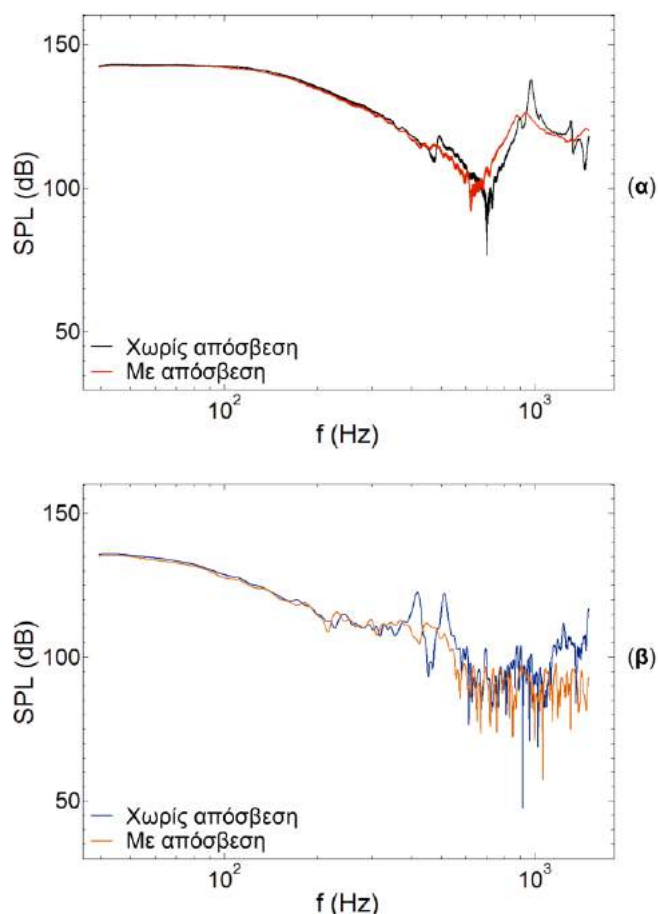
Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα αντιπαραβλήθηκαν με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εσωτερικό ηχείων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε ένα ηχείο δύο δρόμων με οπές (**M1**), με $l_x = 33.2 \text{ cm}$, $l_y = 18 \text{ cm}$, $l_z = 7.5 \text{ cm}$ ($V = 4.48 \times 10^3 \text{ cm}^3$), ακτίνα κώνου χαμηλών-μεσαίων συχνοτήτων **4.6 cm** και υψηλών συχνοτήτων **1.3 cm** και ένα υπογούφερ με οπές (**M2**), με $l_x = 38.5 \text{ cm}$, $l_y = 30.4 \text{ cm}$, $l_z = 35.5 \text{ cm}$ ($V = 41.55 \times 10^3 \text{ cm}^3$) και ακτίνα κώνου **9.5 cm**. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, οι οπές των εν λόγω συστημάτων σφραγίστηκαν ώστε να επιτευχθεί η κατά δυνατό ρεαλιστικότερη προσέγγιση ενός συστήματος

τύπου κλειστού κουτιού. Επιπλέον, δεδομένου ότι στο εσωτερικό τους υπήρχε ηχοαπορροφητικό υλικό, τα συστήματα αυτά εξετάστηκαν τόσο παρουσία όσο και απουσία του εκάστοτε υλικού.



Σχήμα 4. Θέση μικροφώνου στο εσωτερικό των **M1** και **M2** (βλ Εν. 2).

Για τις μετρήσεις κρουστικής απόκρισης που πραγματοποιήθηκαν στο εσωτερικό των συστημάτων **M1** και **M2**, ως σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ένα σήμα σάρωσης ημιτόνου. Για την ηχογράφιση χρησιμοποιήθηκε το μικρόφωνο G.R.A.S Mic Capsule Type 40AK, το οποίο τοποθετήθηκε στο σημείο $(l_x/2, l_y/2, l_z/2)$ εντός του **M1** και στο σημείο $(l_x/2, l_y/2, z = 22 \text{ cm})$ εντός του **M2**, όπως φαίνεται στο Σχ. 4. Το μικρόφωνο βαθμονομήθηκε, ώστε η απόκριση πλάτους να αντιστοιχεί στην πραγματική στάθμη ακουστικής πίεσης εντός των αντίστοιχων κουτιών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για στάθμη



Σχήμα 5. Στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό (α) του **M1** και (β) του **M2**, παρουσία και απουσία ηχοαπορροφητικού υλικού, στην περιοχή συχνοτήτων **40 Hz – 1.5 KHz**.

ακουστικής πίεσης **94 dB** στο **1 m** στον άξονα εκπομπής των ηχείων.

Το Σχ. 5 απεικονίζει τη στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό των **M1** και **M2** συναρτήσει της συχνότητας, τόσο παρουσία, όσο και απουσία ηχοαπορροφητικού υλικού. Από αυτό το σχήμα, γίνεται φανερό ότι η στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό του **M1** είναι πάνω από **140 dB** μέχρι τα **145 Hz** και πάνω από **130 dB** μέχρι τα **250 Hz**, ενώ στο εσωτερικό του **M2** είναι πάνω από τα **130 dB** μέχρι τα **90 Hz**. Επίσης, είναι φανερό ότι η στάθμη ακουστικής πίεσης είναι σταθερή σε πολύ χαμηλές συχνότητες στο εσωτερικό των δύο κουτιών και δεν επηρεάζεται από την παρουσία ηχοαπορροφητικού υλικού. Τα τελευταία επιδρούν κυρίως στις συχνότητες συντονισμού, όπου επιτυγχάνουν σημαντική απόσβεση της ακουστικής ενέργειας.

3. Σύνοψη

Η παρούσα μελέτη αξιολογεί τη στάθμη ακουστικής πίεσης στο εσωτερικό συστημάτων μεγάφωνου-ηχείου τύπου κλειστού κουτιού μέσω πρωτότυπων φυσικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο COMSOL και μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αντίστοιχα συστήματα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και οι μετρήσεις συμφωνούν αρκετά καλά τόσο ως προς τη στάθμη, όσο και ως προς το προφίλ της ακουστικής πίεσης στη συχνότητα. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η στάθμη ακουστικής πίεσης είναι εξαιρετικά ισχυρή και σχεδόν σταθερή σε συχνότητες χαμηλότερες από τον πρώτο συντονισμό, φθάνοντας τα 130 dB και ενίοτε υψηλότερα, ανεξάρτητα από το μέγεθος και το σχήμα του εξεταζόμενου κουτιού, ή τη χρήση ηχοαπορροφητικού υλικού. Τέτοιες στάθμες ακουστικής πίεσης ενθαρρύνουν την περαιτέρω εργασία για τη συλλογή και τη μετατροπή της ακουστικής ενέργειας στο εσωτερικό ανάλογων συστημάτων [5].

Αναφορές

- [1] J. Borwick *Loudspeaker and Headphone Handbook* Taylor & Francis Group, Σελ. 587-589 (2001).
- [2] R. H. Small «Closed-Box Loudspeaker Systems - Part I: Analysis» *J. Audio Eng. Soc.*, **20(10)**, pp 798-808 (1972).
- [3] R. H. Small «Closed-Box Loudspeaker Systems - Part II: Synthesis» *J. Audio Eng. Soc.*, **21(1)**, pp 11-18 (1973).
- [4] M. Karjalainen, V. Ikonen, P. Antsalu, P. Maijala, L. Savioja, A. Suutala and S. Pohjolainen «Comparison of numerical simulation models and measured low-frequency behavior of loudspeaker enclosures» *J. Audio Eng. Soc.*, **49(12)**, pp 1148-1166 (2001).
- [5] Ch. Papadacos and J. Mourjopoulos «A study of acoustical-mechanical coupling for acoustic energy harvesting» *Acta Acustica united with Acustica*, **101(6)**, pp 1185-1188 (2015).
- [6] <http://www.comsol.com/model/loudspeaker-driver-1369>
- [7] P. M. Morse and K. U. Ingard *Theoretical Acoustics* McGraw-Hill, Κεφ. 9 (1968).

Simultaneous localisation of sound source and computation of sound speed

Athanasios A. Stamos
Dr Civil Engineer/NTUA Zografou
stamthan@central.ntua.gr

Dimitra I. Vassilaki
Dr Surveying Engineer/UTH Volos
dimitra.vassilaki@gmail.com

ABSTRACT

It is sometimes difficult to pinpoint the source of sound or noise when there are obstacles between the observer and the noise source. In this paper we propose a geometrical method to locate the source of noise. A set of microphones are placed on locations with known coordinates. The time that the noise reaches each microphone is recorded and the distances from the sound source can be calculated assuming that the Speed of Sound (SS) is known. However SS depends on the local environment and thus it may not be known. In this paper SS is also calculated from the available data. Using a combination of the Least Square Adjustment (LSA) and the exhaustive search method, the coordinates of the sound source and SS are simultaneously computed. A method to compute the first approximation that the LSA needs to converge is also presented. The error of the results is numerically computed. The method is applied to simulated data and a large number of geometries are solved.

Ταυτόχρονος εντοπισμός πηγής ήχου και υπολογισμός ταχύτητας του ήχου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μερικές φορές είναι δύσκολο να εντοπίσουμε την πηγή του ήχου ή θορύβου αν υπάρχουν εμπόδια μεταξύ του παρατηρητή και της πηγής. Σε αυτή την εργασία προτείνουμε μια γεωμετρική μέθοδο για να εντοπιστεί η πηγή του θορύβου. Ένα σύνολο από μικρόφωνα τοποθετούνται σε θέσεις με γνωστές συντεταγμένες. Ο χρόνος που ο θόρυβος φθάνει σε κάθε μικρόφωνο καταγράφεται και οι αποστάσεις από την πηγή του ήχου μπορούν να υπολογιστούν αν η ταχύτητα του ήχου θεωρηθεί γνωστή. Όμως η ταχύτητα του ήχου (SS) εξαρτάται από το τοπικό περιβάλλον και έτσι μπορεί να μην είναι γνωστή. Σε αυτήν την εργασία η SS υπολογίζεται επίσης από τα διαθέσιμα δεδομένα. Χρησιμοποιώντας συνδυασμό της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (LSA) και της μεθόδου εξαντλητικής αναζήτησης, οι συντεταγμένες της πηγής ήχου και η SS μπορούν να υπολογιστούν ταυτόχρονα. Επίσης παρουσιάζεται μία μέθοδος υπολογισμού της απαραίτητης πρώτης προσέγγισης για να συγκλίνει η LSA. Το σφάλμα των αποτελεσμάτων υπολογίζεται αριθμητικά. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε προσομοιωμένα δεδομένα και επιλύεται ένας μεγάλος αριθμός από γεωμετρίες.

Introduction

It is sometimes difficult to pinpoint the source of sound or noise when there are obstacles between the observer and the noise source, or there are other sources of noise acting at the same time. In other cases the source of noise is known, for example a machine, but the exact geometrical location within the source is needed in order to take remedy actions or other reasons. In this paper we propose a geometrical method to locate the source of noise. A set of microphones are placed on locations with known coordinates. The time that the noise reaches each microphone is recorded and the distances from the sound source can be calculated assuming that the speed of sound is known. There are many references in the literature which address variations of the problem of location, from hardware point of view [1] [2], to methodologies which range from simple averaging [3], to stochastic [4], to maximisation [5] and Fourier transform [6]. However the speed of sound depends on the conditions of the local environment, mainly temperature, and may not have the textbook value. In contrast to previous works, in this paper the speed of sound is considered unknown and it is calculated from the available data. The location of the sound source is the intersection of spheres centered at the location of the source with radius the distance of the source to each microphone multiplied by an unknown factor which takes into account the unknown speed of sound. The resulting equations are highly non-linear and the data provides more equations than the number of unknowns. Theoretically the non-linear Least Square Adjustment (LSA) [7] can be employed to solve for the best values of the coordinates of the sound source and the speed of sound. In reality the distances to the source and the speed of sound are not totally independent, as an error in the measurements which enlarges the distances has the same effect as a larger speed of sound. Thus a combination the non-linear LSA and the exhaustive search method is employed to solve for the coordinates of the sound source and the speed of sound. The non-linear LSA is an iterative method and needs a good first approximation in order to converge, a fact that is often overlooked. In this paper a robust method to compute the first approximation is also presented. The error of the results is numerically computed. The method is applied to simulated data and a large number of geometries is successfully solved.

In the following sections the LSA is described, and the method for the first approximation is presented. Finally the application and the conclusions are presented.

1. Least Square Adjustment

Assuming the coordinates of the sound source are (x, y, z) and the coordinates of the microphones are (X_i, Y_i, Z_i) , the function which computes the distance of microphone i to the source is:

$$g_i(x, y, z) = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}$$

The coordinates of the sound source are found as the solution to the non-linear system:

$$g_i(x, y, z) = pD_i \quad \text{or} \quad f_i(x, y, z, p) = D_i \quad , \quad f_i(x, y, z, p) = \frac{1}{p} g_i(x, y, z) \quad (1.1)$$

where p is factor which takes the value $p=1$ when the actual speed of sound V has the value $V_{20}=343.2$ m/s (dry air at 20 °C) and $p=V/V_{20}$ otherwise. This implies that the measured distance D_i to a microphone is computed multiplying the measured time t_i which the sound takes to reach the microphone by V_{20} . Factor p , and thus the actual speed of sound, is also computed by the solution to the non-linear system of equation (1.1).

According to the non-linear LSA, if a good approximation (x^k, y^k, z^k, p^k) is known, then a better approximation is computed as:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x, \quad y^{k+1} = y^k + \Delta y, \quad z^{k+1} = z^k + \Delta z, \quad p^{k+1} = p^k + \Delta p$$

where $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta p$ are computed by the solution of the system:

$$\begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial p} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} & \frac{\partial f_2}{\partial p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x} & \frac{\partial f_n}{\partial y} & \frac{\partial f_n}{\partial z} & \frac{\partial f_n}{\partial p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta p \end{bmatrix}, \quad \Delta f_i = D_i - f_i(x^k, y^k, z^k, p^k)$$

The process is repeated until convergence. More details about the application of the LSA and the solution of the overdetermined system of equations can be found in [8].

2. Least Square Adjustment combined with exhausted search

Unfortunately the method as described in the previous section does not seem to converge to the right solution or converge at all. Usually the LSA has quadratic convergence meaning that the correct decimal digits double at every iteration. But in this case extensive tests with simulated data showed that the convergence was linear or none at all, which strongly suggests that the variables are not (completely) independent. Indeed, an error in the measurements which enlarges the distances has the same effect as a larger speed of sound.

In order to remedy the problem, one of the (somewhat) dependent variables has to be eliminated and the obvious choice is factor p . Assuming that p is known the system of equation is reduced to:

$$g_i(x, y, z) = pD_i$$

Similarly, if a good approximation (x_k, y_k, z_k) is known, then a better approximation is computed as:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x, \quad y^{k+1} = y^k + \Delta y, \quad z^{k+1} = z^k + \Delta z$$

where $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ are computed by the solution of the system:

$$\begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \Delta g_2 \\ \vdots \\ \Delta g_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial y} & \frac{\partial g_1}{\partial z} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial y} & \frac{\partial g_2}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x} & \frac{\partial g_n}{\partial y} & \frac{\partial g_n}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \quad \Delta g_i = pD_i - g_i(x^k, y^k, z^k)$$

Theoretically, factor p can be computed by a numerical minimisation method such as the golden section method. However, extensive tests with simulated data showed that there are local minima which trap the numerical minimisation methods. Thus the exhaustive search algorithm is used, meaning that all possible values of p

are checked and the one that gives the least error is selected. Usually the speed of sound does not vary more than 10% and thus the possible values of p are between 0.9 and 1.1. Extensive numerical experimentation showed that trying all the values of p with step 0.005 and taking the one which gives the least error is sufficient to trigger convergence of the numerical minimisation method to the best value.

3. First approximation

The non-linear LSA demands good first approximation of the coordinates of the sound source in order to converge. It can be found by the intersection of a small number of spheres centred at the sensors (microphones). Every set of 3 spheres has two solutions of the intersection, which implies that a 4th sensor is needed to determine which of the two solutions is correct. Thus any set of 4 sensors can produce a first approximation. Due to unavoidable errors in the data acquisition and the topology of the sensors, some spheres may not intersect at all, for example when their centres are collinear. Or if they intersect, the distance to a fourth sensor may indicate (due to errors) that the wrong point is the source. In order to compute a robust first approximation, the sound source is computed by multiple random triplets of sensors and the average is computed. More details about the robust first approximation can be found in [8] [9].

4. Application and discussion

The method was implemented in Python and it was integrated to an open source CAD [10] for user friendliness, convenience and efficiency. A large number of geometries with simulated data was solved. Each geometry is described by a set of 4 parameters. The first parameter is the average distance from the sound source to the sensors (microphones), which was taken 10, 50 and 100 m. The second parameter is the number of sensors, which was taken 10, 20, 50 and 100. The third parameter is the apriori error of the measured distances which is due to the error of the time that the sound reached the sensors. This parameter took values 0.34, 3.40, 17.00 and 34.00 m, which correspond to 1, 10, 50 and 100 msec respectively. The fourth parameter is the speed of sound coefficient $p=V/V_{20}$ which took values 0.91 and 1.09. Due to the stochastic nature of the distances to the sensors, 3 geometries were solved for each set of parameters. All in all over 250 geometries were solved. In tables 4.1 – 4.3 the results for all cases with $p=0.91$ are shown. Taking into account the average for the 3 geometries per each set of parameters, it is noticed that the aposteriori localisation error increases as the apriori error ϵ of the distances increases. It generally ranges between ϵ and $\epsilon/2$. On the other hand the aposteriori localisation error decreases as the number of sensor increases. The error of the speed of sound also increases as the apriori error ϵ increases. Generally the error in the distances affects the error in the speed of sound, up to about 7%. Similar results were found for all geometries with $p=1.09$.

Table 4.1 Localisation and speed error for average distance 10m and speed coefficient $p=0.91$

Localisation error (m)					Speed Error (%)				
apriori error	Microphones				apriori error	Microphones			
	10	20	50	100		10	20	50	100
0,34	0,5	0,5	0,3	0,3	0,34	1,5%	1,0%	1,0%	0,5%
0,34	0,4	0,4	0,5	0,3	0,34	1,0%	1,5%	1,5%	0,5%
0,34	0,4	0,3	0,4	0,2	0,34	1,0%	0,0%	1,0%	1,0%
3,4	3,1	1,4	1,7	3,3	3,4	8,5%	3,5%	3,0%	7,0%
3,4	4,7	2	2	0,6	3,4	0,5%	1,0%	4,0%	4,5%
3,4	4,3	1,3	3,1	2,4	3,4	10,5%	4,5%	10,0%	1,0%

Table 4.2 Localisation and speed error for average distance 50m and speed coefficient $p=0.91$

Localisation error (m)					Speed Error (%)				
apriori error	Microphones				apriori error	Microphones			
	10	20	50	100		10	20	50	100
0,34	0,9	1	0,4	0,4	0,34	1,0%	1,0%	0,0%	0,5%
0,34	1	0,7	0,4	0,6	0,34	0,0%	0,5%	0,5%	0,5%
0,34	0,8	0,8	0,6	0,6	0,34	1,0%	0,0%	0,0%	0,5%
3,4	3,7	1,9	5,2	0,6	3,4	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
3,4	2,7	3,1	2,5	3,1	3,4	1,5%	3,5%	1,0%	1,0%
3,4	1,2	2,2	3,8	3,6	3,4	0,5%	3,0%	1,0%	4,5%
17	7,7	9,7	6,4	0,4	17	0,5%	2,5%	0,0%	1,5%
17	13,9	12,7	12,6	10,3	17	1,0%	1,5%	10,0%	2,5%
17	15,2	6,9	2,1	7,8	17	0,5%	0,0%	0,5%	8,0%
34	15,2	37,2	17	23,7	34	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
34	30,1	17,6	16,5	15,4	34	0,0%	1,0%	0,5%	1,0%
34	18,7	31,7	24,4	19,3	34	0,5%	4,5%	1,0%	1,0%

Table 4.3 Localisation and speed error for average distance 100m and speed coefficient $p=0.91$

Localisation error (m)					Speed Error (%)				
apriori error	Microphones				apriori error	Microphones			
	10	20	50	100		10	20	50	100
0,34	0,4	0,3	0,5	0,7	0,34	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
0,34	2,4	0,4	0,1	1,1	0,34	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
0,34	1,6	0,9	0,2	2,4	0,34	0,5%	0,5%	0,0%	1,0%
3,4	2,3	4,9	4,9	1,1	3,4	1,0%	0,0%	1,0%	0,5%
3,4	2,8	3,5	2,2	3	3,4	2,0%	2,0%	1,0%	1,5%
3,4	4,5	5,3	4,9	4,2	3,4	1,0%	0,5%	0,5%	0,5%
17	20,1	10,6	13,9	6,9	17	1,0%	6,0%	2,5%	2,0%

17	37,1	12,4	13,7	16,8
17	23,4	10	8,9	11,7
34	40,6	22,9	18,4	33,1
34	39,1	18,1	10,1	17,6
34	39,3	14,3	9,7	22,3

17	9,0%	3,0%	6,0%	1,0%
17	7,0%	0,5%	0,0%	2,5%
34	1,0%	3,0%	9,0%	5,5%
34	1,5%	0,5%	3,0%	2,0%
34	4,5%	0,0%	0,0%	7,5%

In order to find out how the error in the speed of sound affects the localisation error, tables 4.4 – 4.6 show the results for all cases with $p=1$ (no apriori error in the speed of sound).

Table 4.4 Localisation for average distance 10m ($p=1.00$)

apriori error	Microphones			
	10	20	50	100
0,34	0	0	0	0
0,34	0	0	0	0
0,34	0,1	0	0	0
3,4	0,8	0,5	0	0
3,4	0,3	0,1	0	0
3,4	0	0,3	0,1	0

Table 4.5 Localisation for average distance 50m ($p=1.00$)

apriori error	Microphones			
	10	20	50	100
0,34	0	0	0	0
0,34	0	0	0	0
0,34	0	0	0	0
3,4	0	0,3	0,1	0,1
3,4	0,3	0,5	0,2	0,1
3,4	0,6	0,3	0,1	0,1
17	0,9	5,1	0,5	0,2
17	0,3	0,7	0,5	0,3
17	0,3	0,9	0,6	0,2
34	7,7	0,2	0,6	0,1
34	14,8	11,7	7,6	0,8
34	0,5	3,6	1,6	0,2

Table 4.6 Localisation for average distance 100m ($p=1.00$)

apriori error	Microphones			
	10	20	50	100
0,34	0	0	0	0
0,34	0	0	0	0
0,34	0,1	0	0	0
3,4	0,3	0,4	0,1	0,1
3,4	0	0,4	0,1	0
3,4	0,1	0,3	0,1	0
17	5,9	0,8	1	0,1
17	6,5	1,2	0,8	0
17	6,2	3,8	0,7	0
34	7	9,2	0,7	0,8
34	6	5,4	7,3	0,8
34	5,8	12,2	8,5	0,3

Comparing these tables to the previous tables 4.1 – 4.3, it is noticed that the apriori error of the speed of sound affects significantly the localisation error. If the speed of sound is known with accuracy, the aposteriori localisation error is reduced to $\epsilon/3$ or even less.

5. Conclusions

A method for the computation of the location of the sound or noise source using multiple microphones was presented. The method yields satisfactory accuracy, more or less proportional to the apriori error, for the localisation of the sound source and the indirect computation of speed of sound.

However if the speed of sound is directly computed through other means, the accuracy of the localisation is significantly better.

6. References

- [1] D.V. Rabinkin, R.J. Renomeron, A.J. Dahl, J.C. French, J.L. Flanagan and M. Bianchi «DSP implementation of source location using microphone arrays» in *Proceedings SPIE*, 2846, 88–99 (1996).
- [2] H.F. Silverman, W.R. Patterson, J.L. Flanagan and D. Rabinkin «A digital processing system for source location and sound capture by large microphone arrays» in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-97)*, Munich, Germany, 1, 251–254 (1997).
- [3] P.S. Chang, A. Ning, M.G. Lambert and W.J. Haas *Acoustic source location using a microphone array* US Patent 6,469,732 (2002).
- [4] C. Zhang, D. Florencio, D.E. Ba and Z. Zhang «Maximum Likelihood Sound Source Localization and Beamforming for Directional Microphone Arrays in Distributed Meetings» *IEEE Transactions on Multimedia*, **10** 3, 538–548 (2008).
- [5] H.F. Silverman and E.K. Stuart «A two-stage algorithm for determining talker location from linear microphone array data» *Computer Speech & Language*, **6** 2, Pages 129–152 (1992).
- [6] S. Gerges and W. Fonseca Beamforming «Technique for Noise Source Identification» in *6th International Conference on Experiments / Process / System Modelling / Simulation / Optimization*, Athens, Greece, 8–1 July (2015).
- [7] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- [8] A.A. Stamos, D.I. Vassilaki, I. Tzouvadakis, C. Zygouras and E. Vougioukas «Localisation of sound source using multiple microphones» in *23rd International Congress on Sound & Vibration (ICV23)*, Athens, Greece, 10–14 July (1997).
- [9] Wikipedia contributors *Trilateration* Online available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trilateration&oldid=721359577> (2016).
- [10] A.A. Stamos «ThanCad: a 2dimensional CAD for engineers» in *Proceedings of the Europython2007 Conference*, Vilnius, Lithuania (2007)

Συνεδρία Α9: Εκπαίδευση & Ακουστική

Διερεύνηση παραμέτρων οπτικής και ακουστικής άνεσης σε κτίρια εκπαίδευσης

Σόνια-Άννα Γκούντα sgounta@gmail.com (1),
Μαργαρίτα Κυανίδου margkyan21@gmail.com (1),
Ιωάννα Μανώλη janeman2991@gmail.com (1),
Νίκος Μπάρκας nbarkas@arch.duth.gr (2)
(1) Αρχιτέκτων Μηχανικός,, (2) Καθηγητής
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η αξιολόγηση της οπτικής και ακουστικής άνεσης των σχολικών αιθουσών με στόχο την ανάδειξη τρόπων βελτίωσης των συνθηκών του σχολικού περιβάλλοντος. Το δείγμα της έρευνας αφορά δώδεκα (12) κτίρια της Πρωτοβάθμιας Εκπαίδευσης (δύο αντιπροσωπευτικές αίθουσες σε κάθε κτίριο), σε τρεις (3) ελληνικές πόλεις (Εδεσσα, Θεσσαλονίκη, Ξάνθη). Η έρευνα περιλαμβάνει συλλογή στοιχείων, μετρήσεις στάθμης θορύβου και φυσικού φωτισμού, καταγραφές οικοδομικών δεδομένων, υπολογισμούς και ανάλυση ευρημάτων σε πίνακες / διαγράμματα. Η επιλογή του δείγματος της έρευνας πραγματοποιήθηκε με κριτήρια τη διασπορά των σχολικών μονάδων στον αστικό ιστό, τον προσανατολισμό, την τυπολογία των κτιρίων και το έτος κατασκευής τους (σε σχέση με την εκπόνηση και εφαρμογή των κανονισμών).

Investigation of visual and acoustic comfort in educational buildings

ABSTRACT

The purpose of this paper is the evaluation of visual and acoustic comfort in classroom settings, aiming to the improvement of the school environment. The study includes observations on a sample of twelve (12) Primary school buildings in three (3) Greek cities (Edessa, Thessaloniki, Xanthi). In each school two representative classrooms were selected. Data collection comprised noise level and natural lighting measurements. Data was analysed by means of calculations and the analysis of the findings is presented in tables / graphs. The choice of the research sample was held by the following criteria; the dispersion of school buildings in the urban net, their orientation, the typology of the buildings and the year of their construction (in relation to the elaboration and the application of the regulations).

Εισαγωγή

Σε επίπεδο βιωσιμότητας, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός αξιολογείται σύμφωνα με το βαθμό αξιοποίησης και ενσωμάτωσης των στοιχείων του περιβάλλοντος στην κατασκευή των οικισμών και των κτιρίων (μορφολογία, κλίμα, προσανατολισμός, βλάστηση). Ιδανικός στόχος είναι η κατασκευή κτιρίων απόλυτα ενσωματωμένων στο τοπικό περιβάλλον καθώς και η δημιουργία ενός βιώσιμου εσω-κλίματος που θα εξασφαλίζει τις βέλτιστες συνθήκες άνεσης. Τα εκπαιδευτήρια αποτελούν μία ειδική κατηγορία κτιρίων με συγκεκριμένη χρονική και εποχιακή χρήση (από Σεπτέμβριο μέχρι Ιούνιο, κυρίως τις πρωινές ώρες). Επειδή εκπαιδευόμενοι / εκπαιδευτές περνούν εκεί μεγάλο διάστημα της ημέρας τους, οφείλουν να παρέχουν ένα ευχάριστο περιβάλλον που να ευνοεί την εκπαιδευτική διαδικασία: μια ισορροπημένη σύνθεση που να παρέχει την κατάλληλη εργονομία, οπτική και ακουστική άνεση.

Οι σύγχρονες παιδαγωγικές μέθοδοι ενθαρρύνουν την ενεργητική συμμετοχή των μαθητών στο μάθημα, το διάλογο και τις συνεργατικές δραστηριότητες. Όμως, για να επιτευχθούν αυτές οι εκπαιδευτικές διαδικασίες, ο σύγχρονος αρχιτεκτονικός σχεδιασμός των εκπαιδευτηρίων έχει να επιλύσει προβλήματα διάταξης και οπτικής - ακουστικής άνεσης. Σε ένα πρώτο επίπεδο, η αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας συνδέεται με τις στάθμες του φυσικού φωτισμού και της ηχητικής ανάδυσης του ωφέλιμου σήματος (σε συνάρτηση με τις αντίστοιχες εξωτερικές στάθμες). Ωστόσο, σε ένα δεύτερο επίπεδο προσέγγισης, η οπτική άνεση εξαρτάται από την κατανομή του φυσικού φωτός, ενώ η ακουστική άνεση από την αντήχηση και την καταληπτότητα του λόγου στο εσωτερικό των αιθουσών. Η αξιολόγηση αυτών των συνθηκών οδηγεί στη διερεύνηση κρίσιμων αρχιτεκτονικών / οικοδομικών παραμέτρων όπως : προσανατολισμός και χωροθέτηση του κτιρίου, αναλογία διαφανών / συμπαγών πετασμάτων στο κέλυφος, ανεκτές διαφορές εσωτερικής / εξωτερικής στάθμης φωτισμού (DLF, για την αποφυγή θάμβωσης), οι ανακλαστικές ιδιότητες των εσωτερικών επενδύσεων, τα επίπεδα εξωτερικών και λειτουργικών θορύβων (ηχομονωτική ικανότητα διαχωριστικών, ηχοπροστασία κελύφους) καθώς και ο έλεγχος της αντήχησης (όγκος κι εσωτερικές επενδύσεις). Όπως έχει δημοσιοποιηθεί σε διάφορες σχετικές έρευνες, οι μεγάλες αναλογίες διαφανών πετασμάτων, η χαμηλή ηχομονωτική ικανότητα των κτιρίων και η έλλειψη ηχοαπορροφητικών εσωτερικών επενδύσεων (για λόγους ασφάλειας ή οικονομίας), υποβιβάζει καταλυτικά την οπτική και ακουστική άνεση στις σχολικές αίθουσες. [1], [2]

1. Προδιαγραφές φωτισμού και ακουστικής άνεσης σε σχολεία

Στον «Οδηγό Βιοκλιματικού Σχεδιασμού Σχολικών Κτιρίων» καταγράφονται οδηγίες, κατευθύνσεις και τεχνικές λύσεις για το βιοκλιματικό σχεδιασμό των σχολικών κτιρίων όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης. Στις οδηγίες περιλαμβάνονται ο προσανατολισμός και η χωροθέτηση των σχολικών κτιρίων, ο φυσικός φωτισμός και αερισμός τους, η ηλιοπροστασία, οι μονώσεις και τα υλικά κατασκευής τους. [3] Η χωροθέτηση των σχολικών κτιρίων θα πρέπει να εξασφαλίζει αύλειο χώρο προστατευμένο από το βορρά και καλό φωτισμό των αιθουσών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ευνοϊκός προσανατολισμός για τη διάταξη των αιθουσών στο

εσωτερικό του κτιρίου (ανάλογα με το οικόπεδο και τα προβλήματα ηχοπροστασίας από το περιβάλλον) θεωρείται ο νότιος (με την προϋπόθεση να προστατευτούν οι αίθουσες από τον άμεσο ηλιασμό) και ο βόρειος (επειδή προσφέρει σταθερές συνθήκες έμμεσου φωτισμού όλη την ημέρα). [4]

Στόχος του σχεδιασμού σχολικών κτιρίων είναι η διαμόρφωση κατάλληλων ανοιγμάτων για την επάρκεια και την ομαλή κατανομή του φωτός μέσα στις αίθουσες. Μολονότι για τις στάθμες φωτισμού αναφέρονται συγκεκριμένες προδιαγραφές (στο επίπεδο εργασίας : 300-350 lux στις τάξεις, 500-550 lux στα εργαστήρια και 300 lux στις βιβλιοθήκες), για τις ηχητικές στάθμες δεν υπάρχουν ανάλογες συστάσεις. Παράλληλα, αναφέρεται ως επιτακτική ανάγκη η βελτίωση και διαχείριση της βιοκλιματικής κατάστασης των ήδη υφιστάμενων σχολικών κτιρίων, για την ισχυροποίηση της θερμικής αδράνειας (ενίσχυση κελυφός). [3], [4]

Γενικά, στόχος της ηχοπροστασίας είναι να εξασφαλιστούν σε δεδομένο χώρο (κτίριο ή υπαίθριο τόπο) οι απαραίτητες προϋποθέσεις ενός (κατά περίπτωση) κατάλληλου ακουστικού σχεδιασμού, ενώ στόχος της ακουστικής των ειδικών χώρων είναι η ρύθμιση των συνεπειών της ηχοδιάδοσης. Σχετικά, ενδείκνυται η ελάττωση της έντασης του θορύβου και η ακουστική διόρθωση του χώρου (έλεγχος της αντήχησης), ώστε να εξασφαλιστεί η εύρυθμη επικοινωνία μεταξύ μαθητών και εκπαιδευόμενων / εκπαιδευτών. [5], [6] Ο Κτιριοδομικός Κανονισμός (άρθρο 12) ορίζει σαφή αριθμητικά κριτήρια για τρεις κατηγορίες ακουστικής άνεσης σχολικών κτιρίων, αναφορικά με την ηχομονωτική ικανότητα των εσωτερικών διαχωριστικών και του κελύφους (σε αερόφερτο και κτυπογενή θόρυβο). [7] Το σχέδιο – πρόταση του ΕΛΙΝΑ για έναν νέο Κανονισμό Κτιριακής Ηχοπροστασίας ορίζει αντίστοιχα πέντε κατηγορίες ακουστικής άνεσης και ένα μεγαλύτερο σύνολο κριτηρίων, με διαβαθμισμένες αριθμητικές τιμές στόχου (ηχομονωτική ικανότητα μεταξύ χώρων κύριας χρήσης - κοινόχρηστων και ειδικών χρήσεων, ηχομονωτική ικανότητα των θυρών εισόδου, προστασία από περιβαλλοντικούς θορύβους και από θορύβους κοινόχρηστων / ιδιωτικών εγκαταστάσεων). [8]



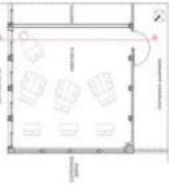


2. Η μεθοδολογία της έρευνας

Το συνολικό δείγμα της έρευνας περιλαμβάνει δώδεκα (12) δημόσια Δημοτικά Σχολεία στην Έδεσσα, τη Θεσσαλονίκη (Καλαμαριά) και την Ξάνθη (τέσσερα σε κάθε πόλη), που επιλέχθηκαν με κριτήρια τον προσανατολισμό, την τυπολογία και το έτος κατασκευής. Οι ερευνητικές επισκέψεις και μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τους μήνες Φεβρουάριο/ Μάρτιο 2015, κατά τη διάρκεια πρωινών και μεσημβρινών ωρών, αφού εξασφαλίστηκαν οι άδειες πρόσβασης. Η διαδικασία της έρευνας περιελάμβανε :

α) φωτογραφική και σχεδιαστική αποτύπωση των αιθουσών του δείγματος, καταγραφή των χαρακτηριστικών κάθε αίθουσας (εσωτ. επενδύσεις, εξοπλισμός),

β) στάθμιση των εξωτερικών επιπέδων θορύβου - φυσικού φωτισμού στο προαύλιο κάθε μονάδας (στη διάρκεια διαλείμματος), διπλές μετρήσεις της στάθμης θορύβου - φυσικού φωτισμού σε κάθε αίθουσα (με ή χωρίς τη χρήση εσωτερικών σκιάστρων σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας και σε συνθήκες ησυχίας, δηλαδή με την παρουσία μαθητών/τριών κατά τη διάρκεια της διδασκαλίας),

γ) αξιολόγηση των κατά περίπτωση φωτιστικών και ακουστικών δεδομένων.

ΔΙΟΡΓΑΝΙΣΤΗΡΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ		ΕΡΕΥΝΗΤΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ-ΔΙΑΔΕΙΞΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ		ΔΕΛΤΙΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΔΗΜΟΤΙΚΩΝ
ΣΧΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ 12ο Δημοτικό Σχολείο Καλαμαριάς		ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ		ΦΩΤΟ ΑΙΘΟΥΣΑΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ	Πόντος 220	Πρόκειται για ένα διώροφο κτίριο σε διάταξη αΓ, που γεφυρώνει ΒΔ, με το Άκρο της Νέας Κρήνης. Η είσοδος επανέρχεται ΒΔ (όδus Πόντου, γωνία της κωλοσοφίας). ΝΔ βρίσκεται το 3ο Γυμνάσιο - Λύκειο Καλαμαριάς και Α. νοτιοανατολικά, Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα Γ2.		
ΠΕΡΙΟΧΗ	Νέα Κρήνη, Καλαμαριά			
ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	1984			
ΤΥΠΟΣ ΣΧΟΛΕΙΟΥ	Ολοήμερο, Ε.Δ.Ε.Π.			
ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ				
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ (ΜΗΚΟΣ-ΒΑΘΟΣ) (m)	7,165 - 7,64	ΤΥΠΟΣ ΥΑΛΙΝΩΝ ΑΚΩΝ	Διαδοί	
ΚΑΘΑΡΟ ΥΨΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ (m)	3,5	ΦΕΓΓΙΤΕΣ	ΝΑΙ (4)	
ΕΜΒΛΩΝ ΑΙΘΟΥΣΑΣ (m ²)	54,74	ΠΡΟΣΤΕΓΑΣΜΑΤΑ ΕΣΩΤΕΣ	ΝΑΙ (33 ακ.)	
ΕΠΦΑΝΕΙΑ ΕΞΩΤ. ΤΟΙΧΟΥ ΚΑΙ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ (m ²)	25,97	ΠΑΛΥΡΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΧΕΣ	ΝΑΙ (33 ακ.)	
ΕΠΦΑΝΕΙΑ ΕΣΩΤ. ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ (m ²)	6,55	ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	ΟΧΙ	
ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΦΑΝΩΝ-ΔΙΑΦΑΝΩΝ	26,12%	ΕΞΗΤΕΡΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ (ΑΥΛΗ) (lm)	1037	
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ	Βορειοανατολικός	ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ (ΠΑΡΑΘΥΡΟ) (lm)	546	
ΥΑΙΚΟ ΚΑΙ ΤΥΠΟΣ ΕΣΩΤ. ΚΟΥΦΩΜΑΤΩΝ	Αλουμίνιου, Σιφονιέρα	ΕΞΗΤΕΡΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ (ΜΕΣΟ ΑΙΘ.) (lm)	226	
ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΗΧΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ				
ΠΗΓΕΣ ΟΧΛΗΣΗΣ	3ο Γυμνάσιο - Λύκειο Καλαμαριάς	ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΗΧΟΣΤΑΘΜΗ (ΗΜΕ ΚΟΣΜΟ) (dB)	67,8	
ΕΞΗΤΕΡΙΚΗ ΗΧΟΣΤΑΘΜΗ (ΑΥΛΗ) (dB)	74,1	ΕΞΗΤΕΡΙΚΗ ΗΧΟΣΤΑΘΜΗ (ΗΜΕ ΠΕΛΥΣΙΑ) (dB)	38,5	
ΥΑΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ ΚΤΙΡΙΟΥ				
ΦΕΡΟΝΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ	Προκατασκευασμένο μεταλλό-μυ-μύσηση	ΔΑΠΕΔΟ	Μονοκόκο	
ΕΞΗΤΕΡΙΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ	Προκατασκευασμένο μεταλλό-μυ-μύσηση	ΟΡΟΦΗ	Προκατασκευασμένο μεταλλό-μυ-μύσηση	
ΕΞΗΤΕΡΙΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ	Ομοτόλιθοδομή	ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΚΟΥΦΩΜΑΤΑ	Μεταλλικά	
ΛΑΜΠΙΡΕΣ				
ΤΥΠΟΣ ΛΑΜΠΙΡΩΝ	Φθοροσκόπο	ΣΥΣΤΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	Καλοριφέρ (αεραζώοτο)	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΛΑΜΠΙΡΩΝ	16 (1-1,20 μ.)	ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ	Ανεμιστήρες οροφής	
ΣΧΟΛΙΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ				
ΥΠΟΣ ΟΡΓΑΝΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΧΟΥ: 1,20 μ.				
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 23/1/15				
ΩΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: 08:50				
ΣΥΝΘΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ: ΣΥΝΘΕΤΙΑ, ΑΣΘΕΝΗΣ, ΒΡΟΧΗ				

Σχίμα 2.11 Πρώτη καρτέλα καταγραφής αίθουσας 12⁰⁰ Δημ. Σχολείου Καλαμαριάς

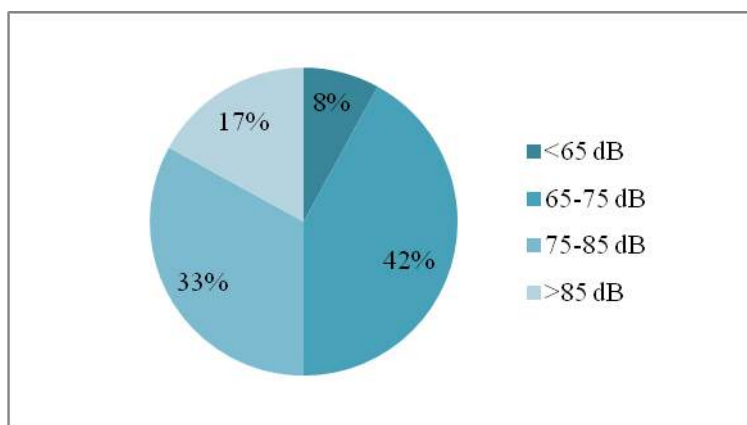
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με εκπαιδευτικά εργαλεία (φωτόμετρο και ηχώμετρο) από τον εργαστηριακό εξοπλισμό του TAM-ΔΠΘ. Για την παρουσίαση των ερευνητικών δεδομένων σχεδιάστηκε μια πρωτότυπη καρτέλα καταγραφής (ενδεικτικό παράδειγμα στο Σχήμα 2.1, όπου για κάθε αίθουσα του δείγματος καταγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα σχέδια αποτύπωσης, καθώς και διάφορες παρατηρήσεις). Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν ανά πόλη και σφαιρικά στο σύνολο του δείγματος. Στις επιμέρους παραμέτρους της έρευνας περιλαμβάνονται:

- α) τα επίπεδα θορύβου και φωτισμού στις αυλές,
- β) η κατανομή των επιπέδων θορύβου - φωτισμού στο εσωτερικό των αιθουσών σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας (αλλά και εκτός λειτουργίας),
- γ) τα υπολογισμένα επίπεδα επιρροής των λειτουργικών θορύβων στην εσωτερική ησυχία των αιθουσών (διαφορές στάθμης εντός / εκτός λειτουργίας),
- δ) η υπολογισμένη ηχομονωτική ικανότητα των κελυφών (διαφορές στάθμης θορύβου στην αυλή και σε κάθε αίθουσα εκτός λειτουργίας). [9]

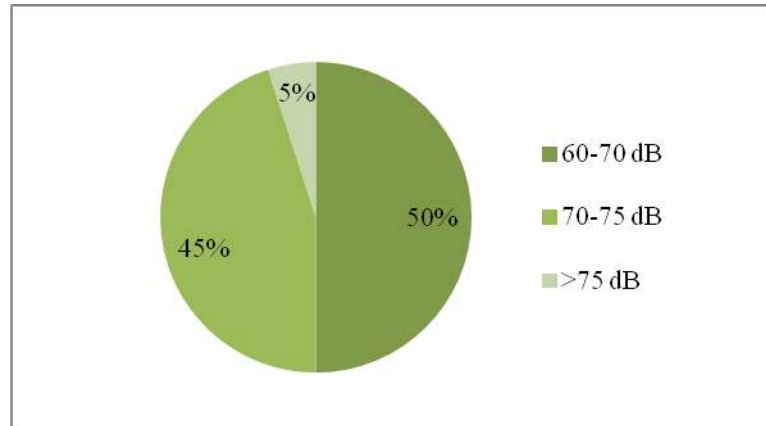
3. Ανάλυση ηχομετρήσεων

Για λόγους οικονομίας χώρου, στην παρούσα ανακοίνωση παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα της έρευνας που αφορούν το θόρυβο. Ο θόρυβος σε κάθε σχολική αίθουσα του δείγματος μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του μαθήματος σε άδεια και γεμάτη αίθουσα (σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά και σε ήσυχες συνθήκες με την παρουσία μαθητών/τριών). Στην αυλή κάθε σχολείου έγινε μία (1) ηχομέτρηση την ώρα του διαλείματος (με την παρουσία παιδιών).

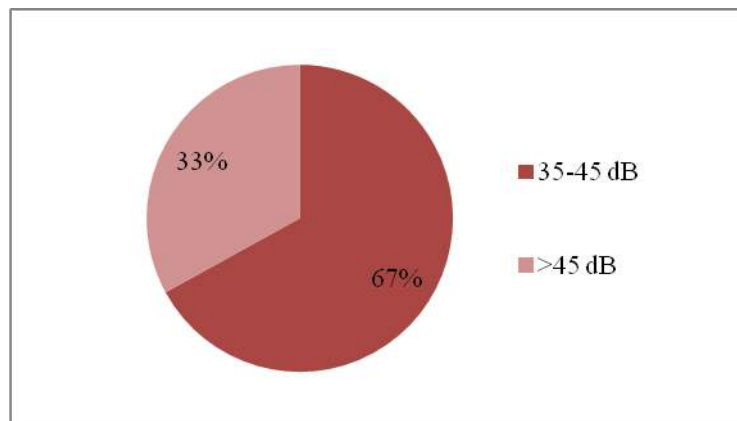
Όπως αποδεικνύεται από τα ευρήματα της έρευνας, η ακουστική (αλλά και η οπτική) άνεση των σχολικών αιθουσών του δείγματος κυμαίνονται σε σχετικά αποδεκτά όρια ($L_o = 60 - 80\text{dB}[A]$, σε ποσοστό 83% του δείγματος), χάρη στο σχετικά ήσυχο (μη επιβαρημένο), αστικό περιβάλλον των πόλεων της ελληνικής περιφέρειας. Οι βασικές πηγές ηχητικής όχλησης είναι η οδική κυκλοφορία (σε περιπτώσεις γειτνίασης με δρόμους πυκνής κυκλοφορίας) ή τα ίδια / γειτονικά εκπαιδευτήρια (φωνές κατά τα διαλείματα και υπαίθρια γυμναστική).



Σχήμα 3.12 Διαβαθμίσεις επιπέδων θορύβου (dB[A]) στις αυλές των σχολείων



Σχήμα 3.2 Διαβαθμίσεις επιπέδων θορύβου (dB[A]) στις αίθουσες, σε λειτουργία



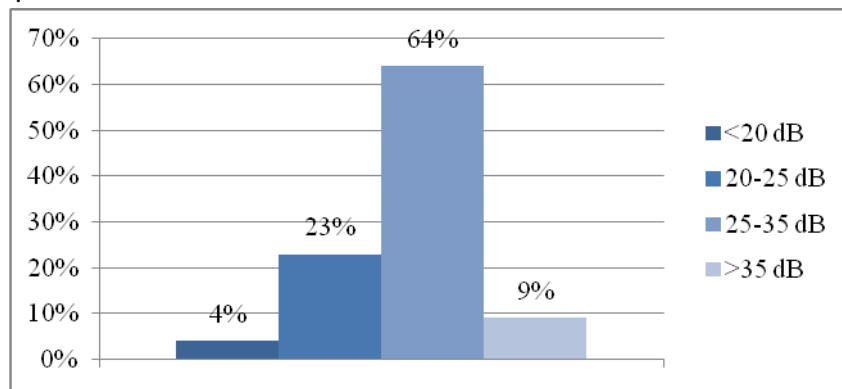
Σχήμα 3.3 Διαβαθμίσεις επιπέδων θορύβου (dB[A]) στις αίθουσες, εκτός λειτουργίας

Το επίπεδο ηχοπροστασίας των κτιρίων βρίσκεται σε σχετικά ικανοποιητικό επίπεδο (στάθμες 35 - 50dB[A], αντιστοιχία με NC- 25 / 40), χάρη στο σχετικά ήσυχο ηχητικό περιβάλλον.

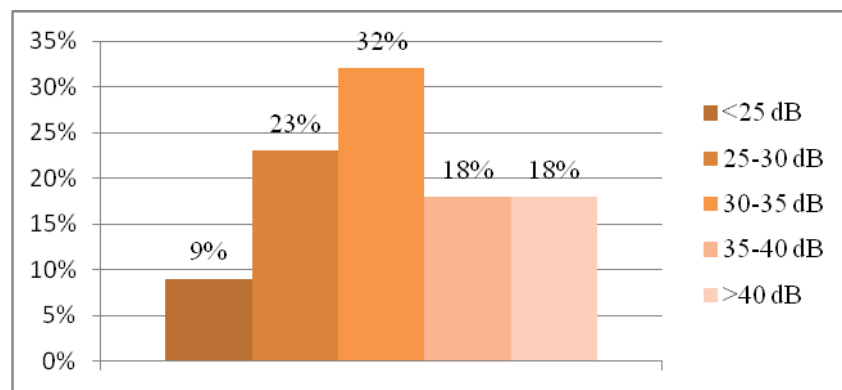
Οι αντίστοιχες στάθμες θορύβου στο εσωτερικό των αιθουσών κυμαίνονται σε καλά ως αποδεκτά επίπεδα (σε συνθήκες ησυχίας $L_1 = 35 - 45\text{dB[A]}$ σε ποσοστό 67% του δείγματος και σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας $L_L < 70\text{dB[A]}$ σε ποσοστό 50% του δείγματος).

4. Συμπεράσματα

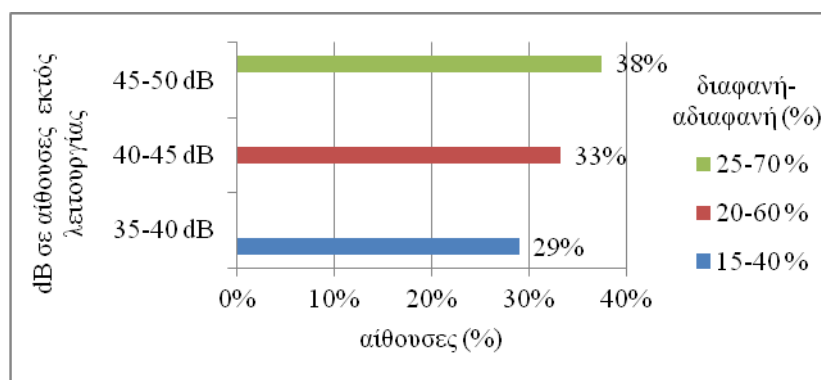
Το εύρος των ηχητικών εντάσεων στις αίθουσες (λειτουργικοί / εξωτερικοί θόρυβοι) θεωρείται αποδεκτό (63 – 83dB[A]) με ελάχιστες εξαιρέσεις.



Σχήμα 4.1 Διαφορές στάθμης θορύβου dL (dB) κατά τη λειτουργία των αιθουσών



Σχήμα 4.2 Διαφορές στάθμης θορύβου dR (dB) - σφαιρική ηχομονωτική ικανότητα



Σχήμα 4.3 Συσχέτιση ποσοστών διαφανών-αδιαφανών τμημάτων (της κύριας όψης των αιθουσών) με τα επίπεδα θορύβου (dB[A]) σε συνθήκες εκτός λειτουργίας

Ωστόσο, η σφαιρική ηχομονωτική ικανότητα των αιθουσών κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα ($R_w = 18 - 35\text{dB}$, σε ποσοστό 64% του δείγματος).

Κρίσιμος παράγοντας της σφαιρικής ηχομονωτικής των αιθουσών αποδεικνύεται πως είναι η αναλογία διαφανών / συμπαγών πετασμάτων: όσο τα διαφανή στοιχεία της όψης περιορίζονται σε αναλογίες μεταξύ 1/6 και 1/3 (ποσοστό 29% του δείγματος), το ευδιάκριτο κέρδος της εσωτερικής ησυχίας (περιορισμός της όχλησης) κυμαίνεται από 5 ως 10dB. Αυτή η διαπίστωση καθιστά κρίσιμη τη φάση του αρχικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού των εκπαιδευτηρίων, αλλά αποδεικνύει επίσης, ότι στις περιπτώσεις όπου για εξοικονόμηση ενέργειας έγινε αντικατάσταση των παλιών εξωτερικών κουφωμάτων, είναι εφικτή η σφαιρική αναβάθμιση του εσω-κλίματος των σχολικών αιθουσών (ενεργειακή και ηχητική αναβάθμιση εκ παραλλήλου).

Τέλος, οι στάθμες λειτουργίας, σε ώρα μαθήματος, είναι σχετικά ευδιάκριτες ($dL > 25\text{dB}$, σε ποσοστό 73% του δείγματος), εξέλιξη που δείχνει ότι χρειάζεται η ευαισθητοποίηση των μαθητών /τριών στις συνέπειες του θορύβου κατά την εκπαιδευτική διαδικασία.

5. Αναφορές

[1] Ελ. Αθανασιάδου - Μ. Μπούση - Ξ. Πάστερνακ - Ν. Μπάρκας «*Συνδυαστική διερεύνηση παραμέτρων αξιολόγησης οπτικών και ακουστικών ανέσεων σε σχολικά κτίρια της Ξάνθης*», Πρακτικά 6ου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ «*Ακουστική 2012*», Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα, (2012).

[2] M. Dudek, *Schools and Kindergartens: A Design Manual*, Birkhäuser Architecture, Boston, (2007).

[3] Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων (ΟΣΚ): *Οδηγίες Βιοκλιματικού Σχεδιασμού Σχολικών Κτιρίων*, Αθήνα, (2008).

[4] Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων: *Οδηγός Μελετών για Διδακτήρια όλων των Βαθμίδων Εκπαίδευσης*, Αθήνα, (2008).

[5] Χρ. Αθανασόπουλος, *Κατασκευή κτιρίων - σύνθεση και τεχνολογία*, Αθήνα, (2007).

[6] Ν. Τσινίκας, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων* University Studio Press, Θεσσαλονίκη, (2005).

[7] *Κτιριοδομικός Κανονισμός* (άρθρο 12) ΦΕΚ Δ59/3-2-1989.

[8] Ομάδα εργασίας ΕΛΙΝΑ *Σχέδιο, ελληνικός κανονισμός κτιριακής ηχοπροστασίας*, Αθήνα, (2010).

[9] Σ.Α. Γκούντα - Μ. Κυανίδου - Ι. Μανώλη, *Διερεύνηση τεχνολογικών παραμέτρων σε κτίρια εκπαίδευσης*, Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική Έρευνα – Διάλεξη, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη, (2015).

Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα ένα εκπαιδευτικό διαδραστικό ηχητικό περιβάλλον

Εμμανουήλ Ροβίθης Διδάκτωρ Ιονίου Πανεπιστημίου Μαρκορά 63, Αθήνα emrovithis@gmail.com	Φιόρη-Αναστασία Μεταλληνού Διδάκτωρ Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης Λόφος των Νυμφών, Αθήνα fiori.metallinou@gmail.com	Ανδρέας Φλώρος Αναπληρωτής Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου Πλατεία Τσιριγώτη 7, Κέρκυρα floros@ionio.gr
--	--	---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Ψηφιακά διαδραστικά περιβάλλοντα χρησιμοποιούνται στις μέρες μας όλο και περισσότερο όχι μόνο για την ψυχαγωγία, αλλά και για την εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του χρήστη. Ως διαδραστικά **ηχητικά** περιβάλλοντα ορίζονται αυτά που χρησιμοποιούν ως βασικό φορέα της μεταδιδόμενης πληροφορίας τον ήχο, συνθήκη που αποδεδειγμένα προάγει τη μαθησιακή διαδικασία. Κατά το σχεδιασμό τους εφαρμόζονται τεχνικές ηχητικής αναπαράστασης δεδομένων, οι οποίες επιτρέπουν τη μετατροπή μη-ηχητικής πληροφορίας σε ηχητική, έτσι ώστε ο χρήστης να αντιλαμβάνεται το ψηφιακό περιβάλλον και να αλληλεπιδρά με αυτό μέσω της αίσθησης της ακοής. Στην παρούσα εισήγηση περιγράφονται αρχικά διαφορετικοί τρόποι, με τους οποίους η διαδικασία της ηχητικής αναπαράστασης έχει εφαρμοστεί σε επιστημονικά, μη-μουσικά δεδομένα που εφάπτονται του πεδίου της Αστρονομίας, και έπειτα προτείνεται η ψηφιακή εφαρμογή 'Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα', ένα διαδραστικό περιβάλλον που βασίζεται στην ακουστική αντίληψη του χρήστη, για να τον επιμορφώσει σχετικά με τη μεταβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου λόγω της ηλιακής δραστηριότητας.*

Hearing the Magnetic Storm an educational interactive audio environment

ABSTRACT

*Digital interactive environments are nowadays increasingly used not only for entertainment, but also for promoting education and awareness. Interactive **audio** environments employ sound as primary carrier of the conveyed information, a*

characteristic that has been proven to enhance the learning process. For their design sonification techniques are used, which facilitate the transformation of non-audio to audio data. Thus, users perceive the digital environment and interact with the system by focusing on their sense of hearing. This paper provides first a description of the ways, in which sonification has been applied on scientific, non-audio data in the field of Astronomy, and then proposes the digital application 'Hearing the Magnetic Storm', an interactive environment that relies on the users' aural perception in order to educate them on the transformation of Earth's magnetic field caused by the Sun's activity.

Εισαγωγή

Είτε πρόκειται για σοβαρά ηλεκτρονικά παιχνίδια, για εκπαιδευτικό λογισμικό ή για καλλιτεχνικές εγκαταστάσεις, τα ψηφιακά διαδραστικά περιβάλλοντα παρακινούν τον παίκτη/μαθητή/επισκέπτη να αναλάβει ενεργό ρόλο απέναντι στη γνώση και την εμπειρία [1], αναπτύσσοντας τις ικανότητες και ενισχύοντας τους γνωσιακούς μηχανισμούς του [2]. Παρέχουν άμεση αξιολόγηση των εισαγόμενων ενεργειών και ανατροφοδότηση του αποτελέσματος στον χρήστη [3] και προάγουν την εξάλειψη φυλετικών και δημογραφικών διαχωρισμών, καθώς και την καταπολέμηση της τεχνοφοβίας [4]. Παράλληλα, η αλληλεπίδραση μέσω του ήχου βοηθάει στη διατήρηση της προσοχής [5], στην ανάπτυξη της μνήμης [6] και στην κατανόηση και οργάνωση πολύπλοκων εννοιών [7]. Από τωντων των οπτικών ερεθισμάτων, σε αυξημένο ή ολοκληρωτικό βαθμό, ο χρήστης απαιτείται να συγκεντρωθεί στην πρόσληψη ηχητικών ερεθισμάτων δια της ακοής, διαδικασία που απελευθερώνει τη φαντασία [8] και προάγει την εμπύθιση στην εκτελούμενη ενέργεια [9]. Συνεπώς, τα ψηφιακά διαδραστικά ηχητικά περιβάλλοντα, στα οποία κύριος φορέας της πληροφορίας είναι ο ήχος, μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της επικοινωνίας ακουστικών, αλλά και επιστημονικών θεμάτων.

Οι εισηγητές της παρούσας εργασίας, βασιζόμενοι στα πειραματικά αποδεδειγμένα θετικά αποτελέσματα των ηχητικών εφαρμογών στην εκπαιδευτική διαδικασία, όπως αυτά καταγράφονται στις παραπάνω έρευνες, προτείνουν το εκπαιδευτικό διαδραστικό ηχητικό περιβάλλον *Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταγίδα*, ως μέσο επιμόρφωσης και ευαισθητοποίησης σχετικά με την ηλιακή δραστηριότητα και την επίδρασή της στο μαγνητικό πεδίο της γης. Για την υλοποίηση του έργου σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε ένα σύστημα ηχητικής αναπαράστασης δεδομένων, μέσω του οποίου τα επιστημονικά δεδομένα μεταφράστηκαν σε ηχητικά κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο ακροατής να ψυχαγωγείται και παράλληλα να αντιλαμβάνεται τα χαρακτηριστικά του φυσικού φαινομένου.

1. Ηχητική Αναπαράσταση Δεδομένων

1.1 Είδη Ηχητικής Αναπαράστασης

Στον πυρήνα των διαδραστικών ηχητικών περιβαλλόντων βρίσκεται η ηχητική αναπαράσταση δεδομένων, δηλαδή ένα σύστημα αντιστοίχισης μη-ηχητικής

πληροφορίας σε ηχητικές έννοιες και παραμέτρους. Το τυπικό μοντέλο ηχητικής αναπαράστασης περιλαμβάνει τρία στάδια: την εισαγωγή δεδομένων, την επεξεργασία και μετατροπή τους σε ηχητικό σήμα, και την εκπομπή του ήχου. Η σύγχρονη ζωή βρίθκει από παραδείγματα, όπου ο ήχος χρησιμοποιείται για τη μετάδοση από απλών μηνυμάτων, όπως το τέλος της φόρτισης του κινητού τηλεφώνου μέσω ενός σύντομου ήχου ή το επείγον της κατάστασης μέσω της σειρήνας του ασθενοφόρου, μέχρι σύνθετων πληροφοριών, όπως κατά την παρακολούθηση και ανάλυση σειсмоγραφικών δεδομένων. Έτσι, το πεδίο εφαρμογής της ηχητικής αναπαράστασης δεδομένων εκτείνεται από την καθημερινότητα μέχρι την επιστήμη, αλλά και την τέχνη. Μάλιστα, έχει αποδειχτεί πως η ηχητική αναπαράσταση δεδομένων ενδείκνυται για τη διαχείριση πολυδιάστατων και πολύπλοκων πληροφοριακών δομών, καθώς η ηχητική απόδοση μπορεί να αποκαλύψει χαρακτηριστικά που θα παραβλέπονταν μέσω της παραδοσιακής οπτικής παρακολούθησης [10].

Η πιο άμεση τεχνική ηχητικής αναπαράστασης είναι η **ηχοποίηση** (audification), κατά την οποία κυματομορφές δεδομένων, όπως για παράδειγμα στοιχεία σεισμικής δραστηριότητας, μεταφράζονται απ'ευθείας σε ήχο [11]. Η **προτυπική ηχητική αναπαράσταση** (model-based sonification) απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει μια ενέργεια και ασχολείται με την ηχητική απόκριση του αναπαριστάμενου συστήματος στην ενέργεια αυτή [12]. Για παράδειγμα, αν χτυπήσουμε ένα καρπούζι, για να διαπιστώσουμε την ποιότητά του, έχουμε εφαρμόσει αυτήν την τεχνική. Η **παραμετροποιημένη ηχητική αναπαράσταση** (parameter mapping sonification) αντιστοιχεί ποιότητες των δεδομένων σε διαφορετικές ηχητικές παραμέτρους [13]. Εδώ, ο πλούτος του ήχου ως πολυδιάστατο φαινόμενο ευνοεί τη συσχέτισή του με πολυεπίπεδες δομές. Ηχητικές, αλλά και μουσικές ιδιότητες, όπως το τονικό ύψος, η ένταση, η πυκνότητα η αρμονία και ο ρυθμός, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα, για την ανάλυση σύνθετων πληροφοριών. Το παρόν έργο, όπου ο δείκτης της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου ελέγχει την ηχητική παράμετρο της μορφοποίησης συχνότητας, αποτελεί παράδειγμα αυτής της τεχνικής. Βασισμένα στην παραμετροποίηση, τα **ηχητικά σύμβολα** (earcons) αποτελούν μη-λεκτικά ηχητικά μηνύματα που παρέχουν πληροφορίες για αντικείμενα και λειτουργίες [14]. Λειτουργώντας συμβολικά συνθέτουν μια γλώσσα που πρέπει να μάθει ο χρήστης, για να αλληλεπιδράσει με το σύστημα. Ένα παράδειγμα ηχητικού συμβόλου είναι η σύντομη μελωδία που σηματοδοτεί τον τερματισμό του λογισμικού, όταν κλείνει ο υπολογιστής. Τέλος, τα **ηχητικά αντικείμενα** (auditory icons) βασίζονται στην άμεση αναφορικότητα με την αναπαριστάμενη πληροφορία και ουσιαστικά αποτελούν ηχητικά σύμβολα, τα οποία δεν αναπαριστούν τα δεδομένα συμβολικά, αλλά ρεαλιστικά [15]. Ο ήχος του τσαλακωμένου εγγράφου, όταν ένα αρχείο του υπολογιστή καταστρέφεται στον κάδο ανακύκλωσης, αποτελεί ενδεικτικό ηχητικό αντικείμενο.

1.2 Ηχητική Αναπαράσταση Αστρονομικών Δεδομένων

Η ηχητική αναπαράσταση αστρονομικών δεδομένων αφορά κυρίως έργα με επιστημονικό και καλλιτεχνικό χαρακτήρα. Στην πρώτη περίπτωση ο στόχος είναι η βέλτιστη παρακολούθηση και ανάλυση της ροής των πληροφοριών, ενώ στη δεύτερη η ψυχαγωγία του ακροατή. Μετά από σχετική έρευνα των εισηγητών στη

βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο διαπιστώθηκε πως οι δύο παραπάνω συνθήκες σχηματίζουν τα δύο άκρα ενός άξονα, όπου:

- στο **‘καλλιτεχνικό’** άκρο εντάσσονται έργα, στα οποία τα αστρονομικά δεδομένα αποτελούν τον ρυθμιστή της μουσικής δράσης. Σε αυτά οι τεχνικές της παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης και των ηχητικών συμβόλων εφαρμόζονται με μεγάλη καλλιτεχνική ελευθερία, καθώς δεν συγκαταλέγεται στις προθέσεις των έργων αυτών τόσο η επιμόρφωση του ακροατή, όσο η ψυχαγωγία του. Έτσι, τα αστρονομικά δεδομένα αποτελούν περισσότερο έμπνευση, αφετηρία και μέσο της μουσικής σύνθεσης.
- στο **‘επιστημονικό’** άκρο εντάσσονται έργα, στα οποία τα αστρονομικά δεδομένα μεταφράζονται άμεσα σε ήχο μέσω της τεχνικής της ηχοποίησης. Συνήθως, αυτό καθίσταται εφικτό, αν πρώτα μεταφερθούν στο εύρος της ανθρώπινης ακοής (16Hz – 16kHz)

Πολλά ακόμη έργα μπορούν να ενταχθούν στον μέσο χώρο ανάμεσα στα δύο άκρα. Σε αυτά χρησιμοποιείται η τεχνική της παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης για την συνύπαρξη της δημιουργικής ελευθερίας και της επιστημονικής ακρίβειας, καθώς ο στόχος είναι η διάχυση της επιστήμης στο ευρύ κοινό μέσω του συνδυασμού επιμόρφωσης και ψυχαγωγίας. Ας αναφερθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα όλων αυτών των κατευθύνσεων.

Η σύνθεση του John Cage *Atlas Eclipticalis* (1961) αποτελεί δείγμα καλλιτεχνικής ηχητικής αναπαράστασης αστρονομικών δεδομένων. Ο συνθέτης αναπόθεσε μουσικά κλειδιά, και συνεπώς το εύρος των τονικών υψών, πάνω σε ένα αστρικό χάρτη του Τσέχου αστρονόμου Antonín Becvár, έτσι ώστε η θέση των αστεριών να ορίζει τις νότες που θα παιχτούν. Η ένταση υποδεικνύεται από το μέγεθος των νοτών, ενώ η εκάστοτε διάρκεια σημειώθηκε πάνω από κάθε νότα [16]. Πιο πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί το *Supernova Sonata*. Σε αυτό το έργο ο συνθέτης/αστρονόμος Alex Parker χρησιμοποιεί 4 σημεία του ουρανού, όπως αυτά παρατηρήθηκαν και μαγνητοσκοπήθηκαν στο χρονικό διάστημα Απρίλιος 2003 – Αύγουστος 2006 από το τηλεσκόπιο CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope), και ανιχνεύει σε αυτά ένα συγκεκριμένο και ιδιαίτερα λαμπρό τύπο σούπερνόβα (Type Ia supernova). Έπειτα, αναθέτει σε κάθε έκρηξη που λαμβάνει χώρα την πυροδότηση μιας νότας. Η απόσταση του σούπερνόβα ορίζει την ένταση, η λαμπρότητα και διάρκεια της έκρηξης το τονικό ύψος και η περιοχή του ουρανού, όπου ανιχνεύτηκε, το μουσικό όργανο [17].

Παραδείγματα άμεσης ηχοποίησης αστρονομικών δεδομένων αποτελούν οι ήχοι του σύμπαντος που συλλέγονται από τα διαστημικά σκάφη και τους δορυφόρους. Βέβαια, στο κενό του διαστήματος δεν μπορούν να προκύψουν ηχητικά κύματα, καθώς δεν υπάρχει αέρας να χρησιμεύσει ως μέσο μεταφοράς τους. Όμως, οι κυματικές εκπομπές που καταγράφονται μπορούν να μεταφερθούν στο εύρος ακουστότητας και η δυναμική τους ένταση να εκφραστεί ως συνάρτηση της συχνότητας στο χρόνο. Μια τέτοια περίπτωση είναι οι εκπομπές που κατέγραψε το σκάφος Juno της NASA από το σέλας πάνω από το βόρειο πόλο του Δία κατά το πρώτο του πέρασμα στις 27 Αυγούστου 2016 [18]. Επίσης, το σκάφος Voyager 1 μπορεί και καταγράφει κύματα ηλεκτρονίων στο πλάσμα που διασχίζει. Με γυμνά αυτιά δεν μπορούν να ακουστούν, όμως επειδή ταλαντώνονται σε συχνότητες μέσα

στο εύρος ακουστότητας, μπορούν να αναπαραχθούν μέσω ηχείου. Από το τονικό ύψος και τη συχνότητα που προκύπτουν μπορεί να μελετηθεί η σύσταση του αερίου που περιβάλλει το σκάφος. Όσο το Voyager 1 βρισκόταν μέσα στην ηλιόσφαιρα, η συχνότητα των πλασματικών κυμάτων κυμαινόταν γύρω στα 300Hz, ενώ όταν την εγκατέλειψε η συχνότητα μεταπήδησε ανάμεσα στα 2-3kHz, αποκρινόμενη στο πυκνότερο αέριο του διαστρικού μέσου [19].

1.3 Παραμετροποιημένη Ηχητική Αναπαράσταση Ηλιακής Ενέργειας

Σε αυτό το σημείο θα εστιάσουμε σε περιπτώσεις που ασχολούνται με την ηλιακή ενέργεια, με στόχο να παρουσιάσουμε τη δημιουργική ελευθερία που διέπει την τεχνική της παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης. Με άλλα λόγια, οι ιδιότητες των επιστημονικών δεδομένων συσχετίζονται με ηχητικές παραμέτρους, το ποιές όμως θα είναι αυτές οι ηχητικές παράμετροι εναπόκειται στην αυθαίρετη συνθετική σκέψη του δημιουργού. Στην πρώτη περίπτωση, οι ερευνητές του πανεπιστημίου του Berkeley σχεδίασαν την παραμετροποίηση της ηχητικής αναπαράστασης με πρόθεση να συσχετιστεί στην αντίληψη του ακροατή η ηλιακή καταιγίδα με την γνωστή, κανονική καταιγίδα. Έτσι, απέδωσαν τον ηλιακό άνεμο ως αέρα που φυσάει με μεταβαλλόμενη ένταση, τα δε φορτισμένα σωματίδια ως σταγόνες βροχής που πέφτουν σε επιφάνειες [20]. Σε άλλες ηχητικές αναπαραστάσεις από το ίδιο πανεπιστήμιο ο ηλιακός άνεμος αποδόθηκε με 4 καμπάνες, οι οποίες, στη μία περίπτωση ηχούν ταυτόχρονα και όσο η ένταση του ηλιακού ανέμου μεγαλώνει αποδιοργανώνονται ρυθμικά, στην άλλη περίπτωση ηχούν αρμονικά και ανάλογα με την ένταση ξεκουρδίζονται [21]. Στην περίπτωση του λογισμικού xSonify, το οποίο ηχοποιεί δισδιάστατα δεδομένα, είναι το συχνοτικό φάσμα και οι ιδιότητές του που πληροφορούν για τις διακυμάνσεις στην ηλιακή δραστηριότητα [22], ενώ σε μια άλλη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν συχνοτικά φίλτρα και μεταβαλλόμενη ταχύτητα αναπαραγωγής, ώστε να διερευνηθούν περιοδικότητες στο ίδιο φαινόμενο [10]. Τέλος, η Ηλιακή και Ηλιοσφαιρική Ερευνητική Ομάδα του πανεπιστημίου του Μίτσιγκαν ανέλυσε τη σύσταση του ηλιακού ανέμου σε 8 παραμέτρους, τις οποίες ηχοποίησε εφαρμόζοντας τεχνικές ηχητικής επεξεργασίας, όπως αντηχητές, συχνοτικά φίλτρα και μεταβαλλόμενη ταχύτητα αναπαραγωγής, πάνω σε ηχογραφημένα δείγματα τραγουδιού [23].

Η διαφορετικότητα των παραπάνω προσεγγίσεων αποδεικνύει πως ο σχεδιασμός του εκάστοτε συστήματος παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης εξαρτάται από τη συνθετότητα της αναπαριστάμενης πληροφορίας και τον στόχο του εγχειρήματος.

2. Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα

Το *Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα* σχεδιάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Max/Msp για OS λειτουργικό. Πρόκειται για ένα ψηφιακό εκπαιδευτικό διαδραστικό ηχητικό περιβάλλον που αποδίδει ηχητικά τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της Γης κατά τη διάρκεια των μαγνητικών καταιγίδων. Παρουσιάστηκε στο Athens Science Festival τον Απρίλιο 2016 ως διαδραστική

εγκατάσταση. Η εφαρμογή διατίθεται στην παρακάτω διαδικτυακή διεύθυνση:
<https://drive.google.com/open?id=0BxAPEYyfv5aaNTUxbmtFZUtvT2M>

Οι στόχοι της εφαρμογής είναι:

- η μετάδοση επιστημονικών πληροφοριών σχετικά με το φαινόμενο της μαγνητικής καταιγίδας
- η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με την ηλιακή συμπεριφορά
- η διάχυση της επιστήμης στο ευρύ κοινό μέσω της μουσικής

2.1 Ηχητικός Σχεδιασμός και Παραμετροποιημένη Ηχητική Αναπαράσταση

Κάθε στιγμή ο πλανήτης μας εκτίθεται στην ροή του ηλιακού ανέμου, ο οποίος μεταφέρει ενέργεια από τον ήλιο στη Γη και στο υπόλοιπο ηλιακό σύστημα. Τα διαστήματα έντονης ηλιακής δραστηριότητας ονομάζονται ηλιακές καταιγίδες, οι οποίες προκαλούν μεταβολές και στο γήινο μαγνητικό πεδίο προκαλώντας μαγνητικές καταιγίδες. Η διαφοροποίηση του συγκεκριμένου έργου με τα προαναφερθέντα είναι πως δεν ηχοποιεί την ηλιακή ενέργεια, αλλά τη μαγνητοσφαιρική διαταραχή που αυτή προκαλεί. Συνεπώς, στο επίκεντρο της σύνθεσης βρέθηκε αρχικά το μαγνητικό πεδίο.

Για την ηχητική αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν ως ηχητικά σύμβολα για τους δύο μαγνητικούς πόλους δύο ημιτονοειδείς ταλαντώσεις με πολύ κοντινό τονικό ύψος (110.0 και 110.5 Hz αντίστοιχα), ώστε κατά τη συνήχησή τους να δημιουργείται διακρότημα. Έτσι, προκύπτει ένας ήχος συνεχής, ώστε να παραπέμπει σε ένα φαινόμενο μόνιμο, όπως είναι το μαγνητικό πεδίο, συχνοτικά χαμηλός, ώστε να γίνεται αντιληπτός ως ζεστός βόμβος και να εμβυθίζει τον ακροατή σε μια ισοκρατική κατάσταση, και ζωντανός, αφού το διακρότημα δίνει την αίσθηση ελαφριάς κίνητικότητας και αλληλοεξάρτησης ανάμεσα στους δύο πόλους.

Επόμενο στάδιο του ηχητικού σχεδιασμού στάθηκε η ηχητική αναπαράσταση της μαγνητοσφαιρικής διαταραχής. Εδώ έπρεπε να βρεθεί ένας τρόπος να επηρεάζεται δυναμικά ο ήδη δημιουργηθείς ήχος του μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της Διαμόρφωσης Συχνότητας (Frequency Modulation), με την οποία η συχνότητα ενός ταλαντωτή-φορέα μεταβάλλεται μέσω της συχνότητα ενός ταλαντωτή-διαμορφωτή. Σε αυτή την περίπτωση, τον φορέα αποτελεί το μαγνητικό πεδίο, ενώ οι τιμές του διαμορφωτή αντλούνται από τον δείκτη Dst, ο οποίος καταγράφει ανά ώρα τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της γης. Το εύρος των Dst τιμών εκτείνονται από +20 ως -589 με την εξής κατανομή:

- +20 -20 = ομαλή δραστηριότητα μαγνητικού πεδίου
- -21 -50 = ασθενής μαγνητική καταιγίδα
- -51 -150 = μέτρια μαγνητική καταιγίδα
- -151 -589 = ισχυρή μαγνητική καταιγίδα

Οι Dst τιμές ανατέθηκαν στις ηχητικές παραμέτρους Συχνότητα Διαμόρφωσης (Modulation Frequency) και Βάθος Διαμόρφωσης (Modulation Depth). Στόχος της παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης ήταν να δημιουργούνται ανάλογα με το μέγεθος της μαγνητικής καταιγίδας από ελαφριές μέχρι βίαιες μετατοπίσεις στη συχνότητα του ήχου του μαγνητικού πεδίου (παράμετρος Modulation Frequency), οι οποίες να παραπέμπουν στην κίνηση του αέρα κατά τη διάρκεια μιας γνώριμης καταιγίδας. Οι δε αντίστοιχες μετατοπίσεις στη χροιά του ήχου του μαγνητικού πεδίου (παράμετρος Modulation Depth) να δημιουργεί από την αίσθηση της ασφάλειας, όσο ο ήχος είναι ένας χαμηλός συχνοτικά βόμβος, μέχρι του κινδύνου, όταν η χροιά οξύνεται, καθώς η ισχυρή μαγνητική καταιγίδα μπορεί να είναι πολύ επιβλαβής για τις ηλεκτρονικές συσκευές της ανθρώπινης τεχνολογίας. Όσο η δραστηριότητα του μαγνητικού πεδίου είναι ομαλή, ο ήχος δεν υφίσταται συχνοτική διαμόρφωση. Σε περίπτωση μαγνητικής καταιγίδας, οι Dst τιμές κατανομονται στις παραμέτρους του συχνοτικού διαμορφωτή όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 2.1.

Πίνακας 2.1 Κατανομή Τιμών Dst στις Παραμέτρους της Συχνοτικής Μορφοποίησης

Τιμές Dst	Συχνότητα Διαμόρφωσης	Βάθος Διαμόρφωσης
+20 -20	108	300
-21 -50	109 - 120	301 - 1000
-51 -151	121 - 160	1001 - 3000
-152 -589	160 – 320	3001 - 8000

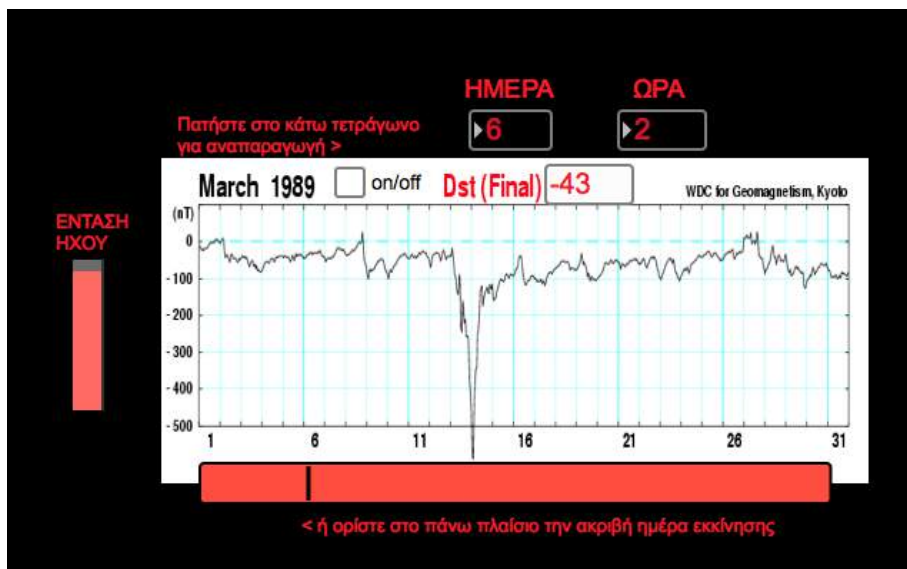
Επιπλέον προστέθηκε ένας υψηλός συχνοτικά και σύντομος σε διάρκεια ήχος, ο οποίος επαναλαμβάνεται άρρυθμα και με μεταβαλλόμενη ταχύτητα αναπαραγωγής, ώστε να συνθέτει ένα πλήθος παραλλαγών. Αυτά τα ηχητικά συμβάντα αναπαριστούν τα φορτισμένα σωματίδια που μεταφέρονται από την ηλιακή ενέργεια. Οι ηχητικές παράμετροι της πυκνότητας και της ταχύτητας αναπαραγωγής μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο, ώστε όσο πιο ισχυρή είναι η καταιγίδα, τόσο οι ήχοι αυτοί πυκνώνουν και χαμηλώνουν συχνοτικά.

Τα Dst δεδομένα αντλήθηκαν από τον μήνα Μάρτιο του 1989, καθώς τότε έλαβαν χώρα ασθeneίς, μέτριες και ισχυρές μαγνητικές καταιγίδες. Κάθε ωριαία Dst τιμή ανακαλείται ανά δευτερόλεπτο, έτσι σε 24 δευτερόλεπτα έχει ολοκληρωθεί μία ημέρα και σε 12.4 λεπτά ο μήνας.

2.2 Περιβάλλον Διεπαφής

Το περιβάλλον διεπαφής (Σχήμα 2.2) σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο χρήστης να παρακολουθεί λεπτομερώς τα επιστημονικά δεδομένα και να μπορεί να επεμβαίνει διαδραστικά στη ροή τους. Έτσι, αποκτά ενεργό ρόλο στην επιμορφωτική δραστηριότητα προσαρμόζοντάς την στις ιδιαίτερες ανάγκες του. Οι Dst τιμές εμφανίζονται τόσο σε ξεχωριστές ενδείξεις ως ημέρα, ώρα και αντίστοιχη τιμή, όσο και σε γράφημα συναρτήσεως του χρόνου, όπου ένας δείκτης ακολουθεί το πέρασμά του. Ο χρήστης μπορεί να μετακινήσει τον δείκτη και να μεταφερθεί σε όποιο χρονικό σημείο του μήνα επιθυμεί. Μπορεί επίσης να ελέγξει την ένταση του ήχου, καθώς και να παγώσει τη δράση σε όποιο σημείο επιθυμεί, αφουγκραζόμενος

το ακουστικό αποτέλεσμα και αναλύοντας τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της μαγνητικής καταιγίδας τη δεδομένη στιγμή.



Σχήμα 2.2 Περιβάλλον Διεπαφής

3. Μελλοντική Ανάπτυξη

Το εκπαιδευτικό διαδραστικό ηχητικό περιβάλλον *Ακούγοντας τη Μαγνητική Καταιγίδα* χρησιμοποιεί τις τεχνικές της παραμετροποιημένης ηχητικής αναπαράστασης και των ηχητικών συμβόλων, ώστε να αποδώσει ηχητικά την επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Ο ηχητικός σχεδιασμός επικεντρώθηκε στο μαγνητικό πεδίο και τα φορτισμένα σωματίδια της ηλιακής ενέργειας, τα οποία μεταβάλλονται σύμφωνα με τα δεδομένα που παρέχει ο ωριαίος δείκτης μεταβολής του μαγνητικού πεδίου Dst. Στόχος του έργου είναι η επιμόρφωση και ευαισθητοποίηση του κοινού στα πλαίσια της διαχυσής της επιστήμης. Οι εισηγητές διακρίνουν τις παρακάτω κατευθύνσεις για μελλοντική ανάπτυξη.

Η προγραμματιστική υλοποίηση της έκδοσης για περιβάλλον windows αποτελεί άμεσο στόχο, έτσι ώστε περισσότεροι χρήστες να έχουν πρόσβαση στην εφαρμογή. Με την ολοκλήρωσή της θα διατεθεί στην ίδια διαδικτυακή διεύθυνση όπως η τωρινή Mac έκδοση. Ουσιαστικής σημασίας για τον εκπαιδευτικό χαρακτήρα του έργου αποτελούν ερευνητικές δοκιμές του λογισμικού σε μαθησιακές ομάδες, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά του όσο αφορά στην επιμόρφωση και ευαισθητοποίηση των μαθητών. Τέλος, οι εισηγητές εξετάζουν το ενδεχόμενο μόνιμης εγκατάστασης του έργου, όπου τα δεδομένα σχετικά με την κατάσταση του μαγνητικού πεδίου θα συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο.

4. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Stapleton, A.J., 2004. Serious games: Serious opportunities. In *Australian Game Developers' Conference, Academic Summit, Melbourne*.
- [2] Randel, J.M., Morris, B.A., Wetzel, C.D. and Whitehill, B.V., 1992. The effectiveness of games for educational purposes: A review of recent research. *Simulation & Gaming*, 23(3), pp.261–276.
- [3] Ma, Y., Williams, D. and Richard, C., 2007. A research agenda for developing and implementing educational computer games. *British Journal of Educational Technology*, 38(3), pp.513–518.
- [4] Griffiths, M., 2002. The educational benefits of videogames. *Education and Health*, 20(3), pp.47–51.
- [5] Bishop, M.J. and Sonnenschein, D., 2012. Designing with sound to enhance learning: Four recommendations from the film industry. *Journal of Applied Instructional Design*, 2(1), pp.5–15.
- [6] Targett, S. and Fernström, M., 2003. Audio games: Fun for all? All for fun. In *ICAD*.
- [7] Bishop, M.J. and Cates, W.M., 2001. Theoretical foundations for sound's use in multimedia instruction to enhance learning. *Educational Technology Research and Development*, 49(3), pp.5–22.
- [8] Liljedahl, M. & Papworth, N., 2008. Beowulf field test paper. *Audio Mostly*, p.43.
- [9] Röber, N., 2005. Playing Audio-only Games: A compendium of interacting with virtual, auditory Worlds.
- [10] Alexander, R. L., Gilbert, J. A., Landi, E., Simoni, M., Zurbuchen, T. H., & Roberts, D. A. 2011. Audification as a diagnostic tool for exploratory heliospheric data analysis.
- [11] Kramer, G., 1994. An introduction to auditory display. In *Auditory Display: Sonification and Auditory Interfaces, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings*. Addison- Wesley, pp. 1–77.
- [12] Hermann, T., 2011. Model-based sonification. *The Sonification Handbook*, pp.399–427.
- [13] Grond, F. and Berger, J., 2011. Parameter mapping sonification. *The Sonification Handbook*, pp.363–397.
- [14] Blattner, M.M., Sumikawa, D.A. and Greenberg, R.M., 1989. Earcons and icons: Their structure and common design principles. *Human-Computer Interaction*, 4(1), pp.11–44.
- [15] Gaver, W.W., 1986. Auditory icons: Using sound in computer interfaces. *Human-computer interaction*, 2(2), pp.167–177.
- [16] Atlas Eclipticalis. [online] http://johncage.org/pp/John-Cage-Work-Detail.cfm?work_ID=31 ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016
- [17] Supernova Sonata. [online] http://www.astro.uvic.ca/~alexhp/new/supernova_sonata.html#0 ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016
- [18] Juno – Jupiter's North Pole. [online] <https://www.nasa.gov/feature/jpl/jupiter-s-north-pole-unlike-anything-encountered-in-solar-system> ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016

- [19] The Sounds of Interstellar Space. [online] http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/01nov_ismsounds/ ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016
- [20] Listening to invisible, inaudible Solar Winds passing by NASA Satellites. [online] http://cse.ssl.berkeley.edu/stereo_solarwind/soundsFolder/latest.html ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016
- [21] Solar Wind. [online] http://cse.ssl.berkeley.edu/stereo_solarwind/sounds_examples.html ανακτημένο Σεπτέμβριος 2016
- [22] Diaz-Merced, W. L., Candey, R. M., Brickhouse, N., Schneps, M., Mannone, J. C., Brewster, S., & Kolenberg, K. (2011). Sonification of Astronomical Data. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 7(S285), 133-136.
- [23] Alexander, R., Zurbuchen, T. H., Gilbert, J., Lepri, S., & Raines, J. (2010). Sonification of ACE level 2 solar wind data.

Εκπαιδευτικές δραστηριότητες ακουστικών μετρήσεων στο σχολικό περιβάλλον

Γεώργιος Φύττας
Εκπαιδευτικός Δ.Ε.,
Φυσικός (ΠΕ04)
Πειραματικό Σχολείο
Πανεπιστημίου Πατρών
gfyttas@upatras.gr

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου
Εκπαιδευτικός Δ.Ε.,
Πληροφορικός (ΠΕ19)
PhD Ψηφιακής Τεχν. Ήχου
Πειραματικό Σχολείο
Πανεπιστημίου Πατρών
hagianto@sch.gr

Φώτιος Κοντομίχος
Μεταδιδάκτορας Ερευνητής
Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου
και Ακουστικής
Πανεπιστημίου Πατρών
fotkon@upatras.gr

Θωμάς Ζαρούχας
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
PhD Ψηφιακής Τεχν. Ήχου
ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»
zarouchas@cti.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το γνωστικό αντικείμενο της ακουστικής έχει «αποκλειστεί» από τα αναλυτικά προγράμματα σπουδών της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης. Ωστόσο στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα εκπαιδευτικό σενάριο διερευνητικής (inquiry) προσέγγισης φαινομένων ακουστικής σε σχολικούς χώρους με στόχο τη σύνδεση της έννοιας του ήχου με μετρήσεις πεδίου. Η εμπλοκή μαθητών με εφαρμογές της ακουστικής και με πρακτικές ακουστικών μετρήσεων, είναι ένας σημαντικός στόχος του εκπαιδευτικού σεναρίου. Οι εκπαιδευτικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν τη μέτρηση περιβαλλοντικού θορύβου στο σχολικό περιβάλλον (Πειραματικό Λύκειο Πανεπιστημίου Πατρών) και της «ηχοδιαπερατότητας» μεταξύ σχολικών αίθουσας.

Educational measurement acoustic activities at school

ABSTRACT

The subject of acoustics has been "excluded" from the Greek secondary school curricula. However, in this paper we present an educational inquiry project of acoustic phenomena in school, in order to connect the concept of sound with field measurements. Involving pupils with applications of acoustics and acoustic measurement practices, is an important goal of the proposed educational project. The educational activities described herein include measuring ambient noise in school activity sites (Experimental High School of the University of Patras).

Εισαγωγή

Ο ήχος αποτελεί ένα πολύ συνηθισμένο τμήμα της καθημερινότητας του ανθρώπου σε σημείο που να μην μπορεί να εκτιμήσει εύκολα τη θετική και αρνητική επίδρασή του στη ποιότητα ζωής. Στο σχολικό περιβάλλον υπάρχει ένα λεπτό όριο (που συχνά καταλύεται) μεταξύ χρήσιμης ηχητικής πληροφορίας και θορύβου. Στη συγκεκριμένη εργασία εστίασαμε στο θόρυβο σε ένα σχολικό περιβάλλον και συγκεκριμένα στο συγκρότημα του Πειραματικού Λυκείου του Πανεπιστημίου Πατρών (<http://plppupatras.wixsite.com/plpp>). Στην εργασία που παρουσιάζεται εδώ περιγράφονται δραστηριότητες με εκπαιδευτικό σκοπό την εξοικείωση των μαθητών Λυκείου με θεωρητικές γνώσεις και πρακτικές μεθόδους μέτρησης ακουστικών φαινομένων.

Ο θόρυβος δεν επηρεάζει μόνο τη μάθηση, αλλά έχει επιπτώσεις και στην κοινωνική συμπεριφορά των παιδιών, όπως φαίνεται και σε έκθεση του Evans [1]. Αν μεταφερθούμε στο ελληνικό σχολικό περιβάλλον και με τα τωρινά στοιχεία των αναλυτικών προγραμμάτων σπουδών, ο Έλληνας μαθητής περνάει παραπάνω από 14000 ώρες μέσα σε σχολικές αίθουσες διδασκαλίας πριν αποφοιτήσει. Αν αναλογιστούμε ότι τουλάχιστον το 60% αυτού του χρόνου σχετίζεται με δραστηριότητες που απαιτούν συζήτηση, παρακολούθηση και ανταλλαγή απόψεων με τους συμμαθητές του και τον εκπαιδευτικό, τότε μπορούμε να αντιληφθούμε το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει το σχολικό ακουστικό περιβάλλον στις επιδόσεις αλλά κυρίως στη φυσιολογική και ψυχολογική υγεία του μαθητή.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο προτείνονται κι εφαρμόζονται παιδαγωγικές μέθοδοι που ενθαρρύνουν την ομαδική συμμετοχή, το διάλογο και τις ομαδοσυνεργατικές δραστηριότητες [2]. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται ο θόρυβος στη διάρκεια των δραστηριοτήτων στους χώρους διδασκαλίας. Ταυτόχρονα μεταβάλλεται και η κλασσική σχέση πηγής και δέκτη με την αλλαγή της διάταξης των θρανίων σε κυκλικές ή ασύμμετρες διατάξεις [3] οπότε προκύπτουν νέα δεδομένα για την ακουστική των χώρων διδασκαλίας.

1. Το θεωρητικό πλαίσιο

1.1 Στόχοι

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια Περιβαλλοντικών Εκπαιδευτικών Προγραμμάτων, εγκεκριμένων από τη Διεύθυνση Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης Αχαΐας κατά τη διάρκεια δύο σχολικών ετών 2014-15 και 2015-16. Στην περιβαλλοντική ομάδα συμμετείχαν μαθητές της Α' και Γ' τάξης του Λυκείου. Οι εκπαιδευτικές δραστηριότητες γίνονταν με τη συνεργασία των καθηγητών και των μαθητών του σχολείου και την υποστήριξη της ερευνητικής Ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής, σε χρόνο εκτός του τυπικού σχολικού προγράμματος. Σκοπός ήταν η σύνδεση των φυσικών εννοιών που συνδέονται με τον ήχο με τα γνωστικά αντικείμενα των μαθητών, η ευαισθητοποίηση των μαθητών/τριών γύρω από το σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα του θορύβου αλλά και η προσπάθεια ανάδειξης των ακουστικών προβλημάτων των χώρων του σχολείου τους.

Οι εκπαιδευτικοί στόχοι επιγραμματικά ήταν:

- Να αποκτήσουν οι μαθητές βασικές γνώσεις των εννοιών της ακουστικής και του ήχου.
- Να αποκτήσουν οι μαθητές δεξιότητες μέτρησης των ακουστικών.
- Να αναπτύξουν περιβαλλοντικές ευαισθησίες σε σχέση με τον ήχο και το θόρυβο στο σχολικό περιβάλλον.
- Να ενεργοποιηθούν οι μαθητές σε τακτικές συνεργασίας και ειδικότερα στο να προτείνουν και να θέτουν τις κατάλληλες μεταβλητές στο εκάστοτε πρόβλημα.
- Να αναδειχθούν τα προβλήματα της υψηλής «ηχοδιαπερατότητας» στις σχολικές αίθουσες.

1.2 Δραστηριότητες ακουστικών μετρήσεων

Αρχικά δόθηκαν οι ορισμοί και έγινε εκτενής συζήτηση για πολλά μεγέθη της ακουστικής. Εστίασαμε στα μεγέθη που συνδέονται με το γνωστικό αντικείμενο των μαθητών της Γ' Λυκείου. Συγκεκριμένα:

- Την έννοια της «ταλάντωσης» και των μεγεθών που την περιγράφουν (Περίοδος – Συχνότητα – Πλάτος – Ενέργεια).
- Την αντίληψη της διευρυμένης έννοιας «ταλάντωση» σαν περιοδική μεταβολή μιας ποσότητας (αυξομείωση της πίεσης και της πυκνότητας του αέρα για την περίπτωση του ήχου) και την αποδοχή της περιγραφής του ήχου με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ταλάντωσης.
- Το μοντέλο του «ελαστικού μέσου» και την υιοθέτηση της άποψης ότι ο αέρας και άλλα υλικά συμπεριφέρονται σαν «ελαστικά μέσα».
- Τις έννοιες «διεύθυνση διάδοσης» και «ταχύτητα διάδοσης» του ηχητικού κύματος.
- Έγινε εκτενής αναφορά στη φύση του ήχου και στο τρόπο που μεταφέρεται σαν κύμα, στη μονάδα μέτρησης της έντασης του ήχου (ορισμός dB).
- Επίσης αναφερθήκαμε στα φαινόμενα αλληλεπίδρασης ήχου με διάφορες επιφάνειες και δώσαμε βαρύτητα στη διαφορά ηχοαπορρόφησης & ηχομόνωσης.

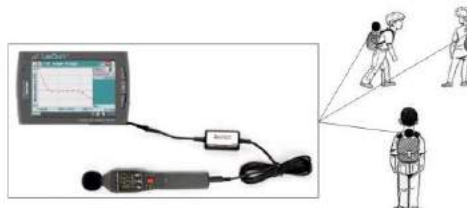
Οι εκπαιδευτικές δραστηριότητες που υλοποιήθηκαν είναι:

α) Μέτρηση του περιβαλλοντικού θορύβου [4]: Οι χώροι που εξετάστηκαν ήταν το προαύλιο του σχολείου, τέσσερα περιμετρικά σημεία του κτιριακού συγκροτήματος και όλοι οι εσωτερικοί χώροι στους οποίους δραστηριοποιούνται οι μαθητές κι οι εκπαιδευτικοί.

β) Μέτρηση «ηχοδιαπερατότητας»: Μέτρηση του ποσοστού της ενέργειας του ήχου που διαπερνάει α) τον τοίχο μιας σχολικής μας αίθουσας (από αίθουσα σε αίθουσα) και β) την πόρτα μιας σχολικής αίθουσας (από διάδρομο σε αίθουσα), στις συχνότητες 500 και 1000Hz.

1.3 Οι τρόποι μετρήσεις και τα εργαλεία

Ως ηχόμετρο χρησιμοποιήθηκε το φορητό Σύστημα Σύγχρονης Λήψης και Απεικόνισης της Vernier: Lab Quest2 (www.vernier.com) σε συνδυασμό με τον αισθητήρα Sound Level Meter (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Το φορητό σύστημα Lab Quest2 συνδεδεμένο με τον αισθητήρα Sound Level Meter και ο τρόπος μεταφοράς του

1^η Δραστηριότητα (μέτρηση θορύβου): Ο ρυθμός δειγματοληψίας καθορίστηκε να είναι ο μέγιστος για τον συγκεκριμένο αισθητήρα, δηλαδή 10 samples/min. Η διάρκεια της συλλογής δεδομένων εξαρτήθηκε από το σημείο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Οι μαθητές τοποθετούσαν το σύστημα Lab Quest2 στο σακίδιο τους με την άκρη του μικροφώνου να προεξέχει κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στους εξωτερικούς χώρους, δηλαδή στα περιμετρικά σημεία και το προαύλιο (Σχήμα 1.1).

2^η Δραστηριότητα (μέτρηση «ηχοδιαπερατότητας»): Οι στόχοι αυτής της δραστηριότητας ήταν α) να μετρηθεί το ποσοστό διαπερατότητας α της ενέργειας του ήχου από μια σχολική αίθουσα στη διπλανή της (από τις δυο πλευρές του διαχωριστικού τοίχου) και β) να μετρηθεί το ποσοστό διαπερατότητας α από μια αίθουσα στο διάδρομο (από τις δυο πλευρές της πόρτας της σχολικής αίθουσας).

Σαν συντελεστής διαπερατότητας α ορίστηκε ο λόγος:

$$a = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.1)$$

όπου I_1 : Η ακουστική πίεση (dB) που καταγράφει το ηχόμετρο μπροστά από την προσπίπτουσα επιφάνεια και I_2 : Η ακουστική πίεση (dB) του ήχου που καταγράφει το ηχόμετρο μετά το πέρασμα από την προσπίπτουσα επιφάνεια.

2. Μεθοδολογία – Αποτελέσματα

2.1 Μετρήσεις θορύβου στη περίμετρο του σχολείου και το προαύλιο

Για τη μέτρηση του θορύβου στη περίμετρο του σχολείου επιλέχθηκαν τα σημεία Α, Β, Γ και Δ (Σχήμα 2.1). Τα σημεία Α και Β βρίσκονται στις κορυφές της μιας πλευράς του τετράπλευρου και πάνω στο δρόμο. Το σημείο Γ βρίσκεται στη συμβολή δυο αγροτικών δρόμων με ελάχιστη κίνηση. Το σημείο Δ δε έχει καμία πρόσβαση σε δρόμο.



Σχήμα 2.1: Τα περιμετρικά σημεία του συγκροτήματος και το προαύλιο

Στα τέσσερα σημεία πραγματοποιήθηκαν τρεις πεντάλεπτες μετρήσεις θορύβου απο τις 07.45 έως 14.00 και η τελική τιμή είναι ο μέσος όρος των τριών μετρήσεων. Ο θόρυβος στη θέση Α και στη θέση Β μετρήθηκε στα 52,8dB με ελάχιστη τιμή 39,2 dB και μέγιστη 75,1dB. Στη θέση Γ κατεγράφη θόρυβος 45dB και στη θέση Δ 42,5dB αντίστοιχα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια του χειμώνα στη περιοχή του σχολικού συγκροτήματος πνέουν ισχυροί άνεμοι με αποτέλεσμα τα επίπεδα θορύβου στα περιμετρικά σημεία να είναι υψηλά. Ένα σημαντικό χρονικό διάστημα της σχολικής καθημερινότητας είναι στη διάρκεια 14:00 έως 14:15. Στο διάστημα αυτό οι μαθητές επιβιβάζονται στα λεωφορεία και σε άλλα μεταφορικά μέσα αμέσως μετά τη λήξη του σχολικού προγράμματος με αποτέλεσμα ο θόρυβος στα σημεία Α και Β να ανεβαίνει σε πολύ υψηλά επίπεδα κοντά στα 91,5dB. Η τιμή αυτή δεν συμπεριελήφθη στη μέτρηση του θορύβου των τεσσάρων σημείων.

Στο προαύλιο του συγκροτήματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τη διάρκεια του διαλλείματος και κατά τη διάρκεια των μαθημάτων. Στη δεύτερη περίπτωση οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων στο μάθημα της Φυσικής Αγωγής. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε διαφορετικές ημέρες με διάρκεια 40 λεπτά η καθεμία. Η τελική τιμή 54,1 dB προέκυψε από τον αριθμητικό μέσο όρο.

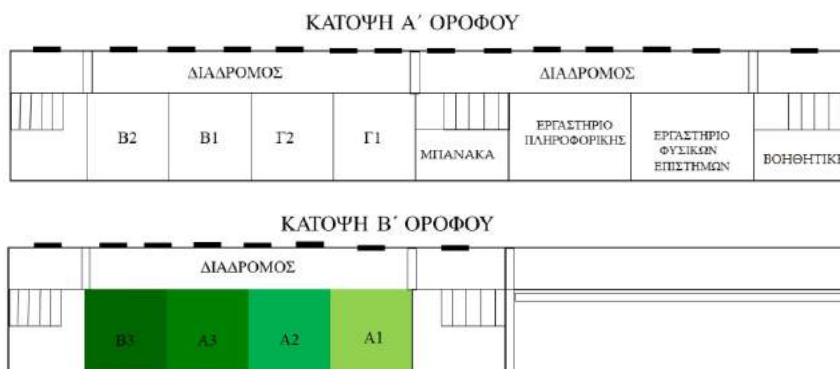
2.2 Μετρήσεις θορύβου στους εσωτερικούς χώρους

Η μέση τιμή του θορύβου στο γυμναστήριο κατά τη διάρκεια αθλητικών δραστηριοτήτων κατεγράφη στα 74,8 dB.

Ο περιβαλλοντικός θόρυβος στα Εργαστήρια Φυσικών Επιστημών και Πληροφορικής μετρημένος πριν τις 08:00 μετρήθηκε 34,9 dB.

Ο θόρυβος στους διαδρόμους του 1ου και 2ου ορόφου πριν από την έλευση των μαθητών 52 dB. Ο θόρυβος στους διαδρόμους κατά τη διάρκεια τους μαθήματος κατεγράφη 55,6 dB.

Στις αίθουσες διδασκαλίας «χωρίς» μαθητές κατεγράφη επίπεδο θορύβου 39,5 dB. Σε άδειες αίθουσες κατεγράφη θόρυβος 39,8 dB όταν στη διπλανή αίθουσα γινόταν μάθημα. Κατεγράφη μια διαφορά 0,8 dB. Στη περίπτωση που οι αίθουσες ήταν ανάμεσα σε δυο άλλες, για παράδειγμα η αίθουσα Γ2 (ανάμεσα στις Γ1 και Β1) (Σχήμα 2.2) κατεγράφη θόρυβος 40,9 dB.



Σχήμα 2.2: Κατόψεις ορόφων

Στις αίθουσες διδασκαλίας του 2ου ορόφου (Σχήμα 2.3) A1, A2, A3 και B3 κατά τη διάρκεια του μαθήματος με ένα σύνολο 20 μαθητών σε κάθε τμήμα καταγράφησαν επίπεδα θορύβου:

A1: 62,8 dB, A2: 63,3 dB, A3: 64,2 dB, B3: 64, 5 dB

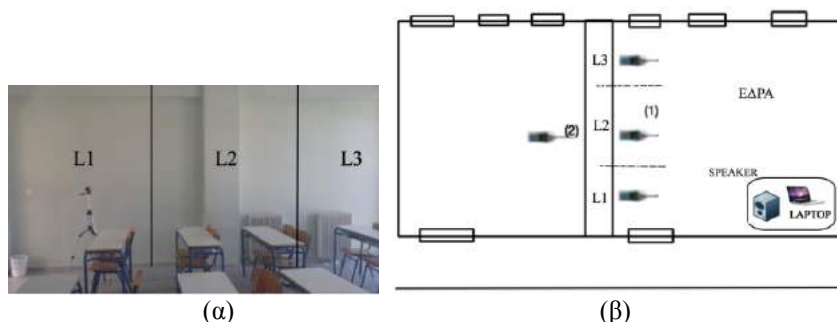
Στις αίθουσες διδασκαλίας του 1ου ορόφου Γ1, Γ2, B1 και B2 κατά τη διάρκεια του μαθήματος με ένα σύνολο 20 μαθητών σε κάθε τμήμα κατά μέσο όρο καταγράφησαν επίπεδα θορύβου: Γ1: 67,8 dB, Γ2: 68,3 dB, B1: 68,7 dB, B2: 64,5 dB.

Στην αίθουσα Μπανάκα κατεγράφη θόρυβος 66,8 dB (Θεωρητική κατεύθυνση), ενώ στη βοηθητική αίθουσα 67,9 dB (Σχήμα 2.3).

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε και τη συνεισφορά των παραθύρων (μονά παράθυρα) στην ελάττωση του θορύβου στους χώρους διδασκαλίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το εξής: στο Εργαστήριο Φυσικών Επιστημών σε ώρα μαθήματος και με αθλητικές δραστηριότητες στο προαύλιο (ανοικτό παράθυρο) ο θόρυβος μετρήθηκε στα 44,8 dB. Στο ίδιο εργαστήριο με κλειστά παράθυρα με αντίστοιχες δραστηριότητες καταγράφηκε 37,2 dB. Τα μονά παράθυρα επιφέρουν μια πτώση της στάθμης του θορύβου κατά 7,6 dB.

2.3 Μετρήσεις ηχοδιαπερατότητας

Η μεθοδολογία για την υλοποίηση αυτής της δραστηριότητας προτάθηκε από τους μαθητές μετά από σχετική ενθάρρυνση των διδασκόντων και με κατάλληλη καθοδήγησή τους αφού συμβουλευτήκαν και τη σχετική βιβλιογραφία [4]. Η δραστηριότητα αυτή πραγματοποιήθηκε σε δυο κενές, από μαθητές, γειτονικές αίθουσες. Στη μια έδρα τοποθετήθηκε ένα ηχείο συνδεδεμένο με τον υπολογιστή. Στόχος αρχικά ήταν η μέτρηση της έντασης του ηχητικού κύματος που προσπίπτει στο τοίχο της αίθουσας A1 που γειτονεύει με την αίθουσα A2. Επειδή το μήκος του τοίχου είναι 6 μέτρα η επιφάνειά του χωρίστηκε σε τρία ίσα μέρη L1, L2 και L3 (Σχήμα 2.4α). Στο μέσον του κάθε δίμετρου (στο πλάτος) τμήματος τοποθετήθηκε το ηχώμετρο με μέτωπο στην έδρα και υπολογίστηκε ο μέσος όρος (ΜΟ) τριών μετρήσεων (Σχήμα 2.4β).



Σχήμα 2.4: (α) Ο ενδιάμεσος τοίχος των αιθουσών (β) Κάτοψη των δύο αιθουσών

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο ΜΟ των L1, L2 και L3. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική της έντασης Π του προσπίπτοντος ηχητικού κύματος στο τοίχο (Σχήμα 2.4β).

Στη συνέχεια το ηχόμετρο μετακινήθηκε στην αίθουσα Α2 και τοποθετήθηκε στη μέση του τοίχου και με μέτωπο προς την αίθουσα Α1. Αναπαράγοντας από το ηχείο ημιτονοειδείς ήχους χωρίς να μεταβάλλουμε την ένταση του ηχείου καταγράφηκαν τρεις μετρήσεις και υπολογίστηκε ο ΜΟ των τιμών που όπως ορίστηκε εξαρχής αποτελεί την ένταση I2 του ηχητικού κύματος που περνάει από το τοίχο. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για συχνότητες 500Hz & 1000Hz. Στον πίνακα 2.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα (για κάθε επιφάνεια έχει υπολογιστεί ο ΜΟ).

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για την αίθουσα Α1.

	L1	L2	L3	
f(Hz)	I (dB)	I(dB)	I(dB)	ΜΟ I (dB)
500	79,7	80,7	68,4	76,2
1000	82,9	76,3	86,8	82

Στις μετρήσεις της αίθουσας Α2 έγινε ο εξής διαχωρισμός: α) μετρήσεις με ανοικτές και τις δυο πόρτες των γειτονικών αιθουσών, β) μετρήσεις με κλειστές και τις δυο πόρτες των γειτονικών αιθουσών. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων για την αίθουσα Α2.

	ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΠΟΡΤΕΣ	ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΠΟΡΤΕΣ
f(Hz)	I (dB)	I(dB)
500	61,7	49,4
1000	68,3	41,6

Τέλος υπολογίστηκαν οι συντελεστές α_{500} και α_{1000} για ανοικτές και κλειστές πόρτες σύμφωνα με την Εξ. (1.1). Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται τα αποτελέσματα:

Πίνακας 2.3 Συντελεστές «ηχοδιαπερατότητας» μεταξύ γειτονικών αιθουσών διδασκαλίας

	ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΠΟΡΤΕΣ	ΚΛΕΙΣΤΕΣ ΠΟΡΤΕΣ
f(Hz)	α	α
500	$61,7/76,2 = 0,80$	$49,4/76,2 = 0,64$
1000	$68,3/82 = 0,83$	$41,6/82 = 0,50$

Παρατηρούμε ότι με κλειστές πόρτες η «ηχοδιαπερατότητα» είναι μικρότερη από αυτήν με ανοικτές. Με ανοικτές πόρτες η «ηχοδιαπερατότητα» είναι λίγο μεγαλύτερη όσον αφορά στον ήχο συχνότητας 1000Hz από ότι στα 500Hz.

Αντίθετα με κλειστές πόρτες η «ηχοδιαπερατότητα» στα 500 Hz είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στον ήχο συχνότητας 1000 Hz.

3. Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις των μαθητών μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο περιβαλλοντικός θόρυβος στις αίθουσες διδασκαλίας του σχολείου μας είναι υψηλότερος κατά 4,5 dB από τον επιτρεπόμενο (35 dB) σύμφωνα με τις προδιαγραφές (άρθρο 12 του Ελληνικού Κτιριοδομικού Κανονισμού). Εξαιτίας της θέσης του (μακριά από το αστικό κέντρο) το συγκρότημα έχει έναν περιμετρικό θόρυβο σε ικανοποιητικά επίπεδα (46,7 dB). Η μέση τιμή του θορύβου στις αίθουσες διδασκαλίας κατά τη διάρκεια του μαθήματος (κυμαίνεται στα 65,5 dB) χαρακτηρίζεται υψηλή για διδακτικές δραστηριότητες.

Όσον αφορά στις μετρήσεις «ηχοδιαπερατότητας» μεταξύ των αιθουσών το βασικό συμπέρασμα που διατυπώθηκε μετά από συζήτηση με τους εμπλεκόμενους μαθητές είναι ότι η «ηχοδιαπερατότητα» ενός υλικού είναι πολύπλοκο θέμα κι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (σύνθεση και πάχος της επιφάνειας, συχνότητα ηχητικού σήματος, ακουστικό περιβάλλον του χώρου που πραγματοποιείται η μέτρηση).

Τέλος, από τη μεριά της εκπαιδευτικής διαδικασίας θεωρούμε ότι οι βασικοί στόχοι αυτών των δραστηριοτήτων επιτεύχθηκαν, αφού οι μαθητές ενεπλάκησαν σε δραστηριότητες εφαρμογής των γνωστικών αντικειμένων που διδάσκονται στο σχολείο και ευαισθητοποιήθηκαν όσον αφορά το σχολικό, ακουστικό τους περιβάλλον.

4. Αναφορές

[1] Evans, G. W. (1998), «The motivational consequences of exposure to noise». in: Carter, N.; Job, S.(Eds.): *Noise Effects '98. 7th Intern. Congress on Noise as a Public Health Problem*, Sydney, Vol. 1; p. 311-320.

[2] Baudrit, A., (2007), *Η ομαδοσυνεργατική μάθηση: Οι αρχές και η λειτουργική εφαρμογή στη σχολική τάξη*, (Μτφ. Κρομμύδα Ελένη), Αθήνα, Εκδόσεις Κέδρος.

[3] Duke, D. L. «Does It Matter Where Our Children Learn?», National Academy of Sciences-National Research Council, Washington, DC.; National Academy of Engineering, Washington, DC, 1998.

[4] Σκαρλάτος, Δ. (2008), *Εφαρμοσμένη Ακουστική (3η Έκδοση)*, Πάτρα, Εκδόσεις GOTSIS.

**Βελτίωση των ηχητικών πολιτιστικών δεσμών μεταξύ
διαφορετικών γλωσσικών κοινοτήτων στη Θράκη:
Δημιουργία εφαρμογής ιστοτόπου και φορητών
συσκευών**

Αθανάσιος Λουκάς
Ερευνητής, Τμ. Ηλεκτρονικών
Μηχ. Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά
Τ.Τ/ Θηβών 250 Αιγάλεω
nasosloukas@gmail.com

Χριστίνα Χαρίτου
Ερευνήτρια, Τμ. Ηλεκτρονικών
Μηχ. Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ/
Θηβών 250 Αιγάλεω
charitou@puas.gr

Δημήτρης Μαστρογιάννης
Ερευνητής, Τμ. Ηλεκτρονικών
Μηχ. Τ.Ε., Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ/
Θηβών 250 Αιγάλεω
dmastrogiannis@gmail.com

Νικόλαος-Αλέξανδρος Τάτλας
Επικ. Καθηγητής, Τμ.
Ηλεκτρονικών Μηχ. Τ.Ε.,
Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ/ Θηβών
250 Αιγάλεω
ntatlas@puas.gr

Στέλιος Μ. Ποτηράκης
Αν. Καθηγητής, Τμ.
Ηλεκτρονικών Μηχ. Τ.Ε., Α.Ε.Ι.
Πειραιά Τ.Τ/ Θηβών 250
Αιγάλεω
spoti@puas.gr

Ευαγγελία Θωμαδάκη
Αν. Καθηγήτρια, Τμ. Γλώσσας,
Φιλολογίας & Πολιτισμού
Παρευξινίων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
ethomada@bscc.duth.gr

Χριστίνα Μάρκου
Επ. Καθηγήτρια, Τμ.
Γλώσσας, Φιλολογίας &
Πολιτισμού Παρευξινίων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
cmarkou@bscc.duth.gr

Γεώργιος Σαλακίδης
Αν. Καθηγητής, Τμ. Γλώσσας,
Φιλολογίας & Πολιτισμού
Παρευξινίων
Χωρών/Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης
gsalakid@bscc.duth.gr

Φώτιος Κοντομίχος
Μεταδιδάκτωρ / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμ. Ηλ.
Μηχανικών, Πανεπιστημίου
Πατρών
fotkon@upatras.gr

Γαβριήλ Καμάρης
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμ. Ηλ.
Μηχανικών, Πανεπιστημίου
Πατρών
gpkamaris@upatras.gr

Χαράλαμπος Παπαδάκος
Ερευνητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμ. Ηλ.
Μηχανικών, Πανεπιστημίου
Πατρών
papadakos@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής / Εργαστήριο
Ενσύρματης Τηλ/νίας, Τμ. Ηλ.
Μηχανικών, Πανεπιστημίου
Πατρών
mourjop@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνύπαρξη διαφορετικών γλωσσικών κοινοτήτων στη Θράκη συνέβαλε στη δημιουργία πολιτισμικών δεσμών και επιρροών μεταξύ των κοινοτήτων αυτών, οι οποίες απαντώνται στα πολιτισμικά στοιχεία της κάθε κοινότητας, δημιουργώντας ένα ιδιότυπο πολιτισμικό τοπίο. Η μοναδικότητα της πολιτισμικής ταυτότητας της περιοχής αποτελεί σημαντικό πεδίο μελέτης, καθώς αποτελεί το προϊόν ζύμωσης των πολιτισμικών στοιχείων των κοινοτήτων αυτών στη διάρκεια πολλών αιώνων. Για το

λόγο αυτή η συγκεκριμένη εργασία έχει σαν σκοπό αφενός τη διαπολιτισμική παρουσίαση των τριών γλωσσικών κοινοτήτων (ελληνόφωνοι, πομακόφωνοι, τουρκόφωνοι) της Θράκης μέσω της τεχνολογίας, και συγκεκριμένα μέσω της χρήσης ηχητικών καταγραφών, αφετέρου δε την ανάδειξη των μεταξύ τους δεσμών. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, δημιουργήθηκε ένας διαδικτυακός ιστότοπος καθώς και μια εφαρμογή για φορητές συσκευές, μέσω των οποίων ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση στα πολιτισμικά στοιχεία των παραδόσεων από τις τρεις διαφορετικές κοινότητες, τόσο με τη μορφή κειμένων όσο και με τη μορφή καταγραφών ανασυρομένων από κατάλληλη βάση δεδομένων. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του ιστότοπου και της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό αυτό να είναι εύκολα προσβάσιμο και εύχρηστο, ώστε να μπορούν οι χρήστες να εντοπίζουν άμεσα τις ομοιότητες / διαφορές των τριών γλωσσικών κοινοτήτων. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή προσφέρει τη δυνατότητα πρόσβασης ανά πάσα στιγμή σε βασικές πληροφορίες σχετικά με τα κύρια πολιτιστικά στοιχεία κάθε κοινότητας, ακόμα και σε περιπτώσεις που ο χρήστης δεν έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Improving aural cultural links between different lingual communities in Thrace: Implementation of web-site and mobile application.

ABSTRACT

The co-existence of different language communities in Thrace contributed to the creation of cultural links amongst them. These links are found in the cultural aspects of each language community, creating a distinctive cultural landscape. The region's unique cultural identity is an important field of study, as it represents the outcome of the cultural elements of these language communities over the centuries. The work reported to in this paper aims at a presentation of intercultural aspects of the three language communities of Thrace (speaking Greek, Pomak and Turkish, respectively) through technology, namely by the use of audio recordings, and at highlighting the links between them. To achieve this purpose, a web site and a mobile application were created, so that users would be able to access the cultural elements of these language communities through the recorded, transcribed and translated material of an appropriate database. The design and development of the site and of the application was performed in such a way that the material is easily accessible and visible so that users can immediately identify the similarities / differences between the three language communities. Additionally, the application offers convenient access to key information on the main cultural elements of every community, even in absence of internet connectivity.

Εισαγωγή

Οι νέες τεχνολογίες και ειδικότερα το διαδίκτυο διαδίδονται με ταχύτατους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια και παίζουν σημαντικό ρόλο στη διάδοση

πληροφοριών και ιδεών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διείσδυση του διαδικτύου στη χώρα μας, σύμφωνα με στοιχεία του 2015, ξεπερνά το 60% [1]. Σε αυτό έχει συμβάλει και η αυξανόμενη χρήση έξυπνων κινητών συσκευών όπου η διείσδυση τους ήδη από το 2013 είχε ξεπεράσει το 30% [2]. Στη νέα λοιπόν αυτή πραγματικότητα όπου ο χρήστης είναι συνεχώς «συνδεδεμένος» είναι πολύ σημαντικό οι νέες τεχνολογίες να αποτελέσουν σύμμαχο στη διατήρηση και διάδοση της πολιτισμικής κληρονομιάς και να συμβάλουν στην ανάδειξή της.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η υλοποίηση μιας εφαρμογής ιστοτόπου και μιας εφαρμογής για κινητές συσκευές και η ελεύθερη διάδοσή τους στο ευρύ κοινό.

1. Υποδομή

Η πρώτη ουσιαστική ανάγκη που παρουσιάστηκε κατά το σχεδιασμό των εφαρμογών ήταν η εύρεση ενός εξυπηρετητή ο οποίος θα χρησίμευε για τη φιλοξενία αφενός του ιστοτόπου και αφετέρου του οπτικοακουστικού υλικού ώστε αυτό να είναι διαθέσιμο τόσο στον ιστότοπο όσο και στην εφαρμογή για κινητές συσκευές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Okeanos [3] που παρέχεται από το Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ) και η οποία παρέχει την υποδομή ως υπηρεσία (Infrastructure as a Service - IaaS). Παρέχει, δηλαδή, υλικό, λογισμικό και αποθηκευτικό χώρο με την μορφή υπηρεσίας εξαλείφοντας την ανάγκη διαχείρισης του υλικού και του δικτύου και θέτοντας υψηλότερα επίπεδα ποιότητας και ασφάλειας. Στους πίνακες 1.1 και 1.2 φαίνονται οι προδιαγραφές του υλικού και το λογισμικό που εγκαταστάθηκε στον εξυπηρετητή αντίστοιχα.

Πίνακας 1.1 Προδιαγραφές εξυπηρετητή
εξυπηρετητή

Σκληρός Δίσκος	100GB
Επεξεργαστής	2CPU
Μνήμη RAM	8GB

Πίνακας 1.2 Λογισμικό

Windows Server 2012 R2
IIS 8.5
MySQL 5.1
PHP 5.5
Joomla 3.5

Έχοντας εγκαταστήσει και ρυθμίσει κατάλληλα το λογισμικό σειρά είχε η δημιουργία των κατάλληλων χώρων στον IIS όπου θα φιλοξενούνταν τόσο ο ιστότοπος (Ενότητα 2) όσο και το οπτικοακουστικό υλικό. Η ανάγκη να φιλοξενηθεί το ηχητικό υλικό σε ξεχωριστό χώρο και να έχουν πρόσβαση σε αυτό τόσο ο ιστότοπος όσο και η εφαρμογή για κινητές συσκευές κρίθηκε απαραίτητη γιατί με αυτόν τον τρόπο το υλικό θα είναι κοινόχρηστο και επειδή θα βρίσκεται συγκεντρωμένο σε ένα σημείο θα είναι ευκολότερη η διαχείριση του και επίσης, ειδικά όσον αφορά την εφαρμογή για κινητά, η ενσωμάτωση του θα αύξανε κατά πολύ τον όγκο της οπότε ήταν αναγκαία η απομακρυσμένη πρόσβαση σε αυτό μέσω διαδικτύου.

2. Λογότυπο

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο σχεδιασμό του λογοτύπου, Σχήμα 2.1, που θα χρησιμοποιούταν τόσο στον ιστότοπο όσο και στην εφαρμογή για κινητές συσκευές. Το λογότυπο αυτό αντιπροσωπεύει την ουδετερότητα, την ισότητα και την αλληλεγγύη μεταξύ των γλωσσικών κοινοτήτων. Το λογότυπο επιλέχθηκε σκόπιμα να μην είναι προοπτικό σχέδιο, με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας της αίσθησης του βάθους δίνοντας την εντύπωση της προώθησης μιας συγκεκριμένης γλωσσικής κοινότητας.



Σχήμα 2.1 Λογότυπο

3. Ιστότοπος

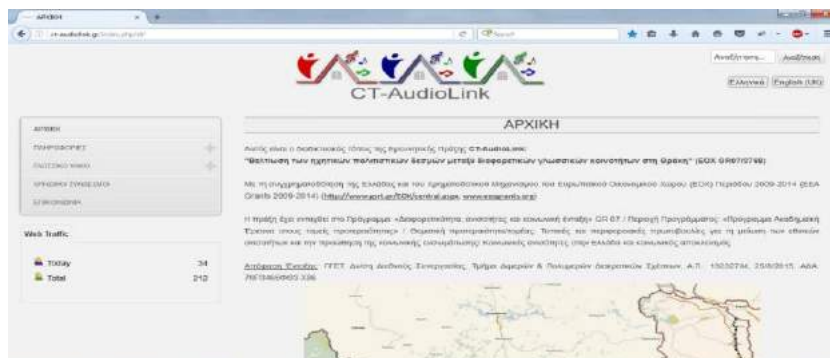
Βασικός σκοπός της εργασίας ήταν ο σχεδιασμός μιας εφαρμογής ιστοτόπου που θα παρουσιάζει το οπτικοακουστικό πολυπολιτισμικό υλικό με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για τη διάδοση (δια του ηχογραφημένου υλικού) των παραδόσεων κάθε γλωσσικής κοινότητας της Θράκης (ελληνική, τουρκική, πομακική), συμπεριλαμβάνοντας σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συνύπαρξη τριών διαφορετικών πολιτισμικών ομάδων.

3.1 Δημιουργία τελικής έκδοσης ιστοτόπου

Η τελική έκδοση του ιστοτόπου μεταφέρθηκε από τον τοπικό υπολογιστή, στον οποίο αναπτύχθηκε, στον διακομιστή που δημιουργήθηκε από την υπηρεσία Okeanos (βλ. Ενότητα 1) ώστε να είναι πλέον διαθέσιμο στο κοινό. Με την αγορά του απαιτούμενου domain, το τελικό URL είναι <http://www.ct-audiolink.gr>.

Ο ιστότοπος είναι διαθέσιμος σε 2 βασικές γλώσσες (ελληνικά, αγγλικά) ώστε να είναι προσβάσιμος σε ελληνόφωνους και μη. Η επιλογή γλώσσας φαίνεται πάνω δεξιά του ιστοτόπου με τη χρήση των λέξεων “Ελληνικά” και “English (UK)”.

3.2 Δημιουργία κύριου μενού

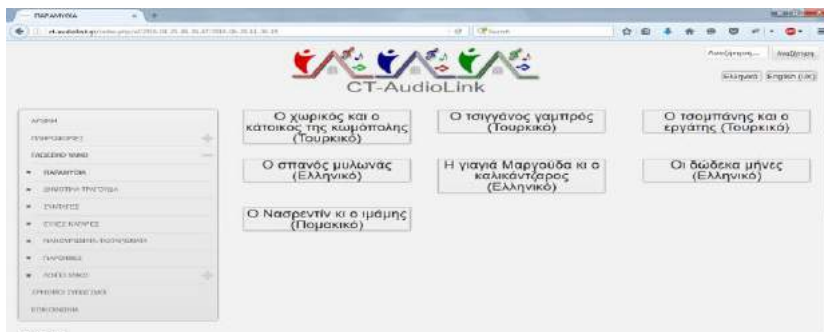


Σχήμα 3.1 Κύριες κατηγορίες μενού

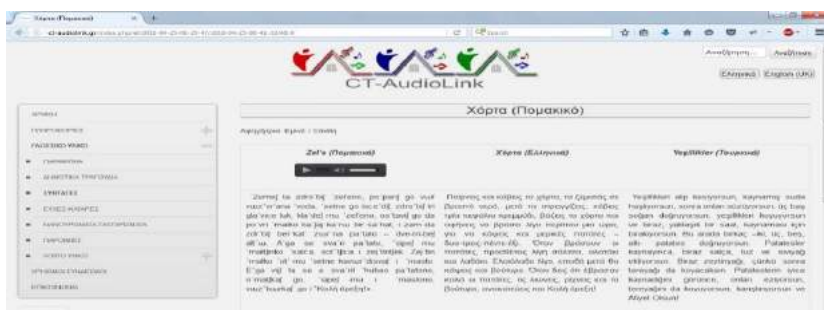
Το μενού βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του ιστοτόπου και κατηγοριοποιείται σε 5 κύριες κατηγορίες (ΑΡΧΙΚΗ, ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ, ΓΛΩΣΣΙΚΟ ΥΛΙΚΟ, ΧΡΗΣΙΜΟ ΥΛΙΚΟ, ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ) (Σχήμα 3.1) και εν συνεχεία κάθε κατηγορία αποτελείται από αντίστοιχες υποκατηγορίες. Η κατηγορία “ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ” αποτελείται από τις υποκατηγορίες (ΣΚΟΠΟΣ, ΣΥΜΕΤΕΧΟΝΤΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΟΡΗΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ANDROID, ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ, ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ, ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ, ΔΗΜΟΣΙΟΤΗΤΑ, ΠΡΟΟΔΟΣ ΠΡΑΞΗΣ). Η κατηγορία “ΓΛΩΣΣΙΚΟ ΥΛΙΚΟ” αποτελείται από τις υποκατηγορίες (ΠΑΡΑΜΥΘΙΑ, ΔΗΜΟΤΙΚΑ ΤΡΑΓΟΥΔΙΑ, ΣΥΝΤΑΓΕΣ, ΕΥΧΕΣ-ΚΑΤΑΡΕΣ, ΝΑΝΟΥΡΙΣΜΑΤΑ-ΤΑΧΤΑΡΙΣΜΑΤΑ, ΠΑΡΟΙΜΙΕΣ, ΛΟΙΠΟ ΥΛΙΚΟ) και η υποκατηγορία “ΛΟΙΠΟ ΥΛΙΚΟ” αποτελείται από τις υποκατηγορίες (ΕΛΛΗΝΙΚΑ, ΤΟΥΡΚΙΚΑ, ΠΟΜΑΚΙΚΑ). Μέσω της συγκεκριμένης δομής, το οπτικοακουστικό υλικό είναι εύκολα προσβάσιμο και το μενού διαθέτει μεγαλύτερη εργονομία για το χρήστη.

3.2 Δημιουργία κυρίως μενού

Η περιοχή του κυρίως κειμένου στις σελίδες του ιστοτόπου είναι ευρεία, επιτρέποντας η απόσταση της γραμμής και η πυκνότητα του κειμένου να είναι ιδανική. Το περιεχόμενο των κειμένων στις υποκατηγορίες της κατηγορίας “ΓΛΩΣΣΙΚΟ ΥΛΙΚΟ” και “ΛΟΙΠΟ ΥΛΙΚΟ” φαίνονται ως άρθρα με μορφή category blog (Σχήμα 3.2) και χωρίζονται σε 3 στήλες ενώ οι γραμμές είναι ανάλογα με το συνολικό αριθμό των άρθρων της εκάστοτε υποκατηγορίας.



Σχήμα 3.2 Εμφάνιση άρθρων στις υποκατηγορίες του γλωσσικού υλικού



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα κυρίως κειμένου με εποπτεία του υλικού και στις τρεις γλώσσες ενδιαφέροντος (ελληνικά, τουρκικά, πομακικά)

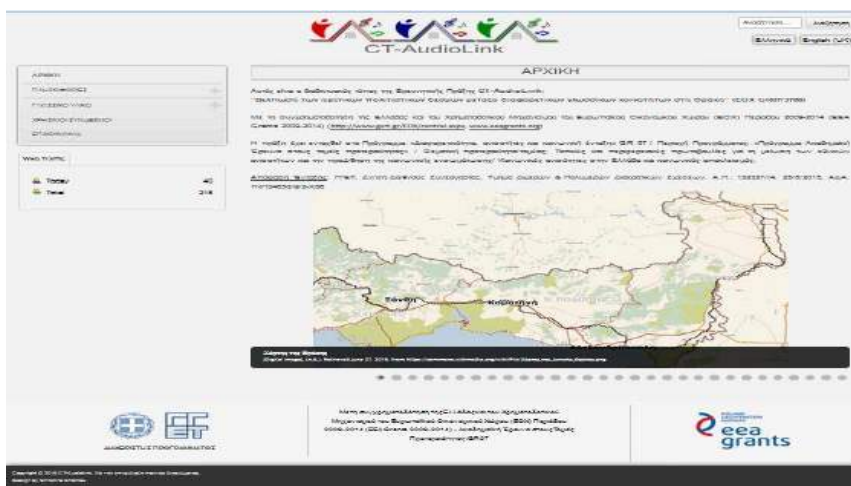
Επίσης, το κυρίως κείμενο που προβάλλεται στον ιστότοπο έχει κατάλληλη δομή, ώστε ο χρήστης να έχει εποπτεία του υλικού και στις τρεις γλώσσες ενδιαφέροντος. Στην αριστερή στήλη πάντα φαίνεται η γλώσσα που ανήκει το άρθρο με τη δυνατότητα ακρόασης του αντίστοιχου ηχογραφημένου υλικού, ενώ στις άλλες δυο στήλες φαίνονται οι μεταφράσεις στις υπόλοιπες δυο γλώσσες. Παράδειγμα εμφάνισης με εποπτεία του υλικού και στις τρεις γλώσσες ενδιαφέροντος εμφανίζεται στο Σχήμα 3.3, παρουσιάζοντας μια συνταγή της πομακικής κοινότητας με τίτλο «Χόρτα (Πομακικό)». Τέλος, η γραμματοσειρά έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί ο οποιοσδήποτε χρήστης να διαβάσει το κείμενο άνετα.

4. Εγκατάσταση διαφόρων plugin ανοιχτού κώδικα

Για τις ανάγκες του ακουστικού υλικού, εγκαταστάθηκε ένα plugin ανοιχτού κώδικα, μέσω του οποίου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ακούει το ηχογραφημένο υλικό ενώ παράλληλα το διαβάζει. Επίσης εγκαταστάθηκε ένα module ανοιχτού κώδικα, μέσω του οποίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βλέπει πόσοι χρήστες έχουν επισκεφτεί τον ιστότοπο την τρέχουσα ημέρα και το σύνολο των μέχρι εκείνη την δεδομένη στιγμή επισκέψεων. Οι δυο αυτές πληροφορίες δίνουν μια ένδειξη της επισκεψιμότητας του ιστοτόπου και συνεπώς της διάχυσης που επιτυγχάνεται.

5. Προεπισκόπηση του ολοκληρωμένου template του ιστοτόπου

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.4) φαίνονται όλες οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στην τελική μορφή του ιστοτόπου.



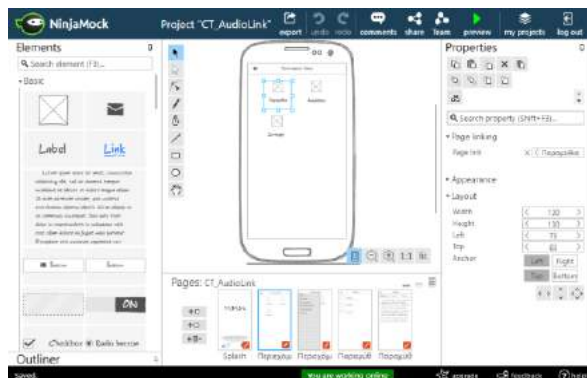
Σχήμα 3.4 Προεπισκόπηση ολοκληρωμένου ιστοτόπου

6. Εφαρμογή

Για την εξυπηρέτηση των εν κινήσει χρηστών υλοποιήθηκε και μια εφαρμογή για κινητές συσκευές μέσω της οποίας διασφαλίζεται η άμεση και εύκολη πρόσβαση στα πολιτισμικά στοιχεία και τι παραδόσεις των κοινοτήτων αυτών και η ανάδειξη των ομοιοτήτων τους και τέλος, την σε πραγματικό χρόνο χρήση της εφαρμογής χωρίς την απαίτηση πρόσβασης στο διαδίκτυο.

6.1 Σχεδιασμός

Έχοντας καθοριστεί οι στόχοι που καλείται η εφαρμογή να καλύψει και ακολουθώντας τις κατευθυντήριες γραμμές και τα πρότυπα που υπάρχουν για το σχεδιασμό των εφαρμογών για κινητές συσκευές εκπονήθηκε ένα storyboard της εφαρμογής χρησιμοποιώντας την διαδικτυακή πλατφόρμα NinjaMock [4]. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η διεπαφή χρήστη της πλατφόρμας καθώς και το σχεδιάγραμμα μιας εκ των οθονών της εφαρμογής.



Σχήμα 4.1 Διεπαφή χρήστη NinjaMock για τη σχεδίαση οθονών εφαρμογής

6.2 Υλοποίηση

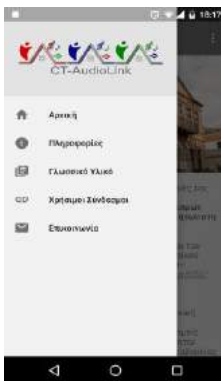
Η εφαρμογή υλοποιήθηκε για το λειτουργικό σύστημα Android χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η υλοποίηση ακολούθησε κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές με σκοπό τη διασφάλιση διαφόρων πτυχών της λειτουργικότητας της εφαρμογής. Η συμβατότητα ήταν καθοριστική αρχή μιας και στο οικοσύστημα του Android υπάρχει πληθώρα διαφορετικών συσκευών. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν βιβλιοθήκες που επιτρέπουν τη χρήση μοντέρνων στοιχείων διεπαφής χρήστη σε παλιότερες εκδόσεις του λειτουργικού. Επίσης, οι οθόνες σχεδιάστηκαν ώστε να προσαρμόζονται δυναμικά ανάλογα με τα τη συσκευή. Η επεκτασιμότητα της εφαρμογής ήταν επίσης σημαντική αρχή γιατί παρόλο που το περιεχόμενο βρίσκεται ενσωματωμένο υπήρχε η ανάγκη να μπορεί να ανανεωθεί άμεσα και εύκολα. Για να γίνει αυτό λοιπόν, το περιεχόμενο της εφαρμογής είναι σε αποθηκευμένο σε αρχεία με μορφή JSON και φορτώνεται κατά την εκκίνηση της εφαρμογής. Τέλος, για να κρατηθεί η επίδοση της εφαρμογής σε υψηλά επίπεδα χρησιμοποιήθηκε κατά κόρων ο ασύγχρονος προγραμματισμός ώστε να μην επιφορτίζεται η κύρια διεργασία καθυστερώντας την διεπαφή χρήστη δημιουργώντας έτσι αρνητική εμπειρία χρήσης.

6.3 Η εφαρμογή

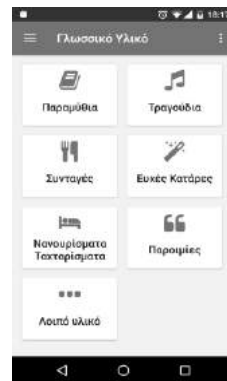
Στην παρούσα ενότητα θα παρατεθούν κάποιες ενδεικτικές οθόνες της εφαρμογής για κινητές συσκευές. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η ορχική οθόνη της εφαρμογής. Για την πλοήγηση του χρήστη στις υπόλοιπες οθόνες της εφαρμογής υπάρχει το μενού πλοήγησης που φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στην οθόνη «Γλωσσικό Υλικό», Σχήμα 4.4, εμφανίζονται οι κατηγορίες στις οποίες κατανεμήθηκε το γλωσσικό υλικό και επιλέγοντας κάποια από αυτές ο χρήστης περιηγείται στο υλικό της συγκεκριμένης κατηγορίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Επιλέγοντας κάποια από τις εγγραφές της κατηγορίας ο χρήστης βλέπει το πλήρες πολιτισμικό υλικό μεταφρασμένο στις γλώσσες και των τριών κοινοτήτων με προεπιλεγμένη την εκάστοτε γλώσσα προέλευσης, Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.2 Αρχική οθόνη



Σχήμα 4.3 Μενού πλοήγησης



Σχήμα 4.4 Οθόνη γλωσσικού υλικού



Σχήμα 4.5 Οθόνη κατηγορίας



Σχήμα 4.6 Οθόνη υλικού

7. Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση και υλοποίηση της εφαρμογής ιστοτόπου καθώς επίσης και της εφαρμογής για κινητές συσκευές με στόχο την ελεύθερη διάδοσή τους στο ευρύ κοινό για την παρουσίαση του οπτικοακουστικού υλικού των τριών γλωσσικών κοινοτήτων (Ελληνική, Πομακική, Τουρκική) της περιοχής της Θράκης.

8. Ευχαριστίες

The research leading to these results has received funding form the [EEA] Mechanism 2009-2014 under Project Contract n° 3768

9. Βιβλιογραφία

[1] <http://www.internetworldstats.com/europa.htm>, ανακτήθηκε 08/07/2016

- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_smartphone_penetration, ανακτήθηκε 08/07/2016
- [3] <https://oceanos.grnet.gr/home/> ανακτήθηκε 08/07/2016
- [4] <https://ninjamock.com/>, ανακτήθηκε 08/07/2016

Συνέδριο B9: Περιβαλλοντική ακουστική - Ηχορύπανση

ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΧΛΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΙΚΩΝ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΟΡΥΒΟ

Βασίλης Βασιλειάδης
Υπεύθυνος Εργαστηρίου Αρχιτεκτονικής
Τεχνολογίας / Τμήμα Αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ.
vvasil@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σχετικά λίγες είναι οι κοινωνικές έρευνες για την όχληση του πληθυσμού από τον περιβαλλοντικό θόρυβο στην Ελλάδα σε σχέση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες όπου τέτοιου είδους έρευνες εφαρμόζονται ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την χάραξη στρατηγικών σχεδίων για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού θορύβου.

Η σπουδαιότητα των κοινωνικών ερευνών είναι προφανές καθώς με αυτές αποκτάμε μια ουσιαστική και αναλυτική γνώση του προβλήματος του περιβαλλοντικού θορύβου και των πραγματικών του επιπτώσεων στον πληθυσμό.

Μετά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Παρατηρητηρίου Θορύβου (6 σταθμοί παρακολούθησης θορύβου για 24 μήνες) το επόμενο βήμα της μελέτης ήταν η επιτόπια έρευνα στο πληθυσμό ο οποίος ήταν εκτεθειμένος σε γνωστές στάθμες θορύβου.

Τα κριτήρια για την επιλογή των δύο περιοχών που απεστάλησαν τα ερωτηματολόγια ήταν η διαφοροποίηση τους σε ότι αφορά τις στάθμες θορύβου οι οποίες μετρήθηκαν έτσι ώστε να υπάρχουν οι απόψεις από 2 ακουστικά διαφοροποιημένες περιοχές. Με βάση τα παραπάνω επελέγησαν οι εξής περιοχές :

-Ο οδικός άξονας με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο από ανατολικά προς κέντρο (Β. Όλγας)

-Μια σχετικά ήσυχη αστική περιοχή κατοικιών (Καλαμαριά)

Ένα άλλο κριτήριο ήταν η αναμενόμενη καλή ανταπόκριση των κατοίκων αυτών των δυο περιοχών στην έρευνα καθώς πρόκειται για δυο περιοχές με σχετικά υψηλό βιοτικό επίπεδο.

Το ερωτηματολόγιο είχε δυο μέρη: το πρώτο μέρος αφορούσε στοιχεία που σχετίζονται με την ενόχληση και γενικότερα τον τρόπο που οι κάτοικοι αντιλαμβάνονται το ηχητικό περιβάλλον στον τόπο της κατοικίας τους και το δεύτερο μέρος σχετίζεται με την 'διαχείρισή' του θορύβου από τους κατοίκους καθώς και με τις ενέργειες αντιμετώπισης του θορύβου.

Μετά την αξιολόγηση των απαντήσεων και έχοντας υπόψη τα αποτελέσματα της κοινωνικής έρευνας σε ότι αφορά τα επίπεδα ενόχλησης και τα επίπεδα θορύβου τα οποία προκάλεσαν τη συγκεκριμένη ενόχληση έγινε και σύγκριση με τα αντίστοιχα που προτείνει το position paper της Ευρωπαϊκής Κοινότητας

RESPONSE FUNCTIONS FOR ENVIRONMENTAL NOISE IN RESIDENTIAL AREAS – THESSALONIKI GREECE

ABSTRACT

Not many social surveys about the relationship between noise exposure and the subjective reactions to it were made in Greece. After collecting the data from a long term noise monitoring System which was installed in 6 areas of Thessaloniki 2 of them were chosen to investigate the response functions for environmental noise. The Noise Indicators L_{night} and L_{den} (day-evening-night) were used in the survey. Non acoustical factors were also considered in the response functions. The results were compared with the European "Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance" and "the Position paper on dose-effect relations for night time noise",

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας πάνω από 1000 ερωτηματολόγια απεστάλησαν σε κατοικίες 2 περιοχών της Θεσσαλονίκης για τις οποίες υπήρχαν μακροχρόνιες μετρήσεις. Τα κριτήρια για την επιλογή των δύο περιοχών που απεστάλησαν τα ερωτηματολόγια ήταν η διαφοροποίηση τους σε ότι αφορά τις στάθμες θορύβου οι οποίες μετρήθηκαν έτσι ώστε να υπάρχουν οι απόψεις από 2 ακουστικά διαφορετικές περιοχές. Με βάση τα παραπάνω επελέγησαν οι εξής περιοχές :

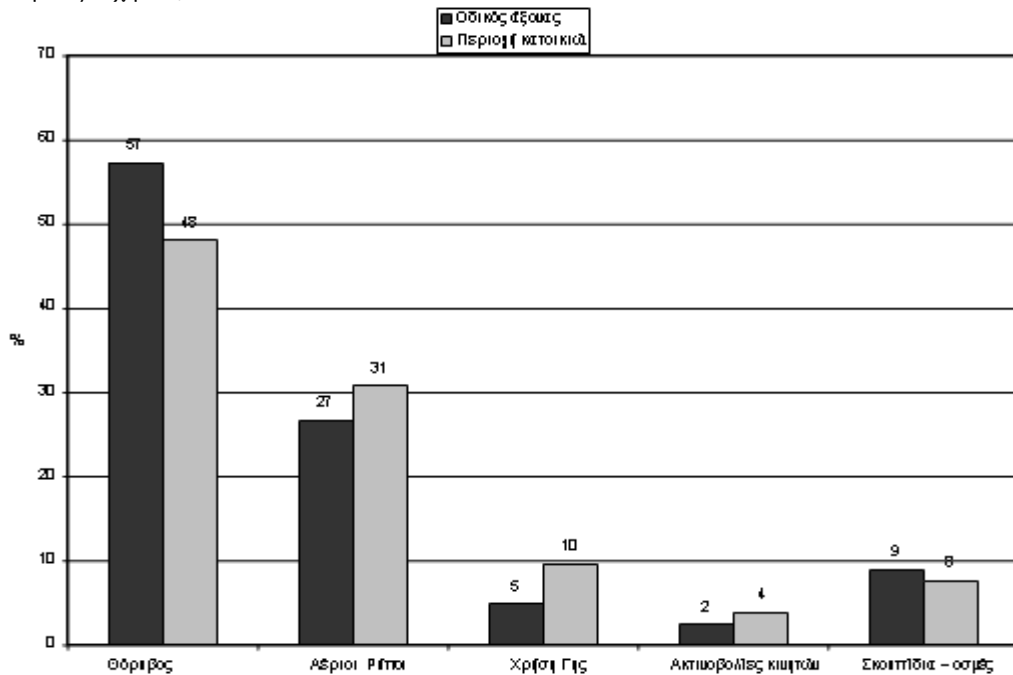
-Ο οδικός άξονας με μεγάλο κυκλοφοριακό φόρτο από ανατολικά προς κέντρο (B. Όλγας)

-Μια σχετικά ήσυχη αστική περιοχή κατοικιών (Καλαμαριά)

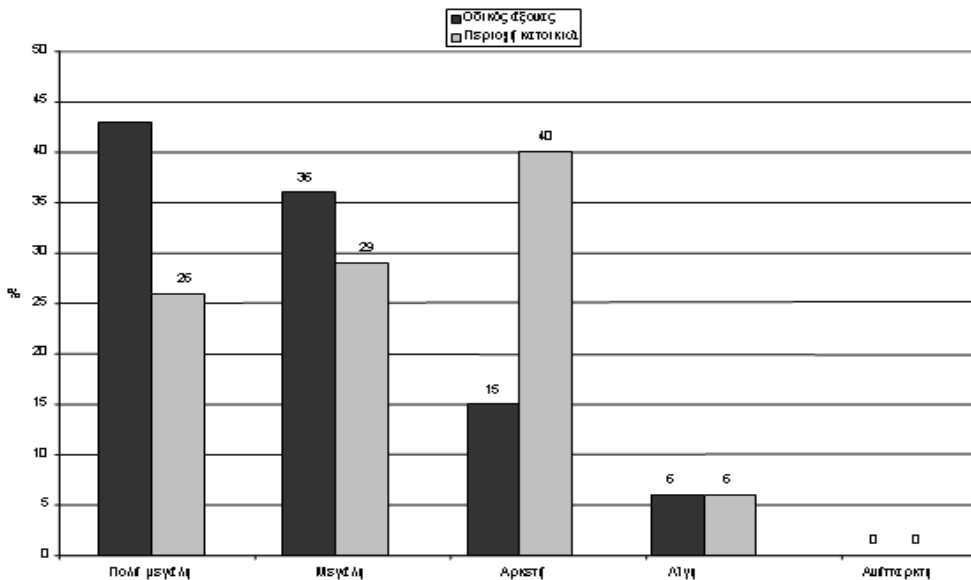
Από τα 1000 ερωτηματολόγια που απεστάλησαν στις παραπάνω περιοχές τα 204 επεστράφησαν απαντημένα. Το ποσοστό των απαντήσεων βρίσκεται στο 20% και θεωρείται αρκετά υψηλό για τέτοιου είδους έρευνα ενώ αναδεικνύει από μόνο του πως το θέμα του θορύβου απασχολεί τον κόσμο. Το ερωτηματολόγιο περιλάμβανε τόσο γενικές ερωτήσεις για περιβαλλοντολογικά θέματα όσο και ειδικές για την όχληση από τον θόρυβο σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Μια άλλη σημαντική ενότητα του ερωτηματολογίου ήταν οι αντιδράσεις του κόσμου στον θόρυβο καθώς και το μέγεθος της όχλησης από τον θόρυβο.

1. Σημαντικότερα Αποτελέσματα Ερωτηματολογίου

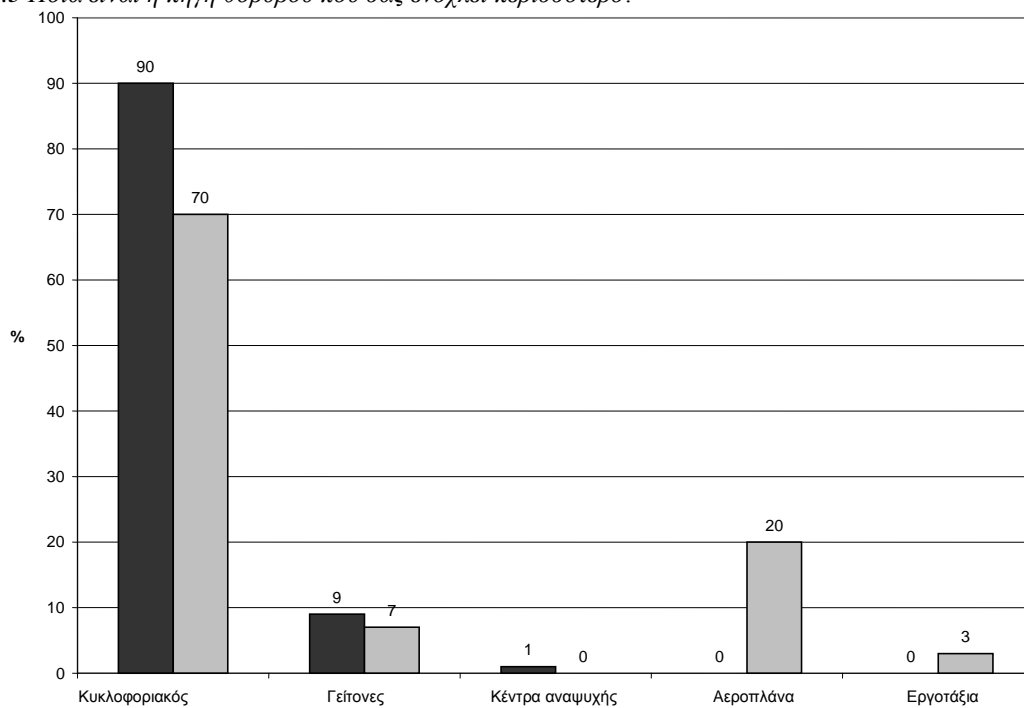
1.1 Ποιο είναι το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζετε στην περιοχή σας;



1.2 Στην κατοικία σας η όχληση από τον θόρυβο είναι



1.3 Ποια είναι η πηγή θορύβου που σας ενοχλεί περισσότερο?



2. Σχέσεις έκθεσης αντίδρασης

Οι σχέσεις έκθεσης αντίδρασης προσπαθούν να ορίσουν μια συγκεκριμένη σχέση μεταξύ της έκθεσης σε συγκεκριμένη στάθμη θορύβου και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και της γενικής όχλησης ή της διαταραχής του ύπνου. Ωστόσο η αντίληψη για το μέγεθος της όχλησης επηρεάζεται και από πλήθος άλλων παραγόντων πέρα από τη στάθμη θορύβου στην οποία είναι εκτεθειμένος κάποιος άνθρωπος. Αυτοί οι παράγοντες είναι

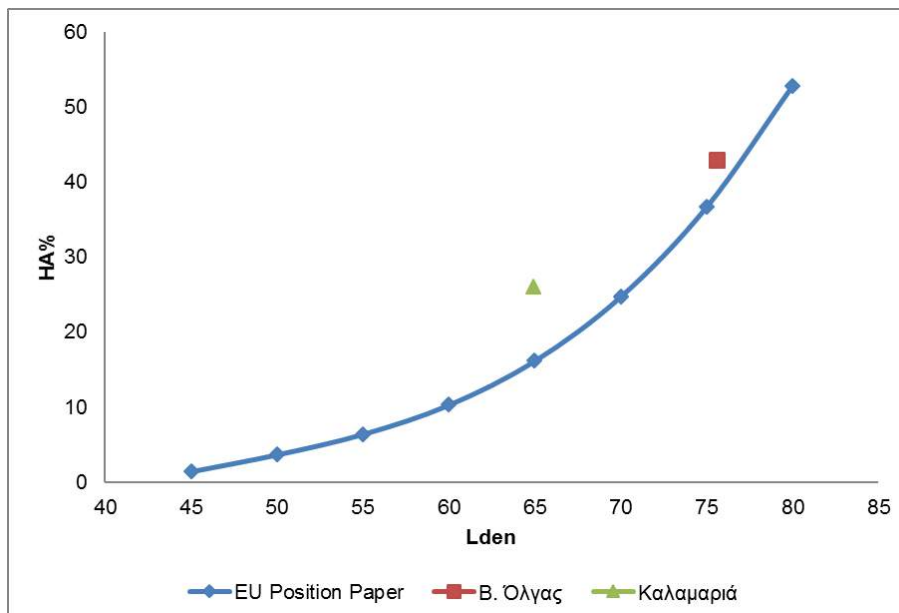
- προσωπική ευαισθησία στο θόρυβο
- χρονική στιγμή έναρξης θορύβου (μέρα, νύχτα)
- χώρος παραμονής (εσωτερικός, εξωτερικός)
- άποψη - γνώμη για την πηγή θορύβου
- αίσθηση της δυνατότητας αντιμετώπισης της πηγής θορύβου
- εμπιστοσύνη στην υπεύθυνη αρχή καταπολέμησης του θορύβου
- δυνατότητα πρόσβασης σε ήσυχη πρόσοψη κατοικίας
- απόσταση από πηγή θορύβου
- ορατότητα πηγής θορύβου
- ηλικία
- εκτίμηση για μελλοντική όχληση
- εποχή χρόνου
- εκτίμηση κοινής γνώμης για την πηγή θορύβου

Έτσι υπάρχουν μελέτες όπως των Brink et al. που ισχυρίζονται πως μόνο ένα 15% της αντίληψης για το μέγεθος της όχλησης εξαρτάται από τη στάθμη θορύβου καθώς και του Guski όπου το αντίστοιχο ποσοστό εκτιμάται στο 33%.

Πολλές από τις επιδράσεις του θορύβου έχουν και άμεσες οικονομικές συνέπειες. Έτσι η μείωση της αξίας ενός ακινήτου μπορεί να συνδεθεί με την αύξηση της γενικής όχλησης που προκαλεί ο θόρυβος στη συγκεκριμένη περιοχή. Σε ότι αφορά τις επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου και αυτές επιφέρουν οικονομικές συνέπειες τόσο από τα έξοδα θεραπείας όσο και από την απώλεια της παραγωγικής δραστηριότητας του ατόμου.

3. Σύγκριση ποσοστών γενικής ενόχλησης και διαταραχής ύπνου

Έχοντας υπόψη τα αποτελέσματα της κοινωνικής έρευνας σε ότι αφορά τα επίπεδα ενόχλησης και τα επίπεδα θορύβου τα οποία προκάλεσαν τη συγκεκριμένη ενόχληση μπορούμε να τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα που προτείνει το position paper της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

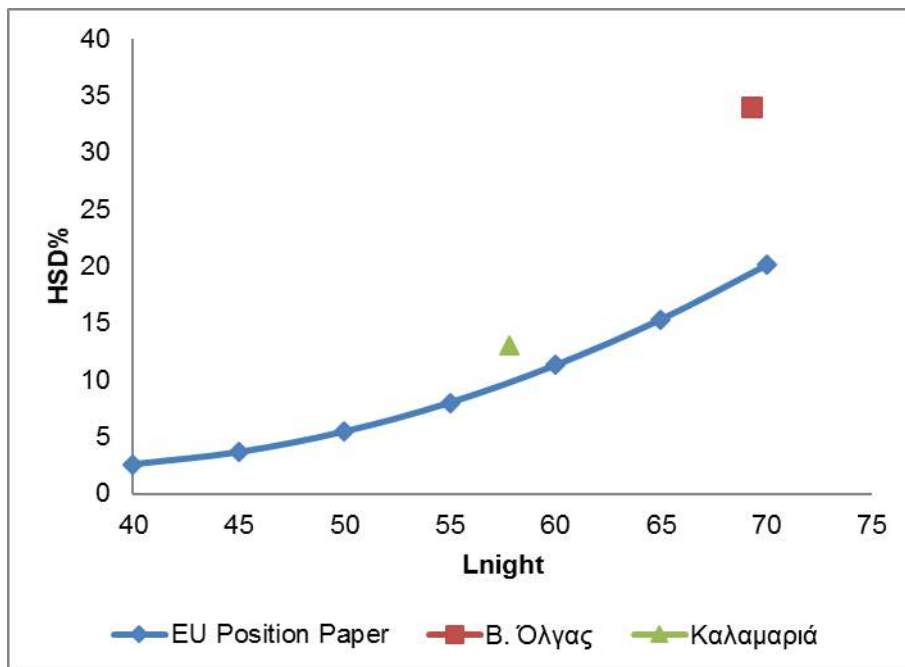


Σχήμα 3.1 Συγκριτικό γράφημα ποσοστού ιδιαίτερα ενοχλημένων (highly annoyed) συναρτήσει του δείκτη Lden

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως τόσο στη περιοχή της Βασ. Όλγας (κόκκινο σημείο) όσο και στη περιοχή Αιγαίου της Καλαμαριάς (πράσινο σημείο) το ποσοστό αυτών που νιώθουν ιδιαίτερα ενοχλημένοι είναι μεγαλύτερο για τις ίδιες στάθμες θορύβου (Lden) από τα αντίστοιχα ποσοστά που αναδεικνύει το position paper της Ευρωπαϊκής Κοινότητας το οποίο βασίζεται σε πλήθος μελετών που υλοποιήθηκαν σε χώρες της Κοινότητας. Και αν το ποσοστό της Βασ. Όλγας είναι πολύ κοντά στη καμπύλη του position paper δεν συμβαίνει το ίδιο για την Καλαμαριά όπου έχουμε διαφοροποίηση με σημαντικά υψηλότερο ποσοστό ενοχλημένων. (26% ;έναντι 16% για Lden=65dB(A))

Κυκλοφοριακός θόρυβος, (position paper)

$$\%HA = 0,5118(L_{den}-42) - 1,436 \times 10^{-2}(L_{den}-42)^2 + 9,868 \times 10^{-4}(L_{den}-42)^3$$



Σχήμα 3.2 Συγκριτικό γράφημα ποσοστού με ιδιαίτερα διαταραγμένο ύπνο (highly sleep disturbed) συναρτήσει του δείκτη Lnight

Και στη περίπτωση του ποσοστού των κατοίκων που αντιλαμβάνονται ιδιαίτερα μεγάλες διαταραχές ύπνου (highly sleep disturbed) διαπιστώνουμε πως και πάλι τα ποσοστά της Βασ. Όλγας και της Καλαμαριάς βρίσκονται πάνω από τα αντίστοιχα του position paper της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Ωστόσο εδώ έχουμε τα ποσοστά της Καλαμαριάς πολύ κοντά στην καμπύλη της ΕΚ ενώ το ποσοστό της Βασ. Όλγας διαφοροποιείται σημαντικά.

Για το κυκλοφοριακό θόρυβο έχουμε :(position paper)

$$\%HSD = 20,8 - 1,05 L_{night} + 0,01486 L_{night}^2$$

Το γεγονός πως και για τις δυο περιοχές (Βασ. Όλγας, Καλαμαριά) τόσο όσο αφορά την γενική ενόχληση όσο αφορά και την διαταραχή ύπνου τα ποσοστά των κατοίκων που δηλώνουν ιδιαίτερα ενοχλημένοι είναι και στις 4 περιπτώσεις πάνω από τα αντίστοιχα ποσοστά που δίνει το position paper της Ε.Κ. δεν είναι τυχαίο. Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν μελέτες που ισχυρίζονται πως μόνο ένα 15% ως 35% της αντίληψης για το μέγεθος της όχλησης εξαρτάται από τη στάθμη θορύβου. Η αντίληψη για το μέγεθος της όχλησης επηρεάζεται και από πλήθος άλλων παραγόντων πέρα από τη στάθμη θορύβου στην οποία είναι εκτεθειμένος κάποιος άνθρωπος.

Αυτοί οι παράγοντες που επηρεάζουν και ανεβάζουν τα ποσοστά των κατοίκων που αντιλαμβάνονται μεγάλη όχληση στην περίπτωση της Βασ. Όλγας και της Καλαμαριάς πιθανόν να είναι

- αίσθηση της δυνατότητας αντιμετώπισης της πηγής θορύβου
- εμπιστοσύνη στην υπεύθυνη αρχή καταπολέμησης του θορύβου

Οι κάτοικοι και των δυο περιοχών και ιδιαίτερα της Βασ. Όλγας ζούνε εδώ και πολλά χρόνια με τις ψηλές στάθμες του κυκλοφοριακού θορύβου χωρίς να βλέπουν την οποιαδήποτε προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος. Φυσικά και δεν μπορούμε να μιλήσουμε για εμπιστοσύνη προς οποιαδήποτε αρμόδια αρχή. Αυτό προκύπτει και από τις απαντήσεις στο ερώτημα " τι σκοπεύετε να κάνετε για να αντιμετωπίσετε το Θόρυβο" όπου έχουμε το 31% στη Βασ. Όλγας και το 41% στη Καλαμαριά να δηλώνει πως θα διαμαρτυρηθεί στις Αρμόδιες αρχές θεωρώντας πως δεν γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες για να μειωθεί το πρόβλημα του κυκλοφοριακού θορύβου. Οι κάτοικοι νιώθουν ουσιαστικά εγκαταλελειμμένοι από οποιαδήποτε αρμόδια αρχή στο θέμα αντιμετώπισης του κυκλοφοριακού θορύβου.

4. Αναφορές

[1] Fidell S. Schultz T. «Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance» Journal of the Acoustical Society of America 89 (1991)

[2] European Commission : Position paper on dose response relationship between transportation noise and annoyance Luxemburg (2002)

[3] European Commission : Position paper on dose effect relationship for night time noise (2004)

[4] Brink et al «Laermstudie 2000» ETH Zuerich, Zentrum fuer Organisations undArbeitswissenschaften (2005) .

[5] Guski R. «Tendenzen und Desiderate der Laermwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts» Zeitschrift fuer Laermbekaempfung 50 (2003)

Το εργαστήριο των “Ηχοερευνητών” ως εισαγωγή σε βασικές έννοιες της Ακουστικής Οικολογίας

Κίμων Παπαδημητρίου
Δρ Αγρονόμος και Τοπογράφος
Μηχανικός, Εργαστηριακό
Διδακτικό Προσωπικό / Τμήμα
Αγρονόμων και Τοπογράφων
Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή,
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, ΤΚ 54124,
Θεσσαλονίκη
paki@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

“Ηχοερευνητές” είναι ο τίτλος ενός βιωματικού εργαστηρίου που προορίζεται για την εκπαίδευση ερευνητών στις διαδικασίες αναζήτησης, καταγραφής και παρουσίασης ηχοτοπίων. Μια τέτοιου είδους εκπαίδευση απαιτεί την ανάπτυξη ενός θεωρητικού υποβάθρου παράλληλα με κάποιες τεχνικές δεξιότητες. Στην παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζεται ο οδηγός μαθήματος για αυτό το εργαστήριο, όπου περιγράφονται οι εκπαιδευτικοί του στόχοι. Στη συνέχεια αξιολογούνται κάποια από τα αποτελέσματα της διεξαγωγής του συγκεκριμένου εργαστηρίου με ομάδες φοιτητών. Τελικά προτείνεται η υιοθέτηση αυτής της δραστηριότητας ως μια βάση για πιο προχωρημένα μαθήματα που σχετίζονται με τα πεδία της Ακουστικής Οικολογίας.

The workshop of “Soundexplorers” as an introduction to the basic meanings of Acoustic Ecology

ABSTRACT

“Soundexplorers” is the title of a workshop dedicated to the training of researchers at the procedures of surveying, documenting and presenting of soundscapes. Such a training requires the development of a theoretical background for the acoustic environment besides some technical skills. This paper initially presents the course outline of this workshop where its learning objectives are described. Sequentially it reviews some of the results from the conduction of this particular workshop with groups of students. Finally it is proposed the adoption of this activity as a basis for more advanced courses related to the fields of Acoustic Ecology.

1. Εισαγωγή

Από το 2006 που συγκροτήθηκε η πρώτη ομάδα έρευνας για τα ελληνικά ηχοτοπία [1], μελετητές διαφόρων ειδικοτήτων έρχονται συχνότερα σε επαφή με τις έννοιες της Ακουστικής Οικολογίας. Στα πλαίσια των δραστηριοτήτων των μελών της Ελληνικής Εταιρείας Ακουστικής Οικολογίας (ΕΕΑΟ), προέκυψε η ανάγκη κατάρτισης προσωπικού στις διαδικασίες ακρόασης - ηχογράφησης για την τεκμηρίωση ηχοτοπιών ή για την επεξεργασία δεδομένων που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του ακουστικού περιβάλλοντος [2]. Παράλληλα, η ίδια ομάδα έρευνας, ανέπτυξε ένα πρωτόκολλο για την καταγραφή και χαρτογραφική απόδοση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του ακουστικού περιβάλλοντος [3], με σκοπό την μελέτη των χωροχρονικών του διακυμάνσεων [4], [5]. Έκτοτε η εξοικείωση με τον τρόπο εφαρμογής του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου αποτέλεσε την βάση για την προετοιμασία ομάδων ερευνητών εν όψει νέων καταγραφών στο πεδίο [6], [7] ή για την αναπαράσταση ηχοτοπιών [8]. Σταδιακά η επανάληψη της διαδικασίας κατάρτισης φοιτητών, εκπαιδευτικών και ερευνητών, έχει διαμορφώσει μια νέα εκπαιδευτική δραστηριότητα, τους *Ηχοερευνητές* [9].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει το εργαστήριο των “Ηχοερευνητών” ως μια εκπαιδευτική δραστηριότητα για την εισαγωγή των συμμετεχόντων σε βασικές έννοιες της Ακουστικής Οικολογίας. Προς αυτήν τη κατεύθυνση, παρουσιάζονται αρχικά η δομή και οι εκπαιδευτικοί στόχοι του εργαστηρίου και ακολούθως γίνεται μια ανασκόπηση των αποτελεσμάτων από την διεξαγωγή του εργαστηρίου με ομάδες φοιτητών του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών (ΤΑΤΜ) στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), κατά το διάστημα 2014 – 2016. Τέλος προτείνεται μια σειρά από δραστηριότητες εμβάθυνσης, οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε συνέχεια του εργαστηρίου για τη σύνδεση με ειδικότερα θεωρητικά ή πρακτικά θέματα ακουστικής οικολογίας, γεωγραφίας του ήχου, ψηφιακής τεκμηρίωσης – αρχειοθέτησης, επεξεργασίας – ανάλυσης δεδομένων και αναπαραστάσεων ηχοτοπιών.

2. Μεθοδολογία

Το εργαστήριο των “Ηχοερευνητών” αφορά στην εξοικείωση με τη διαδικασίες αναζήτησης, καταγραφής και περιγραφής ιδιαίτερων ηχητικών καταστάσεων ή σπάνιων μεμονωμένων ήχων και απευθύνεται σε κοινό χωρίς κάποια προηγούμενη κατάρτιση ή εκπαίδευση σχετικά με την Ακουστική Οικολογία.

2.1 Δομή

Η πραγματοποίηση του εργαστηρίου περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα: α) την ενημέρωση των συμμετεχόντων και την παρουσίαση των υλικών (εξοπλισμού και λογισμικού) που θα χρησιμοποιηθεί, β) την συγκρότηση και προετοιμασία των ομάδων - συνεργείων για την καταγραφή δεδομένων, γ) την εξερεύνηση του ηχητικού περιβάλλοντος για τον εντοπισμό σπάνιων ήχων ή ιδιαίτερων ακουστικών καταστάσεων, δ) την καταγραφή (ηχογράφηση, ηχομέτρηση και συλλογή περιγραφικών δεδομένων) για τη διαμόρφωση του υλικού τεκμηρίωσης μιας

έρευνας ηχοτοπίου, ε) την κατάλληλη επεξεργασία και ψηφιακή αρχειοθέτηση του υλικού τεκμηρίωσης, στ) την περιγραφή - παρουσίαση του ηχοτοπίου που μελετήθηκε και ζ) την υποβολή (ανάρτηση στο διαδίκτυο) του υλικού τεκμηρίωσης και παρουσίασης.

Η δραστηριότητα ολοκληρώνεται με την ανακεφαλαίωση των εκπαιδευτικών στόχων, την ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και την ανατροφοδότηση από τους συμμετέχοντες.

2.2 Υλικά

Τα ελάχιστα υλικά που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του εργαστηρίου, τα οποία θα πρέπει να έχει στη διάθεσή του τουλάχιστον ένας από την κάθε ομάδα συμμετεχόντων, περιλαμβάνουν: α) μολύβι ή στυλό με σημειωματάριο, β) “έξυπνο” κινητό τηλέφωνο (smartphone) ή φορητός Η/Υ (laptop ή tablet). Για την ολοκλήρωση του εργαστηρίου απαιτούνται επίσης, πρόσβαση στο διαδίκτυο και ένας λογαριασμός email.

Άλλα υλικά που διευκολύνουν την πραγματοποίηση του εργαστηρίου είναι: α) ντοσιέ ή επιφάνεια γραφής, β) χρονόμετρο ή ρολόι, γ) φωτογραφική μηχανή ή φορητή συσκευή (smartphone ή tablet) με κάμερα, δ) καταγραφικό ήχου ή φορητή συσκευή (smartphone ή tablet) με μικρόφωνο και κατάλληλο λογισμικό ηχογράφησης, ε) μετρητής στάθμης θορύβου ή φορητή συσκευή (smartphone ή tablet) με μικρόφωνο και κατάλληλο λογισμικό ηχομέτρησης, στ) έντυπος ή ψηφιακός χάρτης – διάγραμμα της περιοχής, ζ) συσκευή GPS ή φορητή συσκευή (smartphone ή tablet) με δυνατότητα – λογισμικό εντοπισμού θέσης και η) εφαρμογές (εγκαταστημένο λογισμικό ή διαδικτυακές) για επεξεργασία κειμένων, υπολογιστικών φύλλων, παρουσιάσεων και για επεξεργασία και αποθήκευση αρχείων ήχου.

ΕΡΓΑΣΙΑ		Σχεδιάγραμμα	
(ΣΥΝΤΟΜΟΣ ΤΙΤΛΟΣ) Κατηγορή Χαρακτηριστών του Ηχοτοπίου "4_Example"		(ΣΚΑΡΙΝΟΜΑ, ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ Ή ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΑ ΧΑΡΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ)	
Περιγραφή			
Παράδειγμα καταγραφής των χαρακτηριστικών του ηχοτοπίου στην αριτή του σπυταύ με το σπυταύ με το σπυταύ της χρήσης του υπολογιστικού φύλλου			
Χώρα		Επίπεδο, Στάθμη, Μονηρία	
Πόσιος	ΕΡΕΥΝΑΚΗ ΠΟΛΗ, ΝΟΜΟΣ	39.16	
Γεωγραφικό Πόσιος	(ΕΥΔΟΜΜΕ από GPS ή Χάρτη)	23.48	
Γεωγραφικό Μήκος	(ΕΥΔΟΜΜΕ από GPS ή Χάρτη)	Αφρικό, Παράσιση	
Παράσιση	(Χαρακτηριστικό)	Εκτός	
Εύση	ΕΝΤΟΣ ή ΕΧΩΣ		
Χρόνος			
Ημερομηνία	ΕΥΔΟΜΜΕ	21/02/14	
Ώρα	(ΩΔ/Α)	21.15	
Ομάδα Έρευνας Πόσιου			
Συνοπτική			
Όνομα	ΕΡΕΥΝΑΚΗ ΠΟΛΗ, ΝΟΜΟΣ	Κίμν	
Επίσημο	ΕΡΕΥΝΑΚΗ	Ποπαθητριου	
Τηλέφωνο	ΕΡΕΥΝΑΚΗ	2310991132	
Email	(2346700)	rikis@auif.gr	
URL	(NAME@SERV.ΕΡΕΥΝΑΚΗ)	http://auif.gr/auifpages/auif.php	
Κατηγορή			
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗΣ ΕΝΤΥΠΟΥ ΚΑΤΕΓΡΗΦΗΣ			
Όνομα	(ΟΝΟΜΑ)	Ιός	
Επίσημο	ΕΡΕΥΝΑΚΗ	Ποπαθητριου	
Ηχογράφηση			
Όνομα	(ΟΝΟΜΑ)	Κίμν	
Επίσημο	ΕΡΕΥΝΑΚΗ	Ποπαθητριου	
Συσκευή	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΡΟΙΩΝΤΟΣ)	Zoon H2	
Λογισμικό	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΡΟΙΩΝΤΟΣ)	Quick Time	
Αρχείο Ήχου (wav)	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ)	Example20140221_1803.wav	
Ημερομηνία			
Όνομα	(ΟΝΟΜΑ)	Μαρία	
Επίσημο	ΕΡΕΥΝΑΚΗ	Ποπαθητριου	
Συσκευή	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΡΟΙΩΝΤΟΣ)	iPod	
Λογισμικό	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΡΟΙΩΝΤΟΣ)	Decibel 30"	
Αρχείο Μετρήσεων (csv)	(ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΟΥ)	Example20140221_1803.csv	
Μέγιστη Τιμή (dB)	(ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΤΑΘΜΗ - ΡΕΑΚ)	55.37	
Μέση Τιμή (dB)	(ΜΕΣΗ ΣΤΑΘΜΗ - ΑVERAGE)	43.61	
Υλικά Αναφοράς			
(ΕΒΕΥΣΗΡΗ ΠΡΟΒΑΛΜΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ)			
http://auif.gr/wp/?page_id=9			
http://auif.gr/auifpages/auif.php			
http://www.youtube.com/watch?v=G_M_hz886F-I			
http://www.facebook.com/pages/4406/56932292541111			

Σχήμα 1.13 Υπόδειγμα συμπληρωμένου εντύπου εργασιών (α' όψη).

		"ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΗΜΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ"																				
ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΔΙΟΥ	Χρόνος	1'				2'				3'				4'				5'				Σύνολο
		15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	(ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ)
ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΔΙΟΥ	Χαρακτηρισμός (ΣΗΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΗ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ)																					
	Ήχοι Υποβάθρου Θ = Φόθοσος Δ = Ορούσιος	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	20
	Ήχοι Επιφανείας ΕΚ = Σκυλάος ΑΥ = Αυτοκίνητο ΟΜ = Ουαλιός Π = Πουλιός	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	5 8 5 8
	Ήχητες Οδοί Κ = Καμπάνα					2																2
		"ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ"																				
ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΔΙΟΥ	Χρόνος	1'				2'				3'				4'				5'				Σύνολο
		15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	15"	30"	45"	60"	(ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗ)
ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΔΙΟΥ	Κατηγοριοποίηση (ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΗΧΩΝ)																					
	Γεωφυσικοί Θ = Φόθοσος	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	20
	Βιολογικοί ΕΚ = Σκυλάος Π = Πουλιός	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	5 8 13
	Ανθρώπινοι ΟΜ = Ουαλιός Μηχανικοί Κ = Καμπάνα ΑΥ = Αυτοκίνητο																					5 2 8 15

Σχήμα 1.14 Υπόδειγμα συμπληρωμένου εντύπου εργασιών (β' όψη).

Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία καταγραφής, επεξεργασίας και περιγραφής των χαρακτηριστικών των ηχοτοπίων διατίθεται ένα τυποποιημένο για χρήση στο πεδίο ως ημερολόγιο καταγραφής. Το έντυπο συνοδεύεται από ένα διαμορφωμένο αρχείο (σε μορφή xls), το οποίο περιλαμβάνει τρία φύλλα εργασίας, από τα οποία τα δυο πρώτα προορίζονται για την καταχώριση των δεδομένων από το ημερολόγιο καταγραφής (Σχ. 1.1, Σχ 1.2), ενώ το τρίτο προορίζεται για μια συνοπτική παρουσίαση της έρευνας και του τρόπου ανάδειξης των ιδιαιτεροτήτων των ηχοτοπίων, με την μορφή κειμένου [9].

2.3 Εκπαιδευτικοί στόχοι

Με την ολοκλήρωση του εργαστηρίου, οι συμμετέχοντες είναι σε θέση: α) να "εξερευνούν" το ακουστικό περιβάλλον της περιοχής τους και να εντοπίζουν σπάνιους ήχους ή ιδιαίτερες ηχητικές καταστάσεις, β) να αποτυπώνουν τις ιδιαιτερότητες του ακουστικού περιβάλλοντος (με σημειώσεις, ηχογραφήσεις και ηχομετρήσεις), διαμορφώνοντας το υλικό τεκμηρίωσης για την "έρευνά" τους, γ) να αναγνωρίζουν και να κατηγοριοποιούν τα ηχητικά γεγονότα καταγράφοντας την προέλευση (ανθρωπογενείς, βιολογικοί, γεωφυσικοί) και την σημασία τους (υπόβαθρο, επιφάνεια, ηχώσημο), δ) να επεξεργάζονται κατάλληλα το υλικό τεκμηρίωσης και να δημιουργούν σε ψηφιακή μορφή, σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές αρχειοθέτησης, ένα αρχείο (σε μορφή wav) που θα προκύπτει από ηχογράφηση πεδίου κι ένα τυποποιημένο αρχείο (σε μορφή xls), στο οποίο θα καταχωρούνται τα στοιχεία που προκύπτουν από τις "εξερευνήσεις" τους, ε) να περιγράφουν τα ηχοτοπία που "ανακάλυψαν", αναδεικνύοντας την ιδιαιτερότητα των χαρακτηριστικών τους και να παρουσιάζουν το ηχοτοπίο που μελέτησαν είτε περιγραφικά είτε με χρήση συγκεντρωτικών πινάκων, γραφημάτων, διαγραμμάτων

και θεματικών χαρτών και στ) να υποβάλουν διαδικτυακά το υλικό τεκμηρίωσης και την παρουσίαση της έρευνάς τους.

3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα από την διεξαγωγή του εργαστηρίου περιλαμβάνουν περιγραφές με κείμενα, συγκεντρωτικούς πίνακες δεδομένων και χαρτογραφικές συνθέσεις για επιλεγμένα χαρακτηριστικά του ακουστικού περιβάλλοντος που μελετήθηκε. Ως παράδειγμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την αποτύπωση και την χαρτογράφηση χαρακτηριστικών του ακουστικού περιβάλλοντος στην Πανεπιστημιούπολη του ΑΠΘ σε δυο διαδοχικές χρονιές (2014 και 2015) σε δέκα διαφορετικές θέσεις (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Θέσεις καταγραφής του ακουστικού περιβάλλοντος στο ΑΠΘ.

3.1 Αποτύπωση

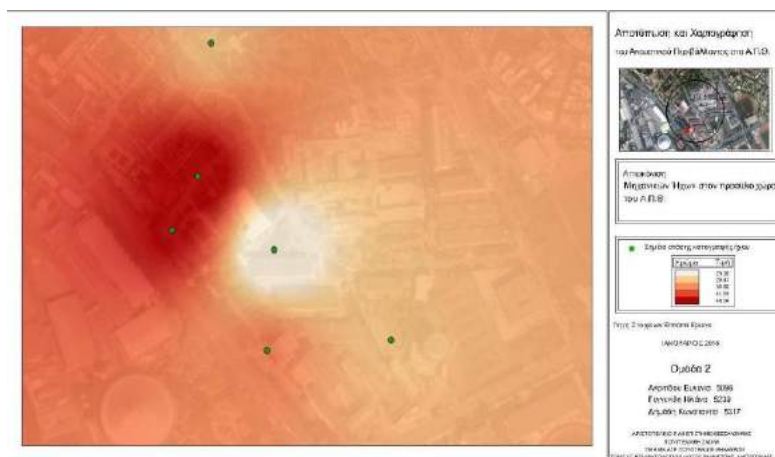
Την πρώτη χρονιά καταγράφηκαν στην διάρκεια πέντε πρώτων λεπτών, ανά δεκαπέντε δευτερόλεπτα, οι αντιλαμβανόμενες εντάσεις για τα ηχητικά γεγονότα σε τέσσερις θέσεις (A1-A3 στις 12/11/2014, 11:20 και A4 στις 21/11/2014, 12:00) και την επόμενη χρονιά σε έξι θέσεις (B1-B6 στις 11/11/2015, 10:45). Στην δεύτερη καταγραφή χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα συσκευές smartphones (iOS ή Android) με κατάλληλα λογισμικά για την ηχογράφηση (WavePad) και την μέτρηση της μέσης και της μέγιστης ηχητικής στάθμης (NoiseWatch). Οι ήχοι κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με την προέλευσή τους σε ανθρώπινους, μηχανικούς, βιολογικούς, γεωφυσικούς και ανάλογα με την σημασία τους ως υποβάθρου ή προσκηνίου. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν τα αθροίσματα των αντιλαμβανόμενων εντάσεων για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του ακουστικού περιβάλλοντος (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.1 Αποτυπωμένα χαρακτηριστικά του ακουστικού περιβάλλοντος στο ΑΠΘ

Θέση	Ανθρώπ.	Μηχαν.	Βιολογ.	Γεωφ.	Υπόβ.	Προσκ.	Db mean/max
A1	27	47	20	0	57	34	-
A2	39	28	3	0	20	50	-
A3	25	20	25	0	35	35	-
A4	9	4	20	47	33	47	-
B1	14	13	14	33	33	41	57/78
B2	41	30	2	42	42	73	65/88
B3	22	49	1	0	25	47	65/74
B4	6	53	22	34	59	56	59/81
B5	16	37	10	8	43	28	47/68
B6	30	30	0	19	55	24	68/82

3.2 Παρουσίαση

Με την ολοκλήρωση του κάθε εργαστηρίου, η παρουσίαση επιλεγμένων χαρακτηριστικών του ακουστικού περιβάλλοντος γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένη ιστοσελίδα, η οποία αποτελεί πλέον ένα αποθετήριο ανταποκρίσεων από ηχοτοπία. Για κάθε θέση γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της περιοχής έρευνας με κείμενο και επισήμανση σε χάρτη (π.χ. http://paki.webpages.auth.gr/MapUse/?page_id=95), όπου στη συνέχεια παρατίθενται για ανάκτηση τα ψηφιακά αρχεία: α) των δεδομένων καταγραφής (xls), β) της ηχογράφησης (wav) και γ) των συντεταγμένων (kml). Τέλος αναδεικνύεται η ιδιαιτερότητα της θέσης καταγραφής με χρήση χάρτη και σύντομο επεξηγηματικό κείμενο (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Θεματική απόδοση της αντιλαμβανόμενης έντασης μηχανικών ήχων στο ΑΠΘ στις 11/11/2015, 10:45 (σύνθεση χάρτη: Η. Γεγγενίδη, Κ. Δημάδη, Ε. Ακριτίδου)

4. Προοπτικές – Συμπεράσματα

Το συγκεκριμένο εργαστήριο θέτει σαφείς εκπαιδευτικούς στόχους στους συμμετέχοντες αποσκοπώντας στην κατανόηση μιας αναγνωρισμένης μεθοδολογίας για την καταγραφή και την ανάδειξη χαρακτηριστικών ηχοτοπίων ή ηχητικών καταστάσεων. Όσοι συμμετέχουν εμπλέκονται σε διαδικασίες ηχογράφησης, ηχομέτρησης και καταγραφών στο πεδίο, επεξεργασίας, ανάλυσης, κατηγοριοποίησης και σύνθεσης δεδομένων στο γραφείο. Μέσα από αυτή την εκπαιδευτική δραστηριότητα, οι “Ηχοερευνητές” έρχονται σε επαφή με βασικές έννοιες της ακουστικής οικολογίας (ηχοτοπίο, ηχητικό γεγονός, ήχοι προσκηνίου/υποβάθρου, ανθρώπινη/μηχανική/βιολογική/γεωφυσική προέλευση, υψηλή/χαμηλή πιστότητα, ηχορύπανση, ηχοποικιλότητα - βιοποικιλότητα κ.α.), η κατανόηση των οποίων γίνεται σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ανάλογων δεξιοτήτων (ακρόασης, αναγνώρισης, χρήσης συσκευών και εξειδικευμένου λογισμικού, χαρτογραφικής σύνθεσης, παρουσίας στο διαδίκτυο). Έτσι, καθώς οι συμμετέχοντες έχουν “φορέσει” πλέον τα αυτιά του ακουστικού οικολόγου είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται, να κατανοούν και να ερμηνεύουν το *Ηχοτοπίο και τις Σημασίες των Ήχων του* [10]. Με αυτόν το τρόπο ο Ηχοερευνητής προετοιμάζεται για πιο προχωρημένα θέματα που σχετίζονται με την Ακουστική Οικολογία, όπως τις μεθόδους ηχογράφησης και ηχομέτρησης στο πεδίο ή την μελέτη της ποιότητας του ακουστικού περιβάλλοντος και την γεωγραφία του ήχου.

Η ολοκλήρωση κάθε εργαστηρίου παράγει μια σειρά αποτελεσμάτων, τα οποία τεκμηριώνουν τα χαρακτηριστικά επιλεγμένων ακουστικών περιβαλλόντων. Παρότι τα αποτελέσματα προκύπτουν με έναν αποσπασματικό τρόπο (προς το παρόν), κάτι το οποίο δεν μπορεί να διασφαλίσει την αντιπροσωπευτικότητά τους, επιτρέπουν την αναγνώριση κάποιων ιδιαίτερων ηχητικών καταστάσεων (ως μια πρώτη ανταπόκριση από το πεδίο). Παράλληλα, καθώς η τεκμηρίωση και η ψηφιακή αρχειοθέτηση γίνεται με έναν τυποποιημένο τρόπο (εν είδει προδιαγραφών) δίνεται η δυνατότητα για συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών ηχοτοπίων ή για την διαχρονική παρακολούθηση των ακουστικών συνθηκών στις επιλεγμένες θέσεις.

5. Ευχαριστίες

Το εργαστήριο πραγματοποιήθηκε για δυο συνεχόμενες ακαδημαϊκές χρονιές (2014-15 και 2015-16) στο ΤΑΤΜ στα πλαίσια του μαθήματος του 5ου εξαμήνου “Χρήση Χάρτη” με υπεύθυνη καθηγήτρια την κα Χρυσούλα Μπούτουρα. Για τις καταγραφές, την ψηφιακή αρχειοθέτηση, την επεξεργασία των δεδομένων και την παρουσίαση των χαρακτηριστικών του ακουστικού περιβάλλοντος στην πανεπιστημιούπολη του ΑΠΘ συμμετείχαν οι φοιτητές: Γεροντίδου Χ., Μακρής Φ., Χονδροκόστας Κ., Δεληγιάννης Β., Κανιούρας Π., Μεντεσιδής Χ., Σαραντιάδου Δ., Ομέρ Α., Τζώτζη Δ., Καρακεκέ Β., Μπαλαούρα Β., Χίνη Κ., Ντόβας Κ., Συμεωνίδης Σ., Τολγκά Α., Γεγγενίδη Η., Δημάδη Κ., Ακριτίδου Ε., Δήμου Π., Ιωαννίδης Ν.-Δ., Κώτσιου Π., Νεστωράς Δ., Αλεξανδρίδης Β., Λιωνάκης Μ.,

Μεντζίνης Χ., Ντόγας Μ., Τατσή Β., Αγγελακάκη Ε., Κεβρεκίδου Σ., Ντιροκάλτση Β., Γεωργίου Α., Ζβίγγου Α., Κατσιώλης Σ. και Φούκα Α.

6. Βιβλιογραφία

- [1] A. Mniestris, I. Etmektsoğlu «The Greek Soundscape Research Group and the Corfu Project» *Soundscape, the Journal of Acoustic Ecology*, **7**, p 42 (2007)
- [2] A. Bassiouka, M. Karakosta, M. Lazoglou, S. Manika, I.-A. Papachristou, E. Rista and K. Papadimitriou «Mapping the sonic attributes: an acoustic approach for studying space» in *CEMEPE/SECOTOX Conference* (2007)
- [3] K.D. Papadimitriou, A.D. Mazaris, A.S. Kallimanis, J.D. Pantis «Cartographic representation of the sonic environment» *Cartographic Journal* **46**, 2 pp126-135 (2009)
- [4] J. Matsinos, A.D. Mazaris, K. Papadimitriou, A. Mniestris, G. Hatzigiannidis, D. Maioglou, J.D. Pantis «Spatio-temporal variability in human and natural sounds in a rural landscape» *Landscape Ecology* **23**, **8**, pp 945-959 (2008)
- [5] A. Mazaris, A. Kallimanis, G. Chatzigiannidis, K. Papadimitriou, J. Pantis «Spatiotemporal analysis of an acoustic environment: interactions between landscape features and sounds» *Landscape Ecology* **24**, **6**, pp 817-831 (2009)
- [6] Κ. Παπαδημητρίου, Κ. Παπαδόπουλος, Α. Κουτσοκλένης, Φ. Μπίμπασης «Προσανατολισμός και Κινητικότητα των Ατόμων με Οπτική Εξασθένιση: Καταγραφή και αναπαράσταση του αντιλαμβανόμενου Ηχοτοπίου της Πανεπιστημιούπολης» in *FORUM Επιτροπής Κοινωνικής Πολιτικής ΑΠΘ “Ανοικτό Πανεπιστήμιο για όλους: Συζητώντας για τα προβλήματα της σπουδάζουσας νεολαίας”* (2007)
- [7] Μ. Καρακώστα, Μ. Λάζογλου, Σ. Μανίκα, Α. Μπασσιούκα., Ι.-Α. Παπαχρήστου, Ε. Ρίστα, Κ. Παπαδημητρίου «Χαρτογράφηση των παραγόντων διαμόρφωσης του ακουστικού περιβάλλοντος στο κέντρο της Βέροιας» *4ο Εθνικό Συνέδριο “Ακουστική 2008”* (2008)
- [8] C. Stratoudakis, K. Papadimitriou «A dynamic interface for the audio-visual reconstruction of soundscape, based on the mapping of its properties» in *SMC07: 4th International Sound and Music Computing Conference*, pp 185-191 (2007)
- [9] Κ. Παπαδημητρίου «“Ηχοερευνητές”: Ανταποκριτές Ηχοτοπίων» in *3ο συνέδριο Ακουστικής Οικολογίας “Ακουστική Οικολογία και Εκπαίδευση”*. Σελίδες 215-217 (2015)
- [10] Ι. Ετμεκτσόγλου *Βασική Ορολογία Ακουστικής Οικολογίας για Παιδιά και Ενήλικες: Το Ηχοτόπιο και οι Σημασίες των Ήχων του* Ελληνική Εταιρεία Ακουστικής Οικολογίας Κέρκυρα, 16 (2014)

ΠΡΟΤΑΣΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΙΔΙΩΤΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΗΧΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Dr. I. Ζήσιμος MSc, PhD

Διδάκτωρ κατασκευαστικής Ακουστικής Πανεπιστημίου Cranfield UK

Εργ. Συνεργάτης τμήματος Μηχανολογίας ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ 1993-2015

Σύμβουλος Ακουστικής & Βιομηχανικών Ηχομονώσεων

www.Ηχοπαρέμβαση.gr τηλ: 210-9315435 zissim@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έως σήμερα, ο έλεγχος της ηχορύπανσης είναι αποκλειστική αρμοδιότητα κρατικών φορέων, διάσπαρτων σε διάφορες εποπτεύουσες αρχές, με τα γνωστά προβλήματα όπως η μη άμεση απόκρισή τους, ή διασπορά αρμοδιοτήτων, τα συζητήσιμα αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις, η μη διακρίβωση των ηχομέτρων, ή μη τήρηση διεθνών προτύπων ηχομετρήσεων, οι ασάφειες των εκάστοτε νόμων, η ελλιπέστατη εκπαίδευση των χειριστών-ελεγκτών, ο πιθανός χρηματισμός και πλήθος άλλων παθογενειών του συστήματος.

Ως επαγγελματίας του χώρου της ακουστικής επί σειρά ετών, έχοντας διαπιστώσει ο ίδιος τα προαναφερθέντα προβλήματα, προτείνω την σύσταση Ιδιωτικών Εργαστηρίων Ηχομετρήσεων, διαπιστευμένων από το ΕΣΥΔ που θα μπορούσαν να αναλάβουν την επικουρική βοήθεια των κρατικών φορέων, χωρίς τις προαναφερθείσες παθογένειες, με το σκεπτικό ότι σε άλλους επαγγελματικούς κλάδους ή σύσταση και λειτουργία ιδιωτικών φορέων, έχει μόνο καλά αποτελέσματα, έχει αυξήσει την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών και λόγω ανταγωνισμού έχουν πέσει και οι τιμές.

Proposal to Introduce Private Acoustic Laboratories

ABSTRACT

Up until today, noise pollution control is at exclusive jurisdiction of state bodies, scattered in various supervisory bodies with known problems such as non-immediate response, or dispersion of responsibilities, the debatable results in some cases, non-calibrated sound level meters, or non-compliance to international standards of sound measurements, the ambiguities of the current laws, the lacking of training of personel, the potential bribing and many other system pathogens.

As a professional in the area of acoustics for many years, having delt myself with the above mentioned problems, I propose the Introduction of Private Laboratories of noise measurements, accredited by ESYD that could provide supplementary assistance to state bodies, without the aforementioned pathologies, on the grounds that in other professional branches that operate private Laboratory institutions,

have only good results, have increased the quality of service and due to competition prices have fallen.

Εισαγωγή

Η ταχύτατη εντατικοποίηση της ζωής μας είτε αφορά την εργασία μας είτε αφορά την διασκέδασή μας, έχει δημιουργήσει πιεστικές συνθήκες για το περιβάλλον και εμάς τους ίδιους ακόμη και στην ηχορύπανση.

Τα προβλήματα που έχω διαπιστώσει κατά την υπερ25ετή αποκλειστική ενασχόλησή μου με το αντικείμενο της Ακουστικής, Ηχομονώσεων και Ηχομετρήσεων είναι συνοπτικά τα κάτωθι:

- Οι κρατικές υπηρεσίες ηχομετρήσεων είναι διάσπαρτες σε διάφορους φορείς/υπουργεία
- Οι νόμοι που καλύπτουν τα θέματα της ηχορύπανσης είναι είτε παλαιοί, είτε πολύ συνοπτικοί είτε ασαφείς μέσα στην πολυπλοκότητά τους
- Οι νόμοι που καλύπτουν τα θέματα ελέγχων είναι πεπαλαιωμένοι
- Οι χειριστές των ηχομέτρων είναι δημόσιοι υπάλληλοι συνήθως χωρίς την απαιτούμενη ακουστική εκπαίδευση.
- Έχουν διαπιστωθεί πολλαπλές περιπτώσεις κακής χρήσης των ηχομέτρων.
- Κανένα από τα ηχώμετρα που χρησιμοποιούνται δεν διακρίβωνεται τακτικά από διαπιστευμένο μετρολογικό φορέα
- Τα ωράρια λειτουργίας των κρατικών υπηρεσιών είναι περιορισμένα και συνήθως μόνο σε πρωινές ώρες
- Δεν τηρούνται διαδικασίες ποιότητας εποπτευόμενες από το ΕΣΥΔ

Παράλληλα τα προβλήματα ηχητικής όχλησης στον γενικό πληθυσμό ή στους εργαζομένους είναι συνεχώς αυξανόμενα διότι οι ηχομετρήσεις από τους κρατικούς φορείς, αλλά ακόμη χειρότερα η λήψη μέτρων ηχητικής βελτίωσης αργεί πάρα πολύ, χωρίς συνέπειες για την επιχείρηση που δημιουργεί την ηχορύπανση.

Το αποτέλεσμα είναι να διαγωνίζονται οι έριδες μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και να διακυβεύεται η δημόσια ή η εργασιακή υγεία. Η δυνατότητα προμήθειας απλών οικονομικών αδιακρίβωτων ηχομέτρων ακόμη και από e_shop, από τεχνίτες ή μηχανικούς, καθιστά την αξιοπιστία των ηχομετρήσεων που αυτοί διεξάγουν, εξαιρετικά συζητήσιμη λόγω των πολύ περιορισμένων και μη γραμμικών συμπεριφορών των οργάνων αυτών.

Ταυτόχρονα είναι σαφές ότι η προμήθεια ενός πολύ καλού ηχομέτρου με πιστοποιητικά διακρίβωσης, αν ο χειριστής του δεν είναι γνώστης των ακουστικών δεικτών και που και τότε αυτοί χρησιμοποιούνται, δηλαδή δεν έχει εκπαιδευτεί κατάλληλα, πάλι καθιστά την αξιοπιστία των ηχομετρήσεων συζητήσιμη.

Είναι γνωστό ότι στην Ελλάδα δεν προσφέρονται από τις ανώτατες σχολές πτυχία ακουστικού μηχανικού και σε ελάχιστες απ' αυτές διδάσκονται μαθήματα ακουστικής / ηχομονώσεων/ ηχομετρήσεων. Υπάρχει λοιπόν μια γενική αίσθηση ότι ένα μάθημα με αυτό το ειδικό αντικείμενο είναι «περιττό» «συγκυριακό» «μη εμπορικό» «γενικής παιδείας» κλπ, αλλά από την επαγγελματική μου ενασχόληση έχει αποδειχθεί ότι όλοι οι κλάδοι των μηχανικών πρέπει να έχουν αντίστοιχες γνώσεις τουλάχιστον σε βασικό επίπεδο.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω τίθεται το καίριο ερώτημα «Ποιος είναι σε θέση να κάνει αξιόπιστες ηχομετρήσεις» ώστε να διασφαλίζεται :

- α) το αδιάβλητο της διαδικασίας
- β) η δημόσια υγεία
- γ) η εργασιακή υγεία
- δ) η προστασία του περιβάλλοντος

Η πρόταση που θέτω προς συζήτηση / αξιολόγηση είναι να λυθούν όλα τα ανωτέρω προβλήματα που έχει σήμερα ο δημόσιος αλλά και ο ιδιωτικός τομέας με την ίδρυση Ιδιωτικών εργαστηρίων ηχομετρήσεων που θα είναι στελεχωμένα με ειδικευμένους μηχανικούς, θα τηρούν διαδικασίες ποιότητας ISO 9001 & ISO 17025 θα είναι διαπιστευμένα από το ΕΣΥΔ (Εθνικό Σύστημα Διαπίστευσης) στα πρότυπα των ιδιωτικών ΚΤΕΟ ή των ιδιωτικών κλινικών/εργαστηρίων και θα τηρούν τις διαδικασίες διεθνών προτύπων ηχομετρήσεων π.χ τα αντίστοιχα ανά περίπτωση ISO

Οι μηχανικοί που θα εμπλακούν είναι δυνατόν να είναι τουλάχιστον δύο κατηγοριών.

Α κατηγορία = Πτυχιούχοι Ακουστικοί μηχανικοί (συνήθως από πανεπιστήμια εξωτερικού) ικανοί να διεξάγουν όλων των τύπων ηχομετρήσεις/ελέγχους.

Β κατηγορία = Πιστοποιημένοι μηχανικοί άλλων τεχνικών ειδικοτήτων που έχουν είτε εκπαιδευτεί (με κατ ελάχιστον 6μηνα προγράμματα) είτε έχουν παρακολουθήσει ταχύρυθμα προγράμματα επιμόρφωσης και έχουν τουλάχιστον 5ετή αντίστοιχη επαγγελματική εμπειρία, ικανοί να διεξάγουν ηχομετρήσεις σε τομέα που έχουν εξειδικευτεί. (π.χ θόρυβος Καταστημάτων Υγειονομικού ενδιαφέροντος ή θόρυβος εργασιακός, συγκοινωνιακός, περιβαλλοντικός κλπ).

Η λειτουργία των προτεινόμενων ιδιωτικών εργαστηρίων θα μπορεί να γίνεται παράλληλα με τις δημόσιες υπηρεσίες χωρίς όμως να περιορίζεται από ωράριο λειτουργίας ή από χιλιομετρικές αποστάσεις και είναι δυνατόν να έχει άμεση απόκριση σε κάθε ζήτηση.

Παράλληλα θα μπορεί να καλείται από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη δηλαδή και από τον ενοχλούμενο αλλά και από κάποιον που επιθυμεί να ηχομετρηθεί αυτοβούλως (κάτι που δεν κάνουν οι δημόσιες υπηρεσίες)

Θεωρώ ότι η ίδρυση τέτοιων πιστοποιημένων εργαστηρίων θα:

- Αναβαθμίσει την Ακουστική επιστήμη στην Ελλάδα
- Θα δημιουργήσει τμήματα ανάπτυξης έρευνας στο ΕΛΙΝΑ
- Θα διασφαλίσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων
- Θα αποδεσμεύσει τις κρατικές υπηρεσίες από φόρτο εργασίας
- Θα αποτελέσει ισχυρό αποδεικτικό μέσο σε δικαστικές διενέξεις
- Θα προστατέψει την δημόσια & εργασιακή υγεία
- Θα δημιουργήσει νέες θέσεις εξειδικευμένης εργασίας
- Θα αναπτύξει εκπαιδευτικά προγράμματα
- Θα αναπτύξει τον ανταγωνισμό & θα τυποποιηθούν οι τιμές
- Θα αναπτύξει διαδικασίες ποιότητας & πιστοποίησης των φορέων
- Θα επιτρέψει δημιουργία βάσης δεδομένων ανά πρόβλημα
- Θα αποτελέσει μέσον ελέγχου ποιότητας των κατασκευών τρίτων

Εφ' όσον δημιουργηθεί και θεσμός «πειθαρχικού» & «διαφάνειας» θεωρώ ότι όλοι οι αδαείς που παρεισέφησαν, σταδιακά θα αποπεμφθούν ώστε ο θεσμός των

ιδιωτικών εργαστηρίων να γίνει πρότυπο αναφοράς και εξυπηρέτησης του πολίτη. (π.χ όλοι θυμούνται το τι φακελάκι δίδονταν στα δημόσια ΚΤΕΟ καθώς και την χειρίστη ποιότητα εξυπηρέτησης σε σύγκριση με τα Ιδιωτικά που είναι στελεχωμένα με πλείστους αποφοίτους μηχανολόγους της σχολής που μας φιλοξενεί)

1. Προτεινόμενο Μητρώο Εργαστηρίων Ηχομετρήσεων.

Θεωρώ ότι η κάθε καταγγελία ηχορύπανσης θα πρέπει να εξακολουθήσει να γίνεται σε δημόσιο φορέα ώστε να υπάρχει ο αντίστοιχος έλεγχος καθώς και η θεσμική κατοχύρωση του ενοχλούμενου αλλά και του ενοχλόντα.

Φυσικά θα ήταν σκόπιμο να συσταθεί ενιαίος φορέας καταγγελιών που να περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις ηχητικών προβλημάτων και όχι όπως σήμερα όπου άλλος φορέας ασχολείται με θόρυβο μουσικής άλλος με θόρυβο μηχανημάτων, άλλος με περιβαλλοντικά, άλλος με την κοινή ησυχία οπότε θα μπορούσε να παρασχεθούν στον πολίτη καλύτερες, γρηγορότερες και ποιοτικότερες υπηρεσίες από ένα μόνο συνεργείο ηχομετρήσεων (κρατικό ή ιδιωτικό).

Θεωρώ ότι η ύπαρξη κεντρικού ενιαίου φορέα και όχι διάσπαρτων κατά τόπους εποπτικών υπηρεσιών θα εξυπηρετήσει και τον πολίτη αλλά θα μπορούσε να δρά ως αδειοδοτών φορέας των εργαστηρίων ηχομετρήσεων αλλά και ως ελεγκτικός φορέας των παρεχόμενων υπηρεσιών τους, να διαθέτει πειθαρχικό τμήμα, δηλαδή να αδειοδοτεί τα Εργαστήρια ηχομετρήσεων αλλά και να είναι σε θέση να ανακαλεί τις άδειες των, (πχ για έως 2ετία) εάν συντρέχουν λόγοι π.χ χρηματισμού, πλημμελών ή χαριστικών ελέγχων, αδιακρίβωτων οργάνων, μη τήρηση των προτύπων κλπ.

Αν λοιπόν δημιουργηθεί ο ανωτέρω κεντρικός εποπτικός κρατικός φορέας θα ενταχθούν σ' αυτόν όλα τα Εργαστήρια ηχομετρήσεων τα τεύχη των οποίων θα είναι ικανά να σταθούν σε μία δικαστική διένεξη ή επίσημη πραγματογνωμοσύνη και ο πολίτης αλλά και το κράτος θα είναι πιο σίγουροι για την ποιότητα και την πιστότητα των μετρήσεων.

Δεν προτείνω την απαγόρευση λειτουργίας των ανεξάρτητων ακουστικών μηχανικών, ή την υποχρεωτική ένταξη των ακουστικών εργαστηρίων στον προαναφερθέντα φορέα αλλά θεωρώ ότι εκεί θα οδηγηθεί η αγορά εκ των πραγμάτων, στην πιστοποιημένη ποιότητα.

2. Προτεινόμενες Ελάχιστες Απαιτήσεις.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις για να είναι ικανό το Εργαστήριο ηχομετρήσεων να αναλάβει αντίστοιχες υπηρεσίες εργοταξιακών ή επιτόπιων μετρήσεων, θα μπορούσαν να είναι:

Να διαθέτει,

Έγγραφο άδεια από την κεντρική κρατική υπηρεσία (εάν αυτή συσταθεί, ειδάλλως από το αντίστοιχο υπουργείο στο οποίο κατατάσσεται το εκάστοτε ηχητικό πρόβλημα)

Αποδεδειγμένη εμπειρία σε θέματα ηχοβολισμών & ηχομετρήσεων τουλάχιστον 5 ετών αποδεικνυόμενη από επίσημα έγγραφα, βεβαιώσεις προϋπηρεσίας, εκδοθέντα τιμολόγια κλπ.

Τουλάχιστον ένα ιδιόκτητο ολοκληρωτικό ψηφιακό ηχόμετρο type I με

φασματική ανάλυση 1/3 οκτάβας, με ικανότητα καταγραφής χρόνου αντίληψης Rt, με πιστοποιητικά διακρίβωσης αναγνωρισμένου μετρολογικού φορέα εν ισχύ.

Τουλάχιστον έναν δοσομετρητή με αντίστοιχα πιστοποιητικά διακρίβωσης εν ισχύ.

Τουλάχιστον έναν ιδιόκτητο ψηφιακό βαθμονομητή type I με αντίστοιχα πιστοποιητικά διακρίβωσης εν ισχύ.

Τουλάχιστον ένα ανεμόμετρο και υγρασιόμετρο

Τουλάχιστον μία γεννήτρια συχνοτήτων ροζ θορύβου ποιοτικού οίκου.

Τουλάχιστον ένα ιδιόκτητο συγκρότημα ηχητικής πηγής (πηγών) ισχύος άνω των 2.000W RMS (συνεχής ισχύς κατά DIN) με τουλάχιστον 3τεμ ηχείων ευαισθησίας άνω των 100dB/W/m με μεγάφωνα 15” και κόρνα 1” και με τουλάχιστον ένα υπογούφερ 20” αντίστοιχης ευαισθησίας, ώστε γενικά να καλύπτεται το φάσμα από 31,5-10.000Hz με κατά το δυνατόν παντοκατευθυντική διασπορά. Σε περίπτωση που απαιτηθεί πρόσθετη ισχύ θα έχει την δυνατότητα να ενοικιάζει από τρίτους αντίστοιχο εξοπλισμό.

Τουλάχιστον μια πρότυπη κτυπογεννήτρια

Κατάλληλα προγράμματα Η/Υ υπολογισμού ηχητικών παραμέτρων και ακουστικών δεικτών.

Ο ίδιος ή μόνιμος υπάλληλός του θα πρέπει να είναι διπλωματούχος ή πτυχιούχος Ακουστικός μηχανικός (ή με Μεταπτυχιακό ή με Διδακτορικό Ακουστικής κατεύθυνσης) ή να είναι τουλάχιστον μηχανικός ΑΕΙ-ΑΤΕΙ τεχνικής κατεύθυνσης (π.χ. μηχανολόγος, ηλεκτρολόγος, δομικός, αρχιτέκτων κλπ) ή απόφοιτος ΙΕΚ κατεύθυνσης ηχοληπτών ή ηλεκτρακουστικής ή γενικά αντίστοιχης κατεύθυνσης.

Οι ανωτέρω μηχανικοί και τεχνικοί (εκτός των Ακουστικών μηχανικών) θα έχουν παρακολουθήσει σεμινάριο θεωρητικής επιμόρφωσης και πρακτικής εκπαίδευσης επί των διαδικασιών ηχομετρήσεων, χειρισμού ηχομέτρων, βαθμονομήσεων, ηχοβολισμών ηχομονωτικής συμπεριφοράς υλικών και κατασκευών, νομοθετημάτων επι του αντικείμενου κλπ διάρκειας τουλάχιστον 200 Ωρών, ώστε να είναι ικανοί να διεκπεραιώσουν χωρίς προβλήματα τις απαιτήσεις των έργων.

Η κατάρτισή και πρακτική εκπαίδευση των χειριστών των οργάνων, θα πρέπει να γίνεται από πιστοποιημένους εκπαιδευτές ενηλίκων που να είναι εξειδικευμένοι μηχανικοί στο αντικείμενο της ακουστικής, με υπερ_10ετή αποδεδειγμένη εμπειρία, και να διεξάγεται σε επίσημα κέντρα εκπαίδευσης όπως : Κέντρα Δια βίου μάθησης, Κέντρα Συνεχιζόμενης Εκπαίδευσης, Κέντρα Επαγγελματικής Κατάρτισης, (πιστοποιημένων από τον ΕΟΠΠΕΠ ή άλλον αντίστοιχο φορέα) Κέντρα Τεχνολογικής Έρευνας (διασυνδεδεμένων με ΑΕΙ, ΑΤΕΙ) και από ειδικά προγράμματα επιμόρφωσης τμημάτων των ΑΕΙ, ΑΤΕΙ.

Το Εργαστήριο ηχομετρήσεων θα πρέπει να τηρεί διαδικασίες ποιότητας ISO9001/2008 με σαφώς αναγραφόμενο αντικείμενο επ’ αυτού «ηχομετρήσεις» εκτός των άλλων αναγραφόμενων εάν υπάρχουν. Το πιστοποιητικό θα πρέπει είναι εν ισχύ κατά την διάρκεια του χρόνου ηχομετρήσεων.

Επίσης θα πρέπει να τηρεί τις διαδικασίες πιστοποίησης εργαστηρίων ηχομετρήσεων του ISO 17025 με πιστοποιητικό εν ισχύ και θα υπόκειται σε περιοδικό έλεγχο ποιότητας από το ΕΣΥΔ (Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης) ή άλλον αντίστοιχο επίσημο φορέα διαπίστευσης

Για να είναι αποδεκτό το τεύχος ηχομετρήσεων π.χ από Δημοτική αρχή για την αδειοδότηση λειτουργίας καταστήματος υγειονομικού ενδιαφέροντος προτείνω για το όποιο κόστος παροχής υπηρεσιών (με ελεύθερη συμφωνία με τον πελάτη) να συνυποβάλλεται το τιμολόγιο αλλά και αποδεικτικό τραπεζικής εξόφλησης, τα οποία θα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του τεύχους που θα κατατεθεί στην υπηρεσία.

Για λόγους αξιοπιστίας, προτείνω επί ποινή απόρριψης του τεύχους των ηχομετρήσεων, το εργαστήριο ηχομετρήσεων που ανέλαβε την εκτέλεση των ηχομετρήσεων να μην έχει καμία πρότερη άμεση ή έμμεση κατασκευαστική εμπλοκή ούτε πώληση υλικών ή σύνταξη τεχνικών μελετών με το υπό έλεγχο κατάστημα/χώρο.

3. Τυπικές Απαιτήσεις του προτύπου ISO17025/2005

Το διεθνές πρότυπο EN ISO IEC 17025/2005 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” αποτελείται από 35 σελίδες, στις οποίες αναγράφονται (και πρέπει να τηρούνται) οι τυπικές απαιτήσεις από το εργαστήριο που θα διαπιστευτεί στην διεξαγωγή μετρήσεων. Κάτωθι αναγράφεται μόνον μέρος του πεδίου εφαρμογής και της οργανωτικής δομής του προτύπου.

3.1. Πεδίο εφαρμογής (του προτύπου)

3.1.1 Αυτό το Διεθνές Πρότυπο προδιαγράφει τις γενικές απαιτήσεις για την ικανότητα διεξαγωγής δοκιμών ή / και διακριβώσεων, συμπεριλαμβανομένης της δειγματοληψίας. Καλύπτει δοκιμές και βαθμονομήσεις πραγματοποιούμενες με χρήση τυποποιημένων μεθόδων, μη πρότυπων μεθόδων, και μεθόδων ανεπτυγμένες εργαστηριακάς.

3.1.2 Αυτό το Διεθνές Πρότυπο εφαρμόζεται σε όλους τους οργανισμούς που εκτελούν δοκιμές ή / και διακριβώσεις. Αυτά περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, εργαστήρια τρίτων καθώς και εργαστήρια δοκιμών των οποίων η λειτουργία περιλαμβάνει επιθεωρήσεις και πιστοποιήσεις προϊόντων. Αυτό το Διεθνές Πρότυπο εφαρμόζεται σε όλα τα εργαστήρια ανεξάρτητα από τον αριθμό του προσωπικού ή την έκταση του πεδίου εφαρμογής των δοκιμών ή / και δραστηριοτήτων βαθμονόμησης.

3.1.3 Αυτό το Διεθνές Πρότυπο χρησιμοποιείται σε εργαστήρια για την ανάπτυξη του συστήματος διαχείρισης των για την ποιότητα διοικητικών και τεχνικών εργασιών. Εργαστηριακοί πελάτες, ρυθμιστικές αρχές και φορείς διαπίστευσης μπορούν επίσης να το χρησιμοποιούν για την επιβεβαίωση ή αναγνώριση της αρμοδιότητας και ικανότητας των εργαστηρίων. Αυτό το Διεθνές Πρότυπο δεν προορίζεται για να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την πιστοποίηση των εργαστηρίων.

3.1.4 Συμμόρφωση με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις και απαιτήσεις ασφαλείας για τη λειτουργία των εργαστηρίων δεν καλύπτονται από το παρόν διεθνές πρότυπο.

3.1.5 Αν εργαστήρια δοκιμών και διακριβώσεων συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις αυτού του Διεθνούς Προτύπου, θα εφαρμόσουν σύστημα διαχείρισης της ποιότητας για τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση των δραστηριοτήτων τους που καλύπτεται από τις απαιτήσεις του ISO 9001.

4 Απαιτήσεις Διαχείρισης (του προτύπου)

4.1 Οργάνωση

4.1.1 Το εργαστήριο ή ο οργανισμός του οποίου το εργαστήριο αποτελεί τμήμα, πρέπει να είναι μια οντότητα που να μπορεί να θεωρηθεί νομικά υπεύθυνη.

4.1.2 Είναι ευθύνη του εργαστηρίου για τη διεξαγωγή των δοκιμών και διακριβώσεις κατά τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις αυτού του Διεθνούς Προτύπου και να ικανοποιεί τις ανάγκες του πελάτη, των ρυθμιστικών αρχών ή οργανισμών που παρέχουν αναγνώριση.

4.1.3 Το σύστημα διαχείρισης καλύπτει εργασίες που διεξάγονται στις μόνιμες εγκαταστάσεις του εργαστηρίου, σε χώρους μακριά από τις μόνιμες εγκαταστάσεις του, ή σε συναφείς προσωρινές ή κινητές εγκαταστάσεις.

4.1.4 Εάν το εργαστήριο είναι μέρος ενός οργανισμού που εκτελεί άλλες δραστηριότητες εκτός από δοκιμές ή / και βαθμονομήσεις, οι ευθύνες των βασικών στελεχών του οργανισμού που έχουν εμπλοκή ή επιρροή στις δραστηριότητες δοκιμών ή / και διακριβώσεων του εργαστηρίου αυτού, καθορίζονται σαφώς, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές συγκρούσεις συμφερόντων.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1 Όταν ένα εργαστήριο αποτελεί μέρος ενός μεγαλύτερου οργανισμού, το οργανόγραμμα πρέπει να είναι έτσι διαμορφωμένο ώστε τα τμήματα που έχουν αντικρουόμενα συμφέροντα, όπως παραγωγής, πωλήσεων ή χρηματοδότησης, δεν επηρεάζουν αρνητικά τη συμμόρφωση του εργαστηρίου με τις απαιτήσεις αυτού του Διεθνούς Προτύπου.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2 Εάν το εργαστήριο επιθυμεί να αναγνωρίζεται ως εργαστήριο τρίτων (εξωτερικό εργαστήριο), θα πρέπει να είναι σε θέση να αποδείξει ότι είναι αμερόληπτο και ότι και το προσωπικό του είναι απαλλαγμένο από κάθε αδικαιολόγητες εμπορικές, οικονομικές και άλλες πιέσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τεχνική τους κρίση. Τα εξωτερικά εργαστήρια (τρίτων) ή βαθμονόμησης δεν θα πρέπει να συμμετέχουν σε δραστηριότητες που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την εμπιστοσύνη στην ανεξαρτησία της κρίσης και της ακεραιότητάς των που είναι σχετικές με τις δραστηριότητές των.

4.1.5 Το εργαστήριο πρέπει :

α) να διαθέτει διοικητικό και τεχνικό προσωπικό που ανεξάρτητα από άλλες ευθύνες των, να έχουν την εξουσία και τους πόρους που απαιτούνται για την εκτέλεση των καθηκόντων τους, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής, της συντήρησης και βελτίωσης του συστήματος διαχείρισης, και να προσδιορίζουν την εμφάνιση τυχόν ανακολουθιών του συστήματος διαχείρισης ή των διαδικασιών εκτέλεσης δοκιμών ή / και διακριβώσεων, καθώς και να προωθούν δράσεις για την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση αυτών των ανακολουθιών

β) να έχει έχουν μεθόδους που να εξασφαλίζουν ότι η διεύθυνση και το προσωπικό του εργαστηρίου είναι απαλλαγμένοι από οποιαδήποτε αδικαιολόγητες εσωτερικές και εξωτερικές εμπορικές, οικονομικές και άλλες πιέσεις και επιρροές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα της εργασίας τους

γ) να έχει πολιτικές και διαδικασίες για τη διασφάλιση της προστασίας των εμπιστευτικών πληροφοριών των πελατών του και των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας,

συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών για την προστασία της ηλεκτρονικής αποθήκευσης και διαβίβασης των αποτελεσμάτων

δ) να έχει πολιτικές και διαδικασίες για να αποφευχθεί η συμμετοχή σε δραστηριότητες που θα κλονίσουν την εμπιστοσύνη στην αρμοδιότητα, την αμεροληψία, την κρίση ή την λειτουργική ακεραιότητά του.

ε) να καθορίζει την οργάνωση και τη διοικητική δομή του, τη θέση του σε οποιαδήποτε μητρικό φορέα/οργάνωση, καθώς και τις σχέσεις μεταξύ των τμημάτων ποιότητας, των τεχνικών εργασιών και των υπηρεσιών υποστήριξης

στ) να προσδιορίζει την ευθύνη, την εξουσία και τις αλληλεξαρτήσεις όλου του προσωπικού που διαχειρίζεται, εκτελεί ή ελέγχει εργασίες που επηρεάζουν την ποιότητα των δοκιμών ή / και διακριβώσεων

ζ) να διαθέτει επαρκή επίβλεψη των δοκιμών και διακριβώσεων που διεξάγονται από το προσωπικό, συμπεριλαμβανομένων των ασκουμένων, από άτομα που είναι εξοικειωμένα με τις μεθόδους και τις διαδικασίες δοκιμών και διακριβώσεων, με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

η) να έχει τεχνική διεύθυνση, η οποία να έχει τη συνολική ευθύνη για τις τεχνικές δραστηριότητες και την παροχή των πόρων που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποιότητα των εργαστηριακών εργασιών

θ) να διορίζει ένα μέλος του προσωπικού ως διευθυντή ποιότητας (ανεξαρτήτως ονομασίας), ο οποίος, ανεξάρτητα από άλλα καθήκοντα και ευθύνες, πρέπει να έχει καθορισμένη αρμοδιότητα και ευθύνη για τη διασφάλιση ότι το σύστημα διαχείρισης που σχετίζεται με την ποιότητα, υλοποιείται και ακολουθείται σε κάθε περίπτωση. Ο διευθυντής ποιοτικού ελέγχου πρέπει να έχει άμεση πρόσβαση στο υψηλότερο επίπεδο της διοίκησης στο οποίο λαμβάνονται οι αποφάσεις της πολιτικής του εργαστηρίου ή των πόρων του

ι) Να διορίζει βοηθούς για τις βασικές εργασίες διοικητικού προσωπικού ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Τα άτομα μπορεί να έχουν περισσότερες από μία αρμοδιότητες και μπορεί να είναι πρακτικό να διορισθούν αναπληρωτές για κάθε λειτουργία.

κ) να εξασφαλίζει ότι το προσωπικό του έχει επίγνωση της σημασίας και της σπουδαιότητας των δραστηριοτήτων τους και πώς αυτοί μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη των στόχων του συστήματος διαχείρισης.

Συμπέρασμα

Θεωρώ ότι η σύσταση Ιδιωτικών εργαστηρίων ηχομετρήσεων τα οποία σε συνεργασία με τους εποπτεύοντες κρατικούς φορείς, θα εξυψώσουν το κύρος αλλά και την πρακτική αποτελεσματικότητα της ακουστικής επιστήμης, προς όφελος των πολιτών, του κράτους, του περιβάλλοντος αλλά και της ποιότητας και πληρότητας των παραδιδόμενων τευχών.

Ο στόχος δεν είναι να καταργηθούν οι σήμερα λειτουργούντες θεσμοί (κρατικοί έλεγχοι, Πανεπιστημιακά εργαστήρια ηχομετρήσεων, εταιρείες ακουστικών μελετών κλπ) αλλά να προκύψει συνεργασία και ανταλλαγή τεχνογνωσίας.

Καλώ τους συναδέλφους να εκφέρουν την εμπειριστατωμένη άποψή των (γραπτώς) ώστε σε συνεδρίαση που προτείνω να οργανώσει το ΕΛΙΝΑ, να μπορέσουν να συζητηθούν όλες οι απόψεις και να προκύψει μια οριστική πρόταση προς την πολιτεία για την ίδρυση Διαπιστευμένων Ιδιωτικών Εργαστηρίων Ηχομετρήσεων.

Μετρήσεις ηχοστάθμης και ηχοστάθμη κατάταξης

Κωνσταντίνος Δουλιγέρης
Dipl.Ing.TU Berlin
Ελ. Βενιζέλου 13, 18547 Πειραιάς
amdsgr@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι απλές μετρήσεις Α-σταθμισμένης ηχοστάθμης και η σύγκριση με τα ισχύοντα όρια θορύβου, όπως αυτά εκφράζονται στο ΠΔ 1180/81 δεν μπορούν να περιγράψουν πλήρως την ενόχληση που δημιουργείται από Η/Μ κ.α. πηγές, γιατί δεν λαμβάνουν υπόψη ιδιαίτερα ηχητικά χαρακτηριστικά, όπως τονικό και κρουστικό περιεχόμενο. Η καθιέρωση μέτρησης της ηχοστάθμης κατάταξης (Rating Level, ISO 1996), λαμβάνοντας υπόψη και τον έλεγχο ως προς τις χαμηλές συχνότητες κατά DIN 45680 θα μπορούσε να αποτελέσει ένα βήμα προς την σωστή κατεύθυνση.

Sound Level Measurements and the Rating Level

ABSTRACT

Simple a-weighted sound level measurements and comparison with existing noise limits, such as those expressed at PD 1180/81 cannot describe fully the nuisance created by electro-mechanical a.o. sources, because they don't take into account particular sound characteristics, such as tonal and impulsive content. The establishment of measurement of the Rating Level L_r (ISO 1996), taking into account the low frequencies measurement method in DIN 45680 could represent a step in the right direction.

1. Εισαγωγή

Σκοπός αυτής της παρουσίασης είναι η παρότρυνση να τεθούν τα θέματα του εκσυγχρονισμού των Ελληνικών διατάξεων περί μετρήσεων και αξιολόγησης θορύβου, όπως επίσης και ηχομόνωσης ξανά προς συζήτηση, με βάση την τώρα υπάρχουσα κατάσταση.

Οι μετρήσεις επιτρεπτής ηχοστάθμης από Η/Μ πηγές θορύβου γίνονται στην Ελλάδα από το 1981 σύμφωνα με το Π.Δ. 1180, όπου ορίστηκαν τα όρια ηχοστάθμης, ανάλογα με την χρήση κάθε περιοχής. Ήταν ένα σημαντικό βήμα για την εποχή του και η αποδοχή του μέχρι και σήμερα ήταν απόδειξη της ορθότητας του.

Ο τρόπος, που συντάχθηκε ήταν ανάλογος της κατάστασης, που επικρατούσε τότε, όσον αφορά την γενικότερη εμπειρία με ακουστικές μετρήσεις και τα τεχνικά μέσα, που ήταν διαθέσιμα. Έγινε η παραδοχή, πως έπρεπε να είναι όσο πιο απλό γίνεται, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από άτομα με ελάχιστη εμπειρία και επίσης να είναι συμβατό με την τεχνολογική εξέλιξη της εποχής του. Τα ηχόμετρα τότε δεν είχαν τις αυξημένες δυνατότητες, που διαθέτουν τα σημερινά όργανα μέτρησης. Μπορούσαν να μετρήσουν την στιγμιαία ηχοστάθμη, αλλά δεν είχαν άλλες δυνατότητες, όπως φασματική ανάλυση, μέτρηση του ενεργειακού μέσου όρου, στατιστικά στοιχεία ηχοστάθμης κ.α. Αυτά ήρθαν πολύ αργότερα. Σήμερα όμως όλα τα μηχανήματα μέτρησης ηχοστάθμης, ακόμα και τα πιο φτηνά έχουν πολύ περισσότερες δυνατότητες από ότι τα μηχανήματα του 1981 και το επιχείρημα της μη ύπαρξης καταλλήλων οργάνων μέτρησης δεν ισχύει πλέον.

Πιστεύουμε πως ήρθε η ώρα όπου έπρεπε να υποστηριχθούν και να ενισχυθούν ταυτόχρονα, οι προσπάθειες της Ελληνικής Ακουστικής Εταιρείας για την αναμόρφωση και εκσυγχρονισμό του Αρθρου 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού, όπως εκφράζεται στην εισήγηση της του 2010 και να συνοδεύονται από τον εκσυγχρονισμό του ΠΔ 1180 στην χώρα μας, βάσει προτύπων και τεχνικών οδηγιών, που εφαρμόζονται σε άλλες χώρες και είναι δοκιμασμένες, ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

2. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτυχίας

Η απλή μέτρηση μίας Α-ηχοστάθμης πολλές φορές δεν αποκαλύπτει τίποτα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ακόλουθη μέτρηση.

Περιγραφή: Κάτοικος διαμερίσματος πολυκατοικίας στον 5^ο όροφο διαμαρτύρεται για συνεχή ενόχληση από ανεμιστήρα εξαερισμού καταστήματος, που είναι τοποθετημένος στο ισόγειο σε ακάλυπτο, σε κάθετη απόσταση περίπου 10 μέτρα από την πολυκατοικία. Ο ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος μέσα σε γωνία 2 κτιρίων, δηλαδή αναμένεται και αύξηση ηχοστάθμης λόγω τοποθέτησης.

Οι μετρήσεις της ηχοστάθμης του ανεμιστήρα, που είχε ξύλινο ηχομονωτικό κέλυφος, δεν έδειξαν υπέρβαση του ορίου επιτρεπτής ηχοστάθμης των 50 dB(A) στα όρια της ιδιοκτησίας, σύμφωνα με το ΠΔ 1180/81. Οι μετρήσεις στο μπαλκόνι του διαμερίσματος στον 5^ο όροφο είχαν όμως ενδιαφέρον.

Καταγράφηκε η στιγμιαία Α-ηχοστάθμη ανά 125 ms ενώ ο ανεμιστήρας τέθηκε εντός και εκτός λειτουργίας μερικές φορές. Από τις μετρήσεις φάνηκε ότι:

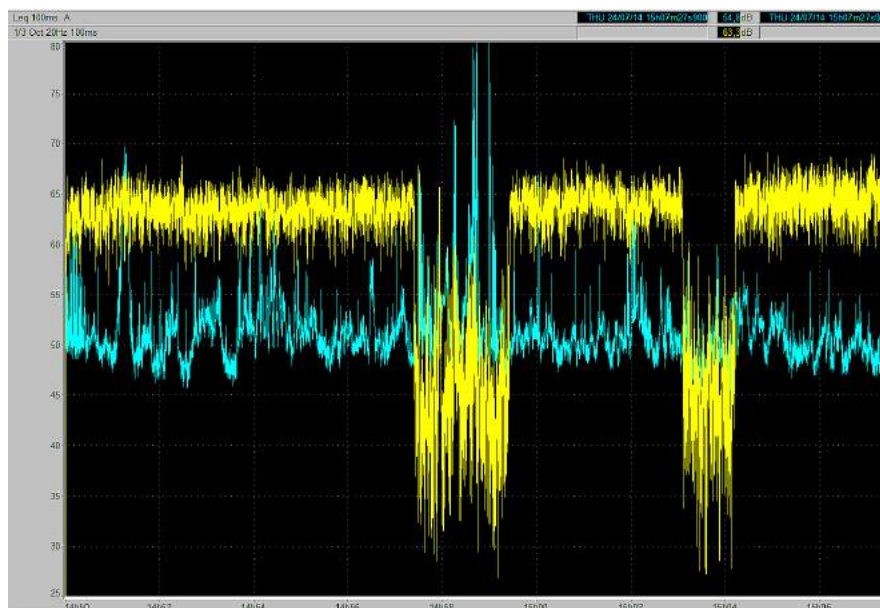
- 1) Ο ακουστικός δείκτης $L_{A,eq}$ (ενεργειακός μέσος όρος ηχοστάθμης για το σύνολο του χρόνου μέτρησης) δεν μεταβάλλεται κατά την εναλλαγή των καταστάσεων ΕΝΤΟΣ/ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, πράγμα που δείχνει ότι η ηχοστάθμη από τον ανεμιστήρα που μετρήθηκε στο μπαλκόνι της κατοικίας είναι τουλάχιστον κατά 10 dB μικρότερη από τον θόρυβο περιβάλλοντος

- 2) Μετρήθηκε ότι ο θόρυβος περιβάλλοντος (κατάσταση ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ) είναι ίσος με $L_{A,eq} = 49,1$ dB(A), οπότε ο θόρυβος από τον ανεμιστήρα είναι ίσος ή μικρότερος από $L_{A,eq} \leq 39,1$ dB(A).

Τα 39 dB(A) δεν είναι ένα σημαντικό μέγεθος για να ανησυχήσει κανείς, εφόσον μετρήθηκε εκτός της κατοικίας, στο μπαλκόνι. Θα μπορούσε να κλείσει κανείς τα παράθυρα και να μειώσει κατά πολύ τον θόρυβο, αν ο θόρυβος είχε ομαλή κατανομή, κυρίως μεσαίες και υψηλές συχνότητες.

Στην προκειμένη περίπτωση όμως δεν συνέβαινε αυτό, ο ανεμιστήρας δημιουργούσε κατά την λειτουργία του μία αύξηση των χαμηλών συχνοτήτων στα 20 Hz, περίπου κατά 15 dB σε σχέση με την ηχοστάθμη περιβάλλοντος όταν δεν λειτουργούσε, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.

Εικόνα 2.1 Καταγραφή στιγμιαίας ηχοστάθμης, παράδειγμα



Η χρονική καταγραφή της 1/3-οκταβικής συχνότητας των 20 Hz παρουσιάζεται με κίτρινο χρώμα, με γαλάζιο παρουσιάζεται η καταγραφή της στιγμιαίας A-ηχοστάθμης. Περίοδος 125 ms. Από την καταγραφή των 20 Hz φαίνεται καθαρά πότε λειτουργούσε ο ανεμιστήρας και πότε όχι.

Συμπέρασμα: Αν και η ηχοστάθμη από τον ανεμιστήρα στο μπαλκόνι ήταν της τάξης των 39 dB(A), η αίσθηση της ενόχλησης για τον κάτοικο του διαμερίσματος ήταν μεγάλη και οφειλόταν στην αύξηση κατά 15 dB της συχνότητας των 20 Hz σε σχέση με την ηχοστάθμη περιβάλλοντος. Ο κάτοικος του διαμερίσματος έχει μεγάλη δυσκολία, γιατί δεν μπορεί να τεκμηριώσει την

ενόχληση που υφίσταται, σύμφωνα με τα όσα ισχύουν μέχρι τώρα στην Ελληνική νομοθεσία, δηλαδή τις διατάξεις του ΠΔ 1180/81.

3. Προεδρικό Διάταγμα 1180/81

Το ΠΔ1180/81 είναι το νομικό κείμενο, που προσδιορίζει τα επιτρεπτά όρια θορύβου από Η/Μ και άλλες εγκαταστάσεις, στην Ελλάδα.

Πίνακας 3.1 ΠΔ 1180/81

α/α	Περιοχή	Ανώτατον όριο θορύβου εις dB(A)
1	Νομοθετημένοι βιομηχανικοί περιοχαί	70
2	Περιοχαί εις ας το επικρατέστερον στοιχείον είναι το βιομηχανικόν	65
3	Περιοχαί εις ας επικρατεί εξ ίσου το βιομηχανικόν και αστικόν στοιχείον	55
4	Περιοχαί εις ας επικρατεί το αστικόν στοιχείον	50

"Δια τας εγκαταστάσεις, τας ευρισκομένας εν επαφή μετά κατοικουμένων κτισμάτων, το ανώτατον επιτρεπόμενον όριον θορύβου καθορίζεται εις 45 dB(A), ανεξαρτήτως της περιοχής εις ην ευρίσκεται η εγκατάσταση, μετρούμενον εντός του κατοικουμένου κτίσματος με ανοικτάς θύρας και παράθυρα."

Πέραν των ορίων, που αναφέρονται και το πως πρέπει να μετρηθούν στα όρια της ιδιοκτησίας δεν υπάρχει άλλη οδηγία ή εξήγηση ως προς τον τρόπο μέτρησης, πράγμα, που έχει οδηγήσει σε παρερμηνείες. Μία επικρατούσα άποψη είναι πως πρέπει να γίνεται μέτρηση της ανώτατης στιγμιαίας Α-ηχοστάθμης (δηλαδή $L_{A,max}$) και κάποια άλλη άποψη είναι πως πρέπει να γίνεται μέτρηση του ενεργειακά ισοδύναμου μέσου όρου της στιγμιαίας ηχοστάθμης (δηλαδή $L_{A,eq}$).

Η μέτρηση μόνο της Α-ηχοστάθμης έχει τα γνωστά προβλήματα: λαμβάνει υπόψη το ηχητικό φάσμα σαν άθροισμα συχνοτήτων και ως εκ τούτου δεν μπορεί να περιγράψει την φασματική κατανομή διαφορετικών ήχων, ούτε να λάβει υπόψη της την ενόχληση που μπορεί να δημιουργήσουν ήχοι, που έχουν δυσμενή φασματική κατανομή.

Όσον αφορά την μέτρηση της ανώτατης στιγμιαίας ηχοστάθμης, αυτή μπορεί να γίνει με σχετική επιτυχία, μόνο σε εσωτερικούς χώρους. Οι μετρήσεις μεγίστης στιγμιαίας ηχοστάθμης σε εξωτερικούς χώρους είναι πολύ δύσκολες, λόγω ύπαρξης σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις και άλλων άσχετων πηγών θορύβου ταυτόχρονα με την μέτρηση. Δεν μπορεί να εγγυηθεί κανείς την επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Η μέτρηση του ενεργειακά ισοδύναμου μέσου όρου της στιγμιαίας ηχοστάθμης είναι πολύ πιο ασφαλής και γι' αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται σχεδόν από όλους, ακόμα και αν η χρήση του ότι δεν αναφέρεται ρητά στο ΠΔ 1180/81. Πράγμα που δημιουργεί το εύλογο ερώτημα: είναι ίδια μεγέθη το $L_{A,max}$ και το $L_{A,eq}$; Είναι επιστημονικά σωστό να αντικαθίσταται στην πράξη το ένα με το άλλο; Φυσικά και όχι. Και ως εκ τούτου δημιουργείται η ανάγκη να αποσαφηνιστούν αυτές οι διατάξεις και να εκσυγχρονιστούν βάσει της διεθνούς εμπειρίας.

Μία πρόταση σε αυτή την κατεύθυνση θα μπορούσε να ήταν ο συνδυασμός των τεχνικών προτύπων ISO 1996, DIN 45680, EN ISO 10052 και EN ISO 16032.

4. Τεχνικό Πρότυπο ISO 1996

Ένα πολύ βασικό διεθνές τεχνικό πρότυπο είναι το ISO 1996 " Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 1: Basic quantities and assessment procedures -- Part 2: Determination of environmental noise levels". Αφορά την μέτρηση περιβαλλοντικού θορύβου σε σχέση με την ενόχληση που δημιουργεί.

Σε αυτό το πρότυπο περιγράφεται ο ακουστικός δείκτης L_r (Rating Level, Ηχοστάθμη Κατάταξης) και η μεθοδολογία προσδιορισμού του. Η μέτρηση ηχοστάθμης γίνεται με βάση το ενεργειακά μέσο όρο ηχοστάθμης, στον οποίο προστίθενται κατάλληλες διορθώσεις εφ' όσον ο μετρούμενος ήχος περιλαμβάνει κρουστικό ή και τονικό περιεχόμενο.

Αναφέρεται και τρόπος μέτρησης και εκτίμησης του ηχητικού περιεχομένου σε χαμηλές συχνότητες 1...20 Hz βάσει του προτύπου ISO 7196 "Acoustics -- Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements".

5. Τεχνικό Πρότυπο DIN 45680

Στο Γερμανικό τεχνικό πρότυπο DIN 45680 " Measurement and assessment of low-frequency noise immissions" περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία μέτρησης και αξιολόγησης της ενόχλησης ήχων ως προς το περιεχόμενο τους στις συχνότητες 8...125 Hz. Βασίζεται στην μέτρηση της A- και C-ηχοστάθμης και στην 1/3-οκταβική ανάλυση του ηχητικού φάσματος.

Οι μετρήσεις αφορούν εσωτερικούς χώρους χρίζοντας προστασίας και λαμβάνουν υπόψη την συνολική ενόχληση από αερόφερτο και στερεόφερτο θόρυβο.

6. Τεχνικά Πρότυπα EN ISO 10052 και EN ISO 16032

Τα τεχνικά πρότυπα EN ISO 10052 " Acoustics -- Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound -- Survey method" και EN ISO 16032 " Acoustics -- Measurement of sound pressure level from service equipment in buildings -- Engineering method" περιγράφουν μεταξύ άλλων και την μεθοδολογία μέτρησης ηχοστάθμης σε κλειστούς χώρους, έτσι ώστε

να ληφθεί υπόψη στο τελικό αποτέλεσμα και το περιεχόμενο σε χαμηλές συχνότητες.

7. Συνδυασμός μιας ενιαίας μεθοδολογίας μέτρησης

Για την πληρέστερη δυνατή καταγραφή των παραμέτρων που έχουν σχέση με την ενόχληση, που μπορούν να δημιουργήσουν κάποιοι ήχοι, ίσως θα έπρεπε να καταγράφονται τα εξής:

- 1) Ταυτόχρονη χρονική καταγραφή της ηχοστάθμης LpA_FAST, LpC_FAST, LpA_IMPULS ανά 125ms
- 2) Από την χρονική καταγραφή της LpA_FAST υπολογίζονται
 - A) τα LpA_MAX και LpA_MIN ανά 125ms
 - B) τα LEQ_A_FAST, LpA_MAX, LpA_MIN, L1, L10, L50, L95 (για το σύνολο του χρόνου της καταγραφής)
- 3) 1/3-οκταβική ανάλυση ανά 125ms της LINEAR ηχοστάθμης από 10-20000 Hz

Τα σημερινά όργανα μέτρησης δεν έχουν πρόβλημα να μετρήσουν και να αναλύσουν σε πραγματικό χρόνο τα ανωτέρω. Αλλά και για οποιαδήποτε συμπληρωματική ανάλυση μπορεί κανείς να αποθηκεύσει το ηχητικό σήμα, όπως αυτό "συλλαμβάνεται" από το ηχόμετρο, ψηφιακά σε κάρτα μνήμης. Η ποιότητα του ψηφιακά αποθηκευμένου σήματος ενός ηχομέτρου δεν έχει καμία διαφορά από το πραγματικό ηχητικό σήμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τεκμηρίωση των μετρήσεων. Αν το ηχητικό σήμα σε μία μέτρηση αποθηκευθεί ψηφιακά πχ. υπό μορφή αρχείου *.wav, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν αποδεικτικό στοιχείο σε περίπτωση κάποιων διαφορών.

8. Επίλογος

Τα ανωτέρω αναφερθέντα αποτελούν μία παραίτηση, ώστε να τεθεί το θέμα της αναμόρφωσης και εκσυγχρονισμού της Ελληνικής νομοθεσίας, που αφορά τα όρια και τον τρόπο μέτρησης θορύβου, ξανά υπό συζήτηση. Από την επαγγελματική μας εμπειρία μπορούμε να διαβεβαιώσουμε πως σε πάρα πολλές περιπτώσεις, δεν μπορεί να τεκμηριωθεί η ενόχληση που υφίστανται διάφοροι άνθρωποι, που έχουν την ατυχία να ζουν κοντά σε κέντρα διασκέδασης, ταβέρνες, συνεργεία και άλλες θορυβώδεις επιχειρήσεις, με τους υφιστάμενους κανονισμούς και διατάξεις.

Θεωρούμε πως θα έπρεπε σύντομα να δρομολογηθεί, μαζί με την αναμόρφωση του Άρθρου 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού, και ο εκσυγχρονισμός και βελτίωση του ΠΔ 1180/81.

Παράλληλη Έκθεση



Επικοινωνία:

Χαρίτου Χριστίνα

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχ. Τ.Ε

Τηλέφωνο: 210 5381514

E-mail: acoustics2016@helina.gr

Link: <http://conferences.helina.gr/2016/gr/>