Πρακτικά του 6ου Εθνικού Συνεδρίου Ακουστικής

ακουστική 2012

8 - 10 Οκτωβρίου, Κέρκυρα
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

διοργάνωση | συνδιοργάνωση | χορηγός | χορηγός επικοινωνίας
great events | KNAUF | avmentor
conferences.ionio.gr/acoustics2012

Πρακτικά του 6ου Εθνικού Συνεδρίου Ακουστικής

Ακουστική 2012

8 - 10 Οκτωβρίου, Κέρκυρα, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Editors:
Ανδρέας Φλώρος, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Ανδρέας Μνιέστρης, Τμ. Μουσικών Σπουδών, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Υπεύθυνος Δημοσιευμάτων και Δημοσιότητας:
Ανδρέας Γιαννακουλόπουλος, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Υποστήριξη και προγραμματισμός LaTeX:
Κωνσταντίνος Δρόσος, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Δημιουργικό - Γραφιστικό:
Νικόλαος Μουστάκας, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Στέφανος Παπαδάς, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας

Δημιουργία λογότυπου:
Νικόλαος Γρηγορίου, Σχεδιαστής Δημιουργικού Υλικού

Μήνυμα του Δ.Σ. του ΕΛΙΝΑ

Το Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής (ΕΛΙΝΑ) που εκπροσωπεί την επιστημονική ακουστική κοινότητα της Ελλάδας, έχει καθιερώσει ανά διετία την διεξαγωγή του Εθνικού Συνεδρίου για την ακουστική σε διαφορετικές πόλεις στην Ελλάδα με την βοήθεια της Πανεπιστημιακής και της Ερευνητικής Κοινότητας της χώρας μας. Ο θεσμός έχει καθιερωθεί στη συνείδηση των συναδέλφων που συνεισφέρουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στην παρουσίαση των ερευνητικών τους επιτευγμάτων. Έτσι οι παρουσιάσεις και κατ΄ επέκταση οι δημοσιεύσεις στα Πρακτικά των Συνεδρίων είναι υψηλού επιπέδου και αποτελούν χρήσιμο ερευνητικό εργαλείο αναφοράς σε όλους όσοι ασχολούνται με την χρήση και την προαγωγή της ακουστικής επιστήμης.

Φέτος το Συνέδριό μας γίνεται στην πόλη της Κέρκυρας υπό την άψογη διοργάνωση του Τμήματος Τεχνών Ήχου και Εικόνας και Μουσικών Σπουδών του Ιονίου Πανεπιστημίου. Οι οργανωτές κατέβαλαν πολύ μεγάλες προσπάθειες για την υλοποίηση ενός έργου που φαινόταν πολύ δύσκολο κάτω από τις δύσκολες οικονομικές συνθήκες της χώρας μας, που όμως είναι απαραίτητο για την συνέχιση των προσπαθειών που καταβάλλει το ΕΛΙΝΑ για την συσπείρωση των συναδέλφων που ασχολούνται με την ακουστική στην Ελλάδα.

Το Δ.Σ. του ΕΛΙΝΑ ευχαριστεί από καρδιάς την Οργανωτική Επιτροπή του Συνεδρίου υπό την καθοδήγηση των συναδέλφων Ανδρέα Φλώρου και Ανδρέα Μνιέστρη για την πραγματοποίηση του Συνεδρίου, τα μέλη της Επιστημονικής Επιτροπής για την κρίση των εργασιών καθώς και όλους τους συνέδρους, η συγκινητική παρουσία των οποίων μας γεμίζει χαρά και αισιοδοξία.

Το Δ.Σ. του ΕΛΙΝΑ

Ένα θερμό καλωσόρισμα από την οργανωτική επιτροπή

Το Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής (ΕΛ.ΙΝ.Α) διοργανώνει ανά διετία, με αφετηρία το 2002, το Πανελλήνιο συνέδριο Ακουστικής, σε συνεργασία με ανώτατα εκπαιδευτικά ιδρύματα της χώρας. Το φετινό - 6ο κατά σειρά -Πανελλήνιο συνέδριο ''ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012'' φιλοξενείται στην Κέρκυρα από το Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας και Μουσικών Σπουδών του Ιονίου Πανεπιστημίου και απευθύνεται σε όλους τους επιστήμονες και επαγγελματίες του χώρου που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα και ασχολούνται με την ακουστική και οι οποίοι επιθυμούν να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα της ερευνητικής τους εργασίας. Παράλληλα, το συνέδριο είναι ανοικτό και σε όσους επιθυμούν απλά να πληροφορηθούν για τις σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα της ακουστικής στην Ελλάδα και όχι μόνο.

Παρά τις συγκυρίες και ιδιαιτερότητες της εποχής που διανύουμε, στο πρόγραμμα της φετινής διοργάνωσης περιλαμβάνεται η παρουσίαση συνολικά 46 εργασιών / εισηγήσεων υψηλού επιπέδου, οι οποίες ανήκουν σε ένα μεγάλο εύρος πεδίων της ακουστικής επιστήμης, καλύπτοντας θεματολογία όπως Αρχιτεκτονική Ακουστική, Ακουστική Αρχαίων Θεάτρων, Περιβαλλοντική Ακουστική, Ηχορύπανση και Μετάδοση Θορύβου, Υποβρύχια - Εφαρμοσμένη Ακουστική, Κτιριακή Ακουστική, Επεξεργασία Ακουστικού Σήματος, Μουσική Ακουστική, Ηλεκτροακουστική, Ακουστική Οικολογία, Βιοακουστική και Ακουστικές Μετρήσεις. Το επιστημονικό σκέλος του προγράμματος συμπληρώνεται από μία κεντρική ομιλία με τίτλο ''Ήχος & Εικόνα, Αρχιτεκτονική & Μουσική'', καθώς και μία ενημερωτική ημερίδα (workshop), κατά την διάρκεια της οποίας θα παρουσιασθεί το νέο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών ''Ακουστικός Σχεδιασμός και Πολυμέσα'' του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου.

Παράλληλα, η οργανωτική επιτροπή έχει καταβάλει κάθε προσπάθεια ώστε να κάνει διαθέσιμο προς όλους τους συνέδρους ένα ευχάριστο κοινωνικό πρόγραμμα, παρέχοντας τη δυνατότητα σε όλους τους συμμετέχοντες να έρθουν σε προσωπική επαφή και να ανταλλάξουν απόψεις και εμπειρίες κατΆ ιδίαν.

Στο σημείο αυτό, η οργανωτική επιτροπή του Συνεδρίου θα ήθελε να ευχαριστήσει όλους τους συγγραφείς που έστειλαν τα αποτελέσματα της δουλειάς τους για κρίση και δημοσίευση στα πρακτικά του Συνεδρίου. Θερμές ευχαριστίες επίσης απευθύνονται προς τα μέλη τόσο της επιστημονικής επιτροπής, οι οποίοι συνέβαλλαν καθοριστικά με τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου τους στην κρίση των εργασιών, όσο και των Προεδρείων των συνεδριών. Τέλος, ευχαριστεί θερμά τα μέλη του Διοικητικού Συμβουλίου του ΕΛ.ΙΝ.Α. για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στην ανάθεση της φετινής διοργάνωσης, καθώς και για την άψογη συνεργασία καθΆ όλη τη διάρκεια της προετοιμασίας των εργασιών του συνεδρίου.

Εκ μέρους της οργανωτικής επιτροπής, θα θέλαμε να σας καλωσορίσουμε στην Κέρκυρα και να σας ευχηθούμε καλή παραμονή στο νησί. Ευελπιστούμε ότι η φετινή διοργάνωση θα ανταποκριθεί πλήρως στις όποιες προσδοκίες σας!

Για την οργανωτική επιτροπή του συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012,
Ανδρέας Φλώρος και Ανδρέας Μνιέστρης
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Επιτροπές Συνεδρίου

Α. Οργανωτική Επιτροπή

- **Ανδρεας Φλωρος**, Πρόεδρος, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Ανδρεας Μνιεστρης**, Αντιπρόεδρος, Τμ. Μουσικών Σπουδών Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Ανδρεας Γιαννακουλοπουλος**, Υπεύθυνος Δημοσιευμάτων και Δημοσιότητας, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Θεοδωρος Λωτης**, Μέλος, Τμ. Μουσικών Σπουδών Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Ιωαννης Ζαννος**, Μέλος, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Ιωαννης Καρυδης**, Μέλος, Τμ. Πληροφορικής Ιονίου Πανεπιστημίου
- **Αναστασιος Βασιλειαδης**, Μέλος, Διπλ. Ηλ/γος Μηχ/κός, Σύμβουλος Ακουστικής (MSc)
- **Κατερινα Τζαλη**, Γραμματεία Συνεδρίου, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
- **Κωνσταντινος Δροσος**, Τεχνική Υποστήριξη, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας Ιονίου Πανεπιστημίου

Β. Επιστημονική Επιτροπή

- **Χρηστος Αντωνοπουλος**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Γεωργιος Καλλιρης**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Δημητριος Κεραμιδας**, ERT3
- **Σπυριδων Κουζουπης**, Τ.Ε.Ι. Κρήτης
- **Ιωαννης Μουρτζοπουλος**, Πανεπιστήμιο Πατρών
- **Γεωργιος Μπαμνιος**, Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης
- **Νικολαος Μπαρκας**, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
- **Γεωργιος Παπαδελης**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Γεωργιος Παπανικολαου**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Στυλιανος Ποτηρακης**, Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- **Γεωργιος Πουλακος**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- **Δημητριος Σκαρλατος**, Πανεπιστήμιο Πατρών
- **Εμμανουηλ Σκαρσουλης**, Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας
- **Χαραλαμπος Σπυριδης**, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- **Αλεξανδρα Σωτηροπουλου**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- **Μιχαηλ Ταρουδακης**, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- **Νικολαος Τατλας**, Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- **Εμμανουηλ Τζεκακης**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Αθανασιος Τροχιδης**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- **Νικολαος Τσινικας**, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Προηγούμενα Συνέδρια

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2010 - 5ο Εθνικό Συνέδριο
4 - 6 Οκτωβρίου, Αθήνα
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008 - 4ο Εθνικό Συνέδριο
29 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, Ξάνθη
Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2006 - 3ο Εθνικό Συνέδριο
18 - 19 Σεπτεμβρίου, Ηράκλειο, Κρήτη
Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2004 - 2ο Εθνικό Συνέδριο
27 - 28 Σεπτεμβρίου, Θεσσαλονίκη
Σχολή Καλών Τεχνών Α.Π.Θ.

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2002 - 1ο Εθνικό Συνέδριο
30 Σεπτεμβρίου - 1 Οκτωβρίου, Πάτρα
Πανεπιστημίο Πατρών

Πίνακας Περιεχομένων

Ακουστικός σχεδιασμός αιθουσών rock μουσικής - επισκόπηση εξελίξεων. Α. Γ. Σωτηροπούλου, Γ. Πουλάκος, Ι. Καραγιάννης, Α. Σαββοπούλου 1

Ακουστική μελέτη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων του δημοτικού σχολείου Γωνιάς Ρεθύμνου. Μ. Ε. Τερζάκης, Σ. Μπρέζας, Ε. Μπακαρέζος, Ν. Παπαδογιάννης 8

Συνδυαστική διερεύνηση παραμέτρων αξιολόγησης οπτικών και ακουστικών ανέσεων σε σχολικά κτίρια της Ξάνθης: Φυσικός φωτισμός - Σκιασμός, Ηχοπροστασία - Αντήχηση. Ελ. Αθανασιάδου, Μ. Μπούση, Ξ. Πάστερνακ, Ν. Μπάρκας 14

Ακουστική μελέτη σχολικών αιθουσών μέσης εκπαίδευσης. Κ. Μπακογιάννης 22

Η σημασία της τεχνικής σκηνής στην ακουστική των χώρων συνάθροισης κοινού. Θ. Αθανάσιος, Γ. Χατζηγεωργίου 29

Σύγχρονες μέθοδοι ακουστικής μελέτης των αρχαίων ελληνικών και ρωμαϊκών θεάτρων. Κ. Αγγελάκης, Ν. Μπάρκας 37

Μία προσέγγιση στην ακουστική εξέλιξη των αρχαίων ελληνικλών και ρωμαϊκών ωδείων 2. Γ. Καραδέδος, Β. Ζαφρανάς, Π. Καραμπατζάκης 43

Η ακουστική των αρχαίων θεάτρων - ανασκόπηση επιστημονικών εξελίξεων. Α. Γ. Σωτηροπούλου, Γ. Καμπουράκης, Α. Μ. Καφάση 59

Ακουστικές και περιβαλλοντικές μετρήσεις στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου. Μ. Κουντουράς, Σ. Ψαράς 68

Κέντρα διασκέδασης σε Βόλο και Ιωάννινα: θόρυβοι λειτουργίας και προβλήματα ηχοπροστασίας των εγγύς κατοικιών. Γ. Κωστής, Λ. Παϊδάς, Ν. Μπάρκας 80

CNOSSOS-EU: The European program on Common NOise ASSessment MethOdS for strategic noise mapping in EU as specified in the Directive 2002/49/EC. S. Kephalopoulos, K. Vogiatzis 89

Αξιολόγηση προγράμματος παρακολούθησης του περιβαλλοντικού Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου από την λειτουργία της Αττικής Οδού (2008-2011). Κ. Βογιατζής 97

Ηχομόνωση εναλλάκτη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με νέα σύνθετα ηχομονωτικά και ταυτόχρονα ηχοαπορροφητικά υλικά. Η. Κωστάζος 105

Σχεδιασμός θαλάσσιου ακουστικού παρατηρητηρίου. Μ. Ταρουδάκης 112

Τρισδιάστατη απεικόνιση ολικού πεδίου νανο-ακουστικών κυμάτων σε μεταλλικές και διηλεκτρικές επιφάνειες με τη χρήση παλμικών πηγών laser. Ι. Ορφανός, Β. Δημητρίου Ε. Κασελούρης, Σ. Μπρέζας, Ε. Μπακαρέζος, Μ. Ταταράκης, Ν. Βάινος, Ν. Α. Παπαδογιάννης 120

Μελέτη του συχνοτικού εύρους απορρόφησης σε συστοιχία συντονιστών. Σ. Πολυχρονόπουλος, Δ. Σκαρλάτος, Ι. Μουρτζόπουλος 128

Identification of similarities between the turkish Makam scales and the cypriot folk music. A. Neocleous, M. Panteli, N. Petkov, C. N. Schizas 134

Μελέτη και υλοποίηση του κριτηρίου ενόχλησης από ηχώ, σε κλειστούς χώρους. Γ. Καμάρης, Ι. Μουρτόπουλος 142

Ανάλυση ηχητικών σημάτων και συναρτήσεων μεταφοράς χώρων σε συνθήκες αντήχησης με όρους εντροπίας και πληροφορίας. Σ. Ποτηράκης, Ν. Α. Τάτλας 153

Τεχνικές ταξινόμησης ηχητικών συμβάντων σε ραδιοφωνικές μεταδόσεις και η αξιοποίηση της στερεοφωνικής πληροφορίας. Ρ. Γ. Κωτσάκης, Γ. Μ. Καλλίρης, Χ. Α. Δημούλας 161

Ημιτονοειδής ανάλυση και σύνθεση ηχητικών σημάτων για αναπραγωγή χαμηλών συχνοτήτων. Α. Τσιλφίδης, Ε. Μ. Κοτσώνης - Τζάννες, Ι. Μουρτζόπουλος 169

Ανάλυση και εκτίμηση του ακουστικού περιβάλλοντος απευθείας από ηχητικά σήματα. Ε. Γεωργαντή, Ι. Μουρτζόπουλος 178

Υλοποίηση επεξεργαστή ηχητικών σημάτων με έμφαση στα μεταβατικά φαινόμενα. Κ. Καραμήτας, Α. Τσιλφίδης, Ι. Μουρτζόπουλος 186

Αιτιολογημένη εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων. G. Schubert 196

Ηχομόνωση και διαρρύθμισης της Νεοελληνικής κατοικίας: οι δεκαετίες 20 - 30. Ρ. Δεληγιαννίδου, Ν. Μπάρκας 204

Προβλήματα ακουστικής - ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας σε πολιτιστικά κτίρια μεσαίου και μικρού μεγέθους. Το παράδειγμα του Ιδρύματος "Μιχάλης Κακογιάννης". Θ. Τιμαγένης 213

Ηχομονωτική ικανότητα κτιριακών προσόψεων σύγχρονης τεχνολογίας· Δικέλυφες όψεις. Ε. Καρνάρη, Ε. Σ. Αυγουστοπούλου, Α. Σωτηροπούλου, Γ. Πουλάκος, Τ. Καρατζάς 222

Ηχομονωτική ικανότητα κτιριακών προσόψεων σύγχρονης τεχνολογίας· Ελαφριά πετάσματα. Ε. Σ. Αυγουστοπούλου, Ε. Καρνάρη, Α. Σωτηροπούλου, Γ. Πουλάκος, Τ. Καρατζάς 228

iReflectors - Έξυπνοι ακουστικοί ανακλαστήρες από σύνθετα υλικά. Δ. Θ. Γ. Κατερέλος, Κ. Δρόσος, Α. Κόκκινος, Σ. Ι. Μιμηλακης, Α. Φλώρος 234

Δυνατότητες συλλογής και μετατροπής διάχυτης ακουστικής ενέργειας. Χ. Παπαδάκος, Ι. Μουρζόπουλος 242

Διαδικτυακή πλατφόρμα εκτίμησης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα. Κ. Δρόσος, Α. Γιανναακουλόπουλος, Α. Φλώρος 250

Σχεδιασμός συστήματος ηχοτροφοδοσίας γραμμικής συστοιχίας σε μεγάλη αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, χρησιμοποιώντας προσομοίωση σε υπολογιστή και μετρήσεις εκθετικής σάρωσης ημιτόνου. Μ. Γιουβανάκης, Χ. Σεβαστιάδης, Γ. Παπανικολάου 258

Η επαυξημένη ηχητική πραγματικότητα ως φορέας ανάπτυξης ηχητικών παιχνιδιών. Ν. Μουστάκας, Α. Φλώρος, Ν. Γ. Κανελλόπουλος 267

Ηχοτοπία της Κεφαλονιάς: ψηφιακή καταγραφή και διεπιστημονική μελέτη κατά την εκπαιδευτική διαδικασία. Α. Λουφόπουλος, Μ. Εμμανουήλ, Θ. Μαραγκός, Δ. Κατερέλος 273

Το ηχοτοπίο ως παράμετρος του αστικού σχεδιασμού: Διερεύνηση και εφαρμογή. Π. Χουρμουζιάδου, Κ. Σακαντάμης 281

Πλαίσιο για την δημιουργία ενός επιτόπιου πειραματικού ηχομουσείου. Α. Καραποστόλη, Α. Δ. Κυριακίδου, Ν. Τσινίκας 289

Καταγραφή του ήχου ψαριών σε μικρά ενυδρεία και τα χαρακτηριστικά του ήχου σε σχέση με τον μηχανισμό παραγωγής του. Ζ. Τριπολιτάκη, Ν. Δασκαλάκη, Σ. Κουζούπης, Π. Παπαδάκης 295

Classification of experimental mice ultrasonic vocalizations using machine learning techniques. A. Neocleous, S. Kouzoupis, I. Athanasakis 303

Investigating experimentally the characteristics of leak noise in plastic water-filled pipes. A. Papastefanou, P. Joseph, M. Brennan 311

Ανάπτυξη συστήματος ηχομέτρησης σε φορητή πλατφόρμα κινητής τηλεφωνίας. Α. Σαρρής, Α. Φλώρος 321

Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού περιβάλλοντος ηχομέτρησης σε έξυπνο τηλέφωνο (i-Phone). Λ. Βρύσης, Χ. Δημούλας, Γ. Καλλίρης, Γ. Παπανικολάου 329

Επεξεργασία μετρήσεων θορύβου ελικοπτέρου. Π. Μενούνου Π. Κονδύλης 337

Ακουστικός σχεδιασμός αιθουσών rock μουσικής ~ επισκόπηση σύγχρονων εξελίξεων

Αλεξάνδρα Γ.Σωτηροπούλου
Επικ.Καθ.Σχ.Αρχ. Μηχ. ΕΜΠ
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
alexia@central.ntua.gr

Γεώργιος Πουλάκος
Καθ.Σχ.Αρχ.Μηχ. ΕΜΠ
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
gpoulako@central.ntua.gr

Ιωάννης Καραγιάννης,
υ.δ.Σχ.Αρχ.Μηχ. ΕΜΠ
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
mediumswing@hotmail.com

Αναστασία Σαββοπούλου
Αρχ. Μηχ. ΕΜΠ
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
nsavvopoulou@yahoo.co.uk

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας για την ακουστική μουσικής rock αναδεικνύουν την καταλληλότητα σχετικά μικρών αιθουσών για την αδάπανη διαμόρφωσή τους. Περαιτέρω προτείνονται επιθυμητές τιμές του χρόνου αντήχησης και επιθυμητή φασματική κατανομή αυτού, με έμφαση στην ανάγκη ταπείνωσης του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες από 63Hz oct. band. Επίσης διαφωτίζονται μερικοί από τους τρόπους με τους οποίους το μουσικόφιλο κοινό αντιλαμβάνεται την ακουστική αιθουσών αυτού του είδους. Γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα η οποία μπορεί να οδηγήσει στη διατύπωση αρχών και τεχνικών σχεδιασμού αιθουσών rock μουσικής.

Review of the acoustics of rock music auditoria

ABSTRACT

Suitability of relatively small auditoria for rock music is demonstrated in relevant modern literature. Desired values for reverberation time as well as for the spectral balance of the latter are proposed with emphasis on the need for short reverberation time at the low frequency end of the spectrum from 63Hz oct. band. Furthermore, there are illuminated some of the ways a fairly large cross section of rock concert goers describe their acoustic experience of listening to live music. Further research is necessary in order to suggest acoustic principles and techniques for the design of rock auditoria.

Εισαγωγή

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία πάνω στο θέμα του σχεδιασμού χώρων ακροατηρίου μουσικής αναφέρεται σχεδόν εξολοκλήρου σε αίθουσες που προορίζονται για ερμηνεία και ακρόαση κλασσικής μουσικής. Όμως η ακουστική ποιότητα είναι απαίτηση και για άλλα είδη μουσικής που είναι δημοφιλή όπως η μουσική rock. Ενώ λοιπόν οι συναυλίες rock είναι πολυπληθέστερες από τις αντίστοιχες κλασσικής μουσικής και ενώ σε όλο τον κόσμο (και στη χώρα μας) κατασκευάζονται αίθουσες που φιλοξενούν pop και rock ορχήστρες, δεν υπάρχει επιστημονική τεκμηρίωση του σχεδιασμού των αιθουσών αυτών. Επίσης λόγω της μορφολογίας της μουσικής rock (υψηλές στάθμες, διαφορετική συχνοτική κατονομή) αλλά και του τρόπου αναπαραγωγής του ήχου (ενίσχυση, χρήση συστήματος PA) είναι ξεκάθαρο ότι η υπάρχουσα γνώση από τη μελέτη της ακουστικής των αιθουσών κλασσικής μουσικής δεν αρκεί και απαιτείται ειδική αντιμετώπιση για το σύγχρονο αυτό είδος. Η απαίτηση αυτή έγινε αντιληπτή από τους επιστήμονες μόλις την τελευταία δεκαετία όποου έχουν γίνει κάποιες πρώτες προσπάθειες διερεύνησης της ακουστικής τέτοιων αιθουσών.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία επισκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας που ασχολείται με το θέμα αυτό καθώς και σύγκριση της μεθοδολογίας και των μέχρι στιγμής συμπεράσμάτων με εκείνα της μελέτης της ακουστικής αιθουσών κλασσικής μουσικής.

1. Σχετικά με το μουσικό είδος

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζει τη μουσική rock και που υποδεικνύει την ανάγκη ειδικής αντιμετώπισής της στο θέμα του ακουστικού σχεδιασμού των σχετικών αιθουσών είναι η ενίσχυση του ήχου και η χρήση συστήματος P.A. (Public Address). Η στάθμη του ήχου σε rock συναυλίες συχνά είναι αρκετά πάνω από 100 db(A) τόσο στην περιοχή του ακροατηρίου όσο και στη σκηνή. Επίσης η στάθμη στις χαμηλές συχνότητες είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω του μπάσου, της μπότας (kick drum) και της μορφολογίας του είδους. Σύμφωνα με τον Niels Larsen [1] πάνω από τη μισή ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στο ηλεκτρακουστικό σύστημα μίας ροκ συναυλίας καταναλώνεται για τη μιάμιση οκτάβα από 40 έως 125Hz. Από την άλλη το εύρος των δυναμικών (dynamic range) μιας ροκ ορχήστρας είναι πολύ μικρότερο από εκείνο μιας κλασσικής. Ο ήχος από τα διαφορετικά μουσικά όργανα και τους τραγουδιστές αναμειγνύεται (is mixed) στην κονσόλα του ήχου~ ο στόχος του ηχολήπτη είναι να δημιουργήσει την καλύτερη δυνατή ποιότητα ήχου για το ακροατήριο αναδεικνύοντας ή διορθώνοντας τη φυσική ακουστική της αίθουσας. Πέραν αυτού, αφ ενός, οι μουσικοί ακούν τον εαυτό τους και τους άλλους μουσικούς μέσω monitor, όμως χρειάζονται την ακουστική της αίθουσας τόσο για να νοιώθουν ότι συνυπάρχουν φυσικά στη σκηνή όσο και για να ακούν και να αισθάνονται το ακροατήριο. Αφ ετέρου, και το ακροατήριο έχει ανάγκη όχι απλώς να ακούσει τον απ ευθείας ήχο από τα μεγάφωνα αλλά και να νοιώσει την παρουσία του χώρου στο μουσικό γίγνεσθαι.

2. Επισκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας

Η πρώτη επιστημονική εργασία πάνω στο θέμα παρουσιάζεται το 2004 από τους Larsen et al [2] οι οποίοι έκαναν ακουστικές μετρήσεις σε επτά αίθουσες χωρίς ακροατήριο, της Δανίας, χωρητικότητας από 400 έως 1200 ακροατές οι οποίες χρησιμοποιούνται για pop και rock μουσική. Οι μετρήσεις έγιναν τόσο με τη χρήση ισότροπης (omni directional) πηγής όσο και με τη χρήση του P.A. συστήματος του κάθε χώρου. Ο Larsen ο οποίος είναι και ο ίδιος μουσικός με τη βοήθεια ενός έμπειρου ηχολήπτη βαθμολόγησαν τις επτά αυτές αίθουσες σύμφωνα με την προσωπική τους κρίση. Με στόχο να προκύψουν ειδικά κριτήρια σχεδιασμού για τέτοιες αίθουσες έγινε προσπάθεια να συνδυαστούν τα αποτελέσματα της υποκειμενκής αξιολόγησης με εκείνα των φυσικών μετρήσεων. Κατέληξαν στο ότι το κλάσμα του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές (63-250 Hz oct. band) προς μεσαίες (500 -2000 Hz oct band) συχνότητες (modified bass ratio – BR_m) συνδέεται με την ποιότητα της ακουστικής και πρότειναν τρία κριτήρια σχεδιασμού αιθουσών rock για αίθουσες χωρίς ακροατήριο. Ητοι:

1) $BR_m \leq 1.2$, η τιμή κάτω από 1 θα ήταν προτιμότερη αλλά δύσκολο στην πράξη να επιτευχθεί

2) $0{,}8\text{sec} \leq T_{mean} \leq 1.0\text{sec}$, όπου T_{mean} , mean frequency reverberation time

3) $T_{100Hz} \leq 1{,}5\text{sec}$

Επίσης βρέθηκε ικανοποιητική ταύτιση τιμών του χρόνου απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων EDT (Early Decay Time) μεταξύ μετρήσεων με την ισότροπη πηγή και μετρήσεων με το P.A. σύστημα των αιθουσών~ το εύρημα διευκολύνει πρακτικά τη διεξαγωγή μετρήσεων.

Τρία χρόνια αργότερα η ομάδα του Larsen έκανε μετρήσεις φυσικών παραμέτρων και αντίληψης της ακουστικής σε είκοσι αίθουσες μουσικής rock στη Δανία, χωρητικότητας από 300 έως 1400 ατόμων [1]. Για τις φυσικές μετρήσεις έγινε χρήση ενός ηχείου χαμηλών συχνοτήτων (sub woofer) μαζί με την ισότροπη πηγή. Για το πείραμα της αντίληψης εικοσιπέντε επαγγελματίες μουσικοί και οκτώ έμπειροι ηχολήπτες που στο παρελθόν είχαν ερμηνεύσει ή εργαστεί σε αυτές τις αίθουσες συμπλήρωσαν σύμφωνα με τη μνήμη τους ένα ερωτηματολόγιο που τους στάλθηκε. Τα αποτελέσματα της μελέτης επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα ότι οι χαμηλές συχνότητες παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο σε αίθουσες μουσικής rock και συνιστάται ιδιαιτέρως η χρήση της οκτάβας 63Hz στους υπολογισμούς και το σχεδιασμό τέτοιων αιθουσών. Από τα αποτελέσματα της υποκειμενικής αξιολόγησης προτείνεται η επιθυμητή τιμή του χρόνου αντήχησης συναρτήσει του όγκου της αίθουσας. Στην ίδια εργασία μετρήθηκε επί τόπου στην αίθουσα ο συντελεστής ηχοαπορρόφησης ορθίου ακροατηρίου.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πιο πάνω πειράματος ο Larsen σε επόμενη εργασία του [3],[4] επιχειρεί να διατυπώσει αλγόριθμο υπολογισμού των αποδεκτών ορίων του χρόνου αντήχησης σε αίθουσες rock μουσικής. Καταλήγει στο ότι σε τέτοιες αίθουσες ιδανικά θα πρέπει να επικρατεί σταθερός χρόνος αντήχησης σε όλο το φάσμα και ότι η τιμή του πρέπει να κυμαίνεται ως ακολούθως:

$$1 \leq T_{30} \leq 2\text{x}10^{-4} \text{ x Volume}(m^3) + 0.5\text{s} \qquad (2.1)$$

Την ίδια εποχή οι Lautenbach et al [5] τονίζουν την έλλειψη χώρων ειδικά σχεδιασμένων για pop μουσική και διεξάγουν ακουστικές μετρήσεις σε τέσσερις μεγάλες αίθουσες (ελάχιστης χωρητικότητας 5500 ακροατών). Οι συγγραφείς

συγκρίνουν τις αίθουσες μεταξύ των ως προς την ακουστική των ποιότητά, με βάση την προσωπική εμπειρία των καθώς και με βάση διατυπωμένες κριτικές άλλων ειδικών. Οι φυσικές μετρήσεις αφορούν στο χρόνο αντήχησης των αιθουσών. Οι συγγραφείς με βάση τα πειραματικά δεδομένα των, υιοθετούν τον ακόλουθο αλγόριθμο για την πρόβλεψη του χρόνου αντήχησης σε μεγάλες αίθουσες αυτού του είδους:

$$T_{60}=0.038V^{0.325} \qquad (2.2)$$

Οι ανωτέρω αναφερθείσες μελέτες επιχειρούν να διαφωτίσουν για πρώτη φορά με επιστημονικό τρόπο το θέμα του σχεδιασμού αιθουσών rock μουσικής. Βασικός περιορισμός τους είναι ότι η αντίληψη περί της ακουστικής ποιότητας στις αίθουσες βασίζεται είτε στην προσωπική άποψη των συγγραφέων είτε στην άποψη ολιγάριθμης ομάδας μουσικών ερμηνευτών ή ειδικών όπως αυτή έχει διαμορφωθεί από μνήμης και συνεπώς δεν εκπροσωπεί απαραίτητα την άποψη του ευρέως μουσικόφιλου κοινού.

Το έτος 2009 ομάδα φοιτητών του ΕΜΠ (Ρεμπής και Τσούκα) έκαναν ακουστικές μετρήσεις σε πέντε μουσικές σκηνές της Αθήνας που φιλοξενούν σχεδόν εξ ολοκλήρου rock συγκροτήματα [6]. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης επιβεβαιώνουν τη θεωρία ότι σε σχετικά μικρές αίθουσες (στην περίπτωσή μας κάτω των 400m^3) η τιμές του EDT και του χρόνου αντήχησης RT συγκλίνουν μεταξύ των. Το ανωτέρω εύρημα σε συνδυασμό με το εύρημα των Larsen et al [2] περί σύγκλισης αποτελεσμάτων μετρήσεων του EDT ανεξαρτήτως είδους πηγής (ισότροπη vs P.A. system) ενθαρύνει τη διεξαγωγή μετρήσεων αυτών των παραμέτρων σε μικρές αίθουσες με χρήση μόνο του P.A., το οποίο είναι ιδιαίτερα πρακτικό Περεταίρω, από τις μετρήσεις των Ρεμπή και Τσούκα βρέθηκε ότι οι τιμές του λόγου των πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις (80ms E-to-L) και του κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων (50ms EEF) είναι σχετικά αυξημένες στις μικρότερες αίθουσες. Αυτό το εύρημα επιβεβαιώνει τη θεωρία και υποστηρίζει και την κοινή άποψη ότι σε μικρές αίθουσες ο ήχος ακούγεται καθαρότερος. Επίσης οι τιμές των (80ms E-to-L) και (50ms EEF) βρέθηκαν συγκριτικά αυξημένες στη σκηνή σε σχέση με την περιοχή του ακροατηρίου όπως είναι αναμενόμενο βάσει της θεωρίας. Τέλος, αντίθετα προς τις τεράστιες αίθουσες με τον συνακόλουθα υψηλό χρόνο αντήχησης, στις μικρές αίθουσες όπου εργάστηκε η ομάδα του ΕΜΠ μετρήθηκαν σχετικά χαμηλές τιμές του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες συγκριτκά με τις μεσαίες και υψηλές (BR_m). Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνεται από μεταγενέστερη εργασία του Larsen [7] η οποία περιγράφεται πιο κάτω. Αυτό στηρίζει την άποψη ότι σε σχετικά μικρές αίθουσες εν γένει είναι ευκολότερο να ικανοποιηθούν τα κριτήρια της ακουστικής για Rock συναυλίες σε αντίθεση με το εμπορικό κριτήριο που απαιτεί μεγάλους χώρους.

Σε επόμενη εργασία [8] επίσης η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ (Πάνος και Γρίβα) χρησιμοποιώντας σύγχρονες ψυχομετρικές μεθόδους (semantic rating scale, multidimensional analysis)[9] έκαναν πειραματική εκτίμηση της αντίληψης της ακουστικής στις τέσσερις από τις πιο πάνω αίθουσες~ η εκτίμηση διεξήχθη από το κοινό κατά τη διάρκεια συναυλιών. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν δύο ανεξάρτητες παραμέτρους της αντίληψης ήτοι:

Α) Πληρότητα – Ζωντάνια (γεμάτος – αδειος, ζωντανός άψυχος) και

Β) Απαλότητα (μαλακός – σκληρός, τραχύς – απαλός)

Επιχειρώντας σύγκριση των πιο πάνω αποτελεσμάτων με αντίστοιχα ευρήματα επί τη βάση αφ ενός κλασσικής μουσικής [9], [10] και αφετέρου μουσικής Jazz [11] επιβεβαιώνεται ότι η παράμετρος «Πληρότητα – Ζωντάνια» αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό για την ακουστική διαφορετικών μουσικών ειδών. Περαιτέρω επιβεβαιώθηκε πως υπάρχει και πολυμορφία στην αντίληψη της ακουστικής για διαφορετικά είδη μουσικής. Σύμφωνα με τους Πάνο και Γρίβα αυτό αποδίδεται α) στην ποικιλία των ήχων που μπορεί να αποδώσει κάθε όργανο της ροκ μπάντας σε αντίθεση με τα όργανα της κλασσικής συμφωνικής ορχήστρας που έχουν μεμονωμένο και διακριτό ηχόχρωμα, β) στο γεγονός ότι κάθε όργανο της rock μπάντας ερμηνεύει ανεξαρτήτως και όχι ως μέλος μιας ομάδας οργάνων όπως συμβαίνει στην κλασσική μουσική και γ) η χρήση παραμόρφωσης του ήχου όπου στη rock μουσική σχεδόν επιβάλλεται σε αντίθεση με όλα τα άλλα μουσικά είδη.

Η ομάδα του ΕΜΠ εμπλουτίζει τη βιβλιογραφία με δεδομένα από μικρού όγκου αίθουσες που αποτελούν μια μεγάλη μερίδα αιθουσών αυτού του είδους. Επίσης επιβεβαιώνει ευρήματα προγενεστέρων μελετών. Περαιτέρω διαφωτίζει ως προς την αντίληψη της ακουστικής εκ μέρους αντιπροσωπευτικού προφίλ του ροκ μουσικόφιλου κοινού.

Το 2011 οι Larsen και Dammerud παρουσίασαν αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων σε 55 αίθουσες της ευρώπης που χρησιμοποιούνται για ποπ και ροκ συναυλίες [7]. Στη μελέτη επικαλούνται μία πληθώρα φυσικών ακουστικών παραμέτρων. Ασχολούμενοι με αίθουσες μεσαίου (600 – 7.000m^3) και μεγάλου (7.000 – 600.000m^3) δεν εντοπίζουν σύγκλιση μεταξύ EDT και T_{30} σε αντίθεση με την έργασία των Ρέμπη και Τσούκα. Επιβεβαιώνουν όμως το εύρημά των Ρέμπη Τσούκα ότι το BR_m είναι σχετικά χαμηλό, δηλαδή επιδεικνύει ευνοικές τιμές σε σχετικά μικρές αίθουσες. Το άρθρο αποτελεί μία βάση φυσικών ακουστικών δεδομένων χρήσιμη για περαιτέρω μελέτες.

Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα την αίθουσα Rockheim στη Νορβηγία ο Stofringsdal ερευνά τη σχέση μεταξύ αρχιτεκτονικών στοιχείων του χώρου και ηλεκτρακουστικού σχεδιασμού [12]. Τονίζει τη σημασία των πλευρικών τοίχων κοντά σε line array ώστε να συντηρείται η κατευθυντικότητα του εκπεμπόμενου ήχου. Επίσης συνοψίζει κριτήρια σχεδιασμού για ποπ και ροκ αίθουσες τα οποία κατά την αποψή του είναι σημαντικά και προτείνει την αλληλοσυσχέτιση μεταξύ αρχιτεκτονικού ακουστικού σχεδιασμού και ηλεκτρακουστικού σχεδιασμού. Η μελέτη αυτή μολονότι δεν προσεγγίζει το θέμα με επιστημονική μεθοδολογία εντούτοις παρέχει πρακτικές συνταγές για τον μελετητή.

3. Συμπερασματα

Οι μέχρι τούδε μελέτες για την ακουστική αιθουσών rock μουσικής δείχνουν τα κάτωθι:

Έχουμε τρεις ομάδες αιθουσών αναλόγως της χωρητικότητας. Στην πρώτη ομάδα των μικρών αιθουσών είναι ευκολότερο να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σε σχέση με τις άλλες ομάδες. [6]

Μερικά κριτήρια σχεδιασμού προτείνονται [2] όπως επιθυμητές τιμές του χρόνου αντήχησης συναρτήσει του όγκου της αίθουσας, φασματική κατανομή του

χρόνου αντήχησης, με έμφαση στην ανάγκη ταπείνωσης του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες από 63Hz oct. band.

Ενώ η τεχνολογία μας παρέχει τη δυνατότητα να προσθέσουμε αντήχηση ηλεκτρονικά στον ήχο, εντούτοις αυτό που συνήθως χρειάζεται είναι η μείωση του χρόνου αντήχησης στις τιμές που υποδεικνύουν οι ανωτέρω επιστημονικές εργασίες. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρέμβαση στη φυσική ακουστική του χώρου (π.χ. χρήση απορροφητών χαμηλών συχνοτήτων – μπασοπαγίδες)

Από τις παραπάνω εργασίες είναι φανερό ότι ο ιδανικός χρόνος αντήχησης για αίθουσες rock (κάτω του 1,2sec) είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο για κλασσική μουσική (άνω του 1,5sec).

Ομοίως σε αντίθεση με την έρευνα για την ακουστική κλασσικών αιθουσών συναυλιών η μέχρι τούδε αντίστοιχη διερεύνηση για rock μουσική δεν έχει κάνει αναφορά σε πιθανή σημασία πρώτων πλευρικών ανακλάσεων.

Τέλος, από τις ελάχιστες μελέτες που ασχολούνται [8] με την αντίληψη της ακουστικής σε τέτοιου είδους αίθουσες επί τη βάσει επιστημονικής μεθοδολογίας προκύπτει ότι: Α) η ακουστική αντίληψη εκφράζεται με δύο ανεξάρτητες παραμέτρους της αντίληψης. β) η ακουστική αντίληψη διαφοροποιείται σε σχέση με την ακουστική αιθουσών κλασσικής μουσικής και μουσικής jazz.

Περεταίρω μελέτες είναι απαραίτητες προκειμένου να αναδειχθούν, υποκειμενικώς σημαντικές, φυσικές ακουστικές παράμετροι~ αυτές μπορούν να χρησιμεύσουν για τη διατύπωση αρχών και τεχνικών σχεδιασμού αιθουσών rock μουσικής με ασφαλή αποτελέσματα.

4. Αναφορές

[1] N.W. Larsen, E.R. Thompson, A.C. Gade «Acoustics in rock and pop music halls» , AES *122nd Convention 2007*

[2] N.W. Larsen, E. Olmos, A.C. Gade «Acoustics in halls for rock music» in *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004*

[3] N.W. Larsen, E.R. Thompson, «The importance of bass clarity in pop and rock venues», poster session in Auditorium Acoustics, Oslo, 2008

[4] N.W. Larsen, E.R. Thompson, A.C. Gade «Suitable reverberation times for halls for rock and pop music» J.Acoust. Soc. Am. **127,** pp 247-255 (2010)

[5] M. Lautenbach, P.Heringa, M.Vercammen «Acoustics for large scale indoor pop events» in *Satellite Symposium of the 19th International Congress on Acoustics, Seville, 2007*

[6] Π. Ρέμπης, Σ. Τσούκα «Ακουστική αιθουσών μουσικής rock», διπλ. εργασία, Πολ. Μηχ. ΕΜΠ 2009

[7] N.W. Larsen, J.J. Dammerud «A survey of reverberation times in 50 European venues presenting pop & rock concerts» in *Forum Acusticum, Aalborg - Denmark 201*

[8] Α. Πάνος, Ι.Γρίβα «Ακουστικές μετρήσεις σε αίθουσες μουσικής rock», διπλ. εργασία, Πολ. Μηχ. ΕΜΠ 2010

[9] A.G. Sotiropoulou, R.J. Hawkes, D.B. Flemming « Concert Hall Acoustic Evaluations by Ordinary Concert – Goers: I, Multi-dimensional Description of Evaluations» Acustica **81** pp 1-9 (1995)

[10] H. Wilkens «Mehrdimensionale Beschreibung subjectiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsalen» Acustica **38** pp10-23 (1977)

[11] A. Sotiropoulou, G. Poulakos, J. Karayiannis, J. Tzouvadakis «Subjective evaluation of the acoustics of Jazz music auditoria; multi dimensional description of evaluations» in *7th International Conference on Auditorium Acoustics, organised by the Institute of Acoustics, Oslo 2008*.

[12] B. Stofringsdal «Integrated room acoustics and electroacoustic design – The concert venue at Rockheim, Norway» in *8th International Conference on Auditorium Acoustics, organised by the Institute of Acoustics, Dublin 2011*

Ακουστική μελέτη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων του δημοτικού σχολείου Γωνιάς Ρεθύμνου

Τερζάκης Μιχαήλ-Ευάγγελος
Προπτυχιακός φοιτητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100, Ρέθυμνο, mixterzakis@hotmail.com
Μπρέζας Σπύρος
Εργαστηριακός συνεργάτης Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100, Ρέθυμνο, brezas@staff.teicrete.gr, 28310 21909
Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος
Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100, Ρέθυμνο, bakarezos@staff.teicrete.gr, 28310 21908
Δρ. Παπαδογιάννης Νεκτάριος
Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Παράρτημα Ρεθύμνου, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100, Ρέθυμνο, npapadogiannis@staff.teicrete.gr, 28310 21904

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία σχετίζεται με την ακουστική μελέτη μιας αίθουσας πολλαπλών χρήσεων ενός δημοτικού σχολείου. Η αίθουσα αν και ανήκει σε νεότευκτο σχολικό συγκρότημα, παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλή ακουστική ποιότητα. Η μελέτη στηρίζεται στη χρήση προγράμματος προσομοίωσης του χώρου, βάσει της οποίας προτείνεται η τελική ακουστική τροποποίηση. Παραθέτονται αρχικές και τελικές τιμές των ακουστικών δεικτών καθώς και οι προτεινόμενες λύσεις.

Acoustic study of the multiple use classroom in the elementary school of Gonia in Rethymno

ABSTRACT

This work is about an acoustic study of a multiple purpose room that belongs to an elementary school. The room, although being newly built, exhibits low acoustic quality. The acoustic alteration of the room is based on simulation software. Acoustical indexes values are presented along with the proposed solutions.

Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάδειξη και επίλυση των προβλημάτων ακουστικής που υπάρχουν σε εκπαιδευτικά κτήρια, ακόμα και νεότευκτα, σε όλες τις βαθμίδες της εκπαίδευσης.

Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων του δημοτικού σχολείου Γωνιάς Ρεθύμνου παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς η ποιότητα της ακουστικής της βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Αυτό γίνεται αντιληπτό ακόμα και στις πιο κοντινές στη σκηνή θέσεις, όπου η ακρόαση πραγματοποιείται με δυσκολία. Η προτεινόμενη ακουστική μελέτη που πραγματοποιήθηκε μέσω προγράμματος προσομοίωσης, δύναται στην περίπτωση υλοποίησής της να αμβλύνει τα ακουστικά προβλήματα της αίθουσας.

1. Περιγραφή της Αίθουσας

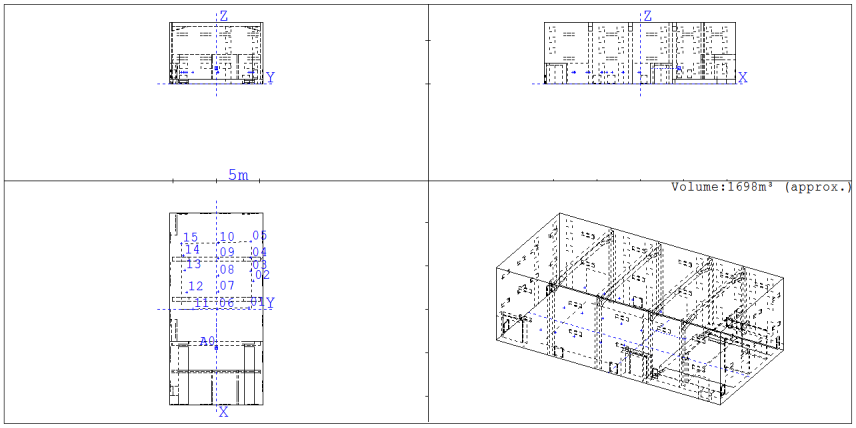
Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων βρίσκεται στο νεότευκτο δημοτικό σχολείο Γωνίας το οποίο ανήκει στο νομό Ρεθύμνου. Αν και η αίθουσα λόγω τοποθεσίας παρουσιάζει χαμηλό θόρυβο βάθους, οι ακουστικές της ατέλειες είναι τόσες, ώστε η ακρόαση εντός της να δυσχαιρένεται σε υψηλό βαθμό.

Η αίθουσα είναι ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου σχήματος με διαστάσεις $22{,}1 \times 10{,}82 \times 7{,}1m$ $(M \times \Pi \times Υ)$ και όγκο περίπου $1698m^3$. Οι αναλογίες των διαστάσεων δεν εμπίπτουν στις προτεινόμενες αναλογίες σύμφωνα με τον Bolt [1]. Τα υλικά κατασκευής των επιφανειών της αίθουσας είναι, σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά της σχέδια, τα ακόλουθα:

Δάπεδο – linoleum
Σοβατεπί – ξύλο
Τοίχοι – τριπτό επίχρισμα επί τοίχου σκυροδέματος
Χωρίσματα – χρωματισμένη γυψοσανίδα
Οροφή – επίχρισμα
Χρώματα – πλαστικό σπατουλαριστό
Δάπεδο σκηνής – ξύλο
Σοβατεπί σκηνής - ξύλο

Παρατηρώντας τις διαστάσεις αλλά και τα υλικά κατασκευής που παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή απορρόφησης γίνεται αντιληπτή η διατήρηση του αντηχητικού πεδίου για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την παύση της πηγής.

Οι αποκλίνουσες από τις προτεινόμενες τιμές των ακουστικών δεικτών της αίθουσας επαληθεύτηκαν μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με ηχόμετρο τύπου 1 και με το σύστημα MLSSA. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και μέσω προσομοίωσης του χώρου με ειδικό λογισμικό. Ενδεικτικές εικόνες του χώρου μέσω του προγράμματος προσομοίωσης φαίνονται στο σχήμα 1.1. Ενδεικτικές τιμές ακουστικών δεικτών της αρχικής μορφής της αίθουσας παρατίθονται στον πίνακα 1.1. Συμπερασματικά, ο χώρος στην αρχική του μορφή κρίνεται ακατάλληλος ακουστικά για την προοριζόμενη λειτουργία του [2-5].



Σχήμα 1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της αίθουσας πριν την ακουστική επέμβαση

Πίνακας 1.1: Αποτελέσματα ακουστικών δεικτών πριν την ακουστική επέμβαση

Δείκτης	Συχνότητα (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT_{20} (s)	4,93	5,60	5,53	4,93	4,42	3,09
RT_{30} (s)	4,89	5,68	5,48	4,93	4,38	3,42
EDT (s)	4,69	5,63	5,68	5,06	4,5	3,08
D_{50} (%)	18,7	16,15	18,11	26,34	28,47	36,35
C_{80} (dB)	-4,32	-5,23	-4,93	-3,07	-2,32	-0,795
T_s (ms)	316	383	377,9	311,2	270,7	179,5
LF (%)	23,02	23,95	20,79	18,34	14,88	15,87

2. Ακουστική τροποποίηση της αίθουσας

Αρχικά επαληθεύτηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της αρχικής μορφής του χώρου με αυτά των μετρήσεων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο προσομοίωσης η ακουστική βελτίωση της αίθουσας. Τα σημεία στα οποία βασίστηκε η βελτίωση αναφέρονται παρακάτω.

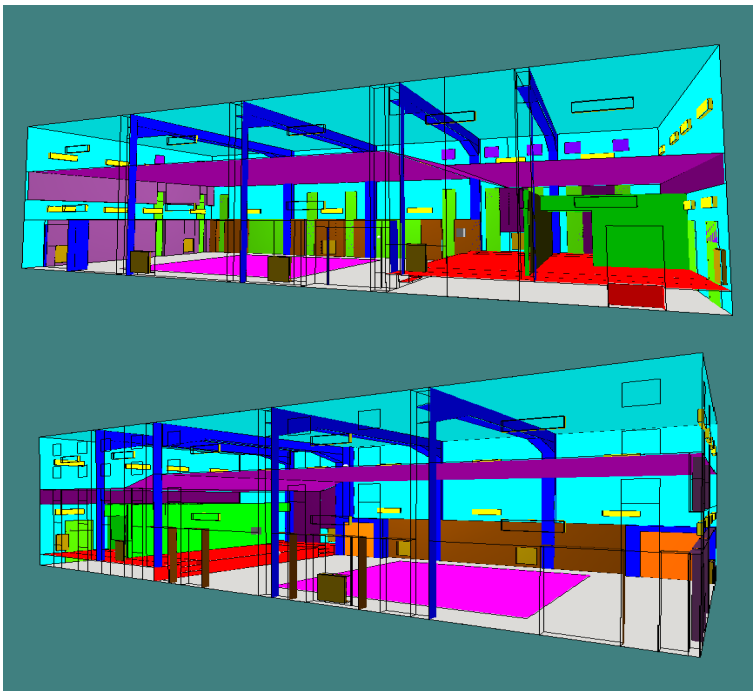
Η πρώτη μετατροπή αφορά το ύψος της αίθουσας, το οποίο μείωθηκε ώστε οι διαστάσεις να εμπίπτουν στο διάραμμα Bolt. Προτείνεται η τοποθέτηση ψευδοροφής για την αύξηση της απορρόφησης. Η ψευδοροφή θα έχει συγκεκριμένη κλίση στην άκρη της σκηνής για τη χρήση των ανακλάσεων από αυτή.

Στους πλευρικούς τοίχους εκατέρωθεν της σκηνής προτείνεται η τοποθέτηση διάτρητης γυψοσανίδας με σκοπό την αύξηση της απορρόφησης, αλλά και την εξάλειψη των εσοχών που δημιουργούν οι κάθετοι δοκοί της αίθουσας. Επιπροσθέτως, προτείνεται η ανάρτηση ελαφριών βελούδινων κουρτίνων στις αρχικά ακάλυπτες γυαλινες πόρτες και παράθυρα της αίθουσας. Στον απέναντι από τη σκηνή τοίχο, προτείνεται η τοποθέτηση πορώδη απορροφητικά πάνελ [2].

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο χώρο της σκηνής, λόγω των αρχικών πλευρικών ανακλάσεων επί της σκηνής και του χώρου των παρασκηνίων που δημιουργούν οι ήδη υπάρχουσες γυψοσανίδες. Πλευρικά της σκηνής και κατή μήκος των παρασκηνίων προτείνεται η τοποθέτηση πορώδων ηχοαπορροφητικών πάνελ. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η τρισδιάστατη μορφή της αίθουσας μετά την ακουστική τροποποίηση και στον πίνακα 2.1 ενδεικτικές τιμές ακουστικών δεικτών μετά την τροποίηση.

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα ακουστικών δεικτών μετά την ακουστική επέμβαση

Δείκτης	Συχνότητα (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT_{20} (s)	1,48	1,28	1,34	1,31	1,35	1,15
RT_{30} (s)	1,65	1,31	1,35	1,31	1,40	1,17
EDT (s)	1,19	0,9	1,008	1,08	1,23	0,94
D_{50} (%)	59,58	76,45	79,06	74,55	71,04	74,18
C_{80} (dB)	4,38	7,66	7,79	7,01	6,59	7,22
T_s (ms)	68	40,48	39,94	44,83	50,28	43
LF (%)	24,38	23,81	20,24	16,96	15,18	15,72



Σχήμα 2.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της αίθουσας μετά την ακουστική επέμβαση

3. Συμπεράσματα

Η αρχική μορφή της αίθουσας παρουσιάζει χαμηλή ακουστική ποιότητα, η οποία δύναται να βελτιωθεί μέσω της προτεινόμενης ακουστικής τροποποίησης. Αυτό επιβεβαιώνεται μέσω της σύγκρισης των ακουστικών δεικτών που αναφέρονται στον πίνακα 1.1 και 1.2. Οι κατευθυντήριοι άξονες της ακουστικής τροποποίησης είναι η μείωση του όγκου της αίθουσας μέσω ψευδοροφής, η αύξηση της απορρόφησης των πλευρικών τοίχων και η κάλυψη με κουρτίνα των περιμετρικών υαλοπινάκων στη μεριά του κοινού. Η τροποποίηση περιλαμβάνει επίσης τη μείωση των πλευρικών ανακλάσεων επί της σκηνής, αλλά και την αύξηση της απορρόφησης των παρασκηνίων με σκοπό τη μείωση της όχλησης των παρευρισκόμενων επί της σκηνής.

Ολοκληρώνοντας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία δε στοχεύει τόσο στην αντιμετώπιση των ακουστικών προβλημάτων της

συγκεκριμένης αίθουσας, όσο στην ανάδειξη της έλλειψης συγκεκριμένου πλαισίου κατά την ανέγερση σχολικών συγκροτημάτων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα η πλεοψηφία των ελληνικών σχολικών αιθουσών να παρουσιάζει χαμηλά επίπεδα ακουστικής ποιότητας.

4. Βιβλιογραφία

[1] D. Davis and E. Patronis, *Sound System Engineering*, 3η Έκδοση, Focal Press, Amsterdam 2007

[2] M. Long, *Architectural Acoustics*, 1η Έκδοση, Elsevier Academic Press, UK 2006

[3] Δ. Ευθυμιάτος, *Ακουστική και κτιριακές εφαρμογές*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007

[4] F. A. Everest and K. C. Polhman, *Master handbook of acoustics*, 5η Έκδοση, The McGraw-Hill companies, USA 2009

[5] Building Bulletin 93, Υπουργείο παιδείας Ηνωμένου Βασιλείου.

Συνδυαστική Διερεύνηση Παραμέτρων Αξιολόγησης Οπτικών και Ακουστικών Ανέσεων σε Σχολικά Κτίρια της Ξάνθης: Φυσικός Φωτισμός – Σκιασμός, Ηχοπροστασία – Αντήχηση

Ελ. Αθανασιάδου elinatha@hotmail.gr, Μ. Μπούση evelin_ni@hotmail.com,
Ξ. Πάστερνακ xeniapast@yahoo.gr, Ν. Μπάρκας nbarkas@arch.duth.gr
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας προπτυχιακής έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε Γυμνάσια της Ξάνθης, κατά το 2011. Αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης και μακρόχρονης πανεπιστημιακής έρευνας που πραγματοποιείται σε κτίρια της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης σε διάφορες περιφερειακές πόλεις, με στόχο τη συνδυαστική αξιολόγηση των οπτικών και ακουστικών ανέσεων, με παραμέτρους τον ηλιασμό, την ηλιοπροστασία, την ηχοπροστασία και την ακουστική ποιότητα των αιθουσών διδασκαλίας.

Η παρούσα έρευνα αφορά ένα δείγμα εννέα (9) κτιρίων Γυμνασίων της περιφέρειας Ξάνθης και περιλαμβάνει συλλογή στοιχείων, μετρήσεις, καταγραφές δεδομένων, υπολογισμούς και ανάλυση ευρημάτων σε πίνακες και διαγράμματα.

Combined Investigation of Evaluation Parameters Concerning Visual and Acoustic Comfort in School Buildings of Xanthi: Natural Light – Sun Protection, Sound Protection - Reverberance

ABSTRACT

The communication is part of an undergraduate university research project conducted in the city of Xanthi during the year 2011. It is part of a wider and on-going research project that is conducted in primary and secondary school buildings in various Greek cities aiming to examine the combination of acoustic and visual comfort, with parameters such as natural lighting, sun protection, sound protection and acoustics in school classes.

The current research is based on a sample of nine (9) secondary school buildings in the region of Xanthi and contains data collection, measurements, data recording, computations and data analysis in tables and diagrams.

Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αξιολογήσει εννέα (9) κτίρια Γυμνασίων (από τα συνολικά δεκατρία) στην πόλη και στην περιφέρεια της Ξάνθης με παραμέτρους την οπτική και ακουστική άνεση των αιθουσών διδασκαλίας.

Η επιτόπια έρευνα περιελάμβανε συλλογή στοιχείων, παρατηρήσεις καθώς και φωτιστικές - ηχητικές μετρήσεις, που καταγράφηκαν σε πίνακες και παρουσιάζονται συνοπτικά σε διαγράμματα. Κατά τη διάρκεια της έρευνας εντοπίστηκαν σοβαρές ελλείψεις στην ηχοπροστασία των κτιρίων, υψηλή αντήχηση εντός των αιθουσών, ενώ παράλληλα διαπιστώθηκαν ακατάλληλες συνθήκες φωτισμού και σκιασμού.

Οι σύγχρονες παιδαγωγικές μέθοδοι ενθαρρύνουν την ομαδική συμμετοχή, το διάλογο και τις συνεργατικές δραστηριότητες, διαδικασίες που αυξάνουν τους λειτουργικούς θορύβους στο εσωτερικό των τάξεων. Στην ίδια κατεύθυνση, προτιμώνται οι κυκλικές ή ασύμμετρες διατάξεις, κατάσταση που μεταβάλλει την τυπική σχέση πηγής - δέκτη, όπως αυτή υλοποιείται στις κλασικές, μετωπικές και μονο-αξονικές διατάξεις θρανίων / έδρας και πίνακα. [1], [2]

Η αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας, σε πρώτο επίπεδο, συνδέεται με την ένταση της φωνής του διδάσκοντα με τη στάθμη εσωτερικής ησυχίας (δηλαδή την ανάδυση του ωφέλιμου σήματος). Ωστόσο, σε ένα δεύτερο επίπεδο προσέγγισης, η καταληπτότητα εξαρτάται από την ακουστική ποιότητα του χώρου, που σε αίθουσες μικρού μεγέθους, σχετίζεται άμεσα με την αντήχηση. [3]

Αντίθετα, η χαμηλή ηχομονωτική ικανότητα των κτιρίων υποβιβάζει καταλυτικά την ακουστική άνεση των μαθητών, ιδίως στις περιπτώσεις που το σχολείο γειτνιάζει με θορυβώδεις πηγές όχλησης. Επιπρόσθετα, οι ηχοανακλαστικές (αντί για ηχοαπορροφητικές) επενδύσεις στο εσωτερικό των αιθουσών (για λόγους ασφάλειας ή οικονομίας) αυξάνουν τους λειτουργικούς θορύβους και υποβαθμίζουν την καταληπτότητα. [4], [5]

1. Παράμετροι βιοκλιματικού και ακουστικού σχεδιασμού

Σχετικά με το σχεδιασμό και την κατασκευή των νέων σχολικών κτιρίων, το θεσμικό πλαίσιο προδιαγραφών, προσδιορίζεται από τις Οδηγίες του Οργανισμού Σχολικών Κτιρίων [6] και τις προδιαγραφές του Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12) :

- χωροθέτηση των αιθουσών σε νότιο (ή κατά περίπτωση βόρειο) προσανατολισμό, μακριά από πηγές θορυβικής όχλησης,
- ηχοπροστασία του κελύφους και ηχομονωτική ικανότητα των εσωτερικών διαχωριστικών πετασμάτων για εξασφάλιση ενός διακεκριμένου ορίου εσωτερικής ησυχίας (30 ως 35 dB για υψηλή / κανονική ακουστική άνεση αντίστοιχα),
- ηχο-απορροφητικές εσωτερικές επενδύσεις για την ανάδειξη του λόγου (θεωρία Sabine),
- κατάλληλες στάθμες φωτισμού (300-400 lux) στο επίπεδο εργασίας (διαμπερής φωτισμός με φεγγίτες) και αποτροπή της θάμβωσης,
- διακριτοί τρόποι σκιασμού, ανάλογα με τον προσανατολισμό των αιθουσών (κατακόρυφα ή οριζόντια σκίαστρα / ράφια φωτισμού κλπ). [3], [4], [7], [8].

2. Η μεθοδολογία της έρευνας

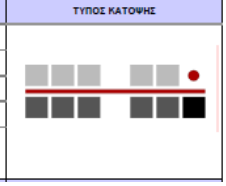
Η επιλογή του δείγματος της έρευνας πραγματοποιήθηκε με κριτήρια:
-τη διασπορά των σχολικών μονάδων στον αστικό ιστό,
-τον προσανατολισμό και την τυπολογία των κτιρίων,
-το έτος κατασκευής (σε σχέση με την εκπόνηση και εφαρμογή των κανονισμών).

Σε κάθε σχολικό κτίριο επιλέχθηκε μια αντιπροσωπευτική αίθουσα με νότιο, κυρίως, προσανατολισμό. Οι ηχητικές και φωτιστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το Μάιο του 2011, χωρίς την παρουσία μαθητών, κατά τη διάρκεια των πρωινών ή μεσημβρινών ωρών (ανάλογα με τον ακριβή προσανατολισμό κάθε αίθουσας).

Η διαδικασία της έρευνας περιελάμβανε:
-φωτογραφική και σχεδιαστική αποτύπωση των αιθουσών του δείγματος,
-καταγραφή και αξιολόγηση των εσωτερικών επενδύσεων και του εξοπλισμού κάθε αίθουσας,
-στάθμιση των εξωτερικών επιπέδων θορύβου και φυσικού φωτισμού στο προαύλιο κάθε σχολικής μονάδας του δείγματος,
-μετρήσεις της στάθμης θορύβου και φυσικού φωτισμού σε κάθε αίθουσα (με ή χωρίς τη χρήση εσωτερικών σκιάστρων),
-υπολογισμό των επιπέδων φυσικού φωτισμού (σε lux), θάμβωσης (σε DLF %, Daily Light Factor), εσωτερικής ησυχίας (Leq σε dB[A]) και χρόνου αντήχησης (συχνοτική διακύμανση και σφαιρική τιμή σε sec),
-αξιολόγηση των κατά περίπτωση φωτιστικών και ακουστικών δεδομένων κάθε αίθουσας του δείγματος για αίθουσες διδασκαλίας σε λειτουργία λόγου.

3. Τα δεδομένα της έρευνας

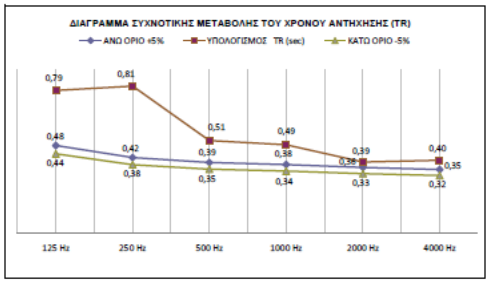
Ενδεικτικά παρατίθεται η καρτέλα καταγραφής των παρατηρήσεων και μετρήσεων με μία αίθουσα από τα σχολικά κτίρια του δείγματος :

<table>
<tr><td>ΣΧΟΛΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ</td><td>"Άριον" Ιδιωτ. Γυμνάσιο</td><td colspan="4">ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ & ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΤΙΡΙΟΥ</td><td>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ</td></tr>
<tr><td>ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</td><td>9ο χιλ. Ε.Ο. Ξάνθης - Αβδήρων</td><td colspan="4" rowspan="4">Ιδιωτικό σχολικό συγκρότημα που περιλαμβάνει νηπιαγωγείο, δημοτικό, γυμνάσιο και λύκειο. Βρίσκεται εκτός πόλης, πάνω στην επαρχιακή οδό Ξάνθης - Αβδήρων. Τα κτίρια είναι οργανωμένα σε επιμέρους κτιριακές μονάδες, γύρω απο μια κεντρική αυλή, με σημειακές συνδέσεις μεταξύ τους, νότιο προσανατολισμό αιθουσών και ξεχωριστές αυλές εκτόνωσης. Ο κτιριακός όγκος του γυμνασίου περιλαμβάνει έξι αίθουσες νότια ενός γραμμικού διαδρόμου, ενώ βόρεια βρίσκονται οι βοηθητικοί χώροι.</td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td>ΣΥΝΟΙΚΙΑ</td><td>Γενισέα</td></tr>
<tr><td>ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ</td><td>2007</td></tr>
<tr><td>ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</td><td>ημερήσιο</td></tr>
<tr><td colspan="6">ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</td><td>ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ</td></tr>
<tr><td>ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ</td><td>νότιος</td><td>ΑΠΟΚΛΙΣΗ</td><td>0°</td><td>ΤΥΠΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ</td><td>συνεχόμενα</td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td>ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ (ΑΥΛΗ) (lux)</td><td>6000</td><td>ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ</td><td>5,90 x 6,80</td><td>ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΔΙΑΦΑΝΩΝ / ΣΥΜΠΑΓΩΝ</td><td>1 : 1</td></tr>
<tr><td>ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΟΣ ΣΚΙΑΣΜΟΣ</td><td>δεν υπάρχει</td><td>ΥΨΟΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ (m)</td><td>3,00</td><td>ΦΕΓΓΙΤΕΣ</td><td>δεν υπάρχουν</td></tr>
<tr><td>ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΣΚΙΑΣΤΡΑ</td><td colspan="5">αρχιτεκτονικές προεξοχές (μάσκα από οπλισμένο σκυρόδεμα)</td></tr>
<tr><td>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ (lux)</td><td>A : 1400</td><td>B : 1800</td><td>Γ : 283</td><td>Δ : 200</td><td>E : 720</td></tr>
<tr><td>ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΙΑΣΤΡΑ</td><td colspan="5">κουρτίνες ρολό με χειροκίνητο μηχανισμό</td></tr>
<tr><td>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΙΑΣΤΡΑ (lux)</td><td>A : 180</td><td>B : 320</td><td>Γ : 69</td><td>Δ : 42</td><td>E : 140</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΗΧΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</td><td colspan="4">ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΙ</td><td>ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΟΨΗΣ</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ΠΗΓΕΣ ΟΧΛΗΣΗΣ</td><td rowspan="2">επαρχιακή οδός θόρυβοι φύσης</td><td>ΔΑΠΕΔΟ</td><td colspan="2">βιομηχανικό δάπεδο μπλέ χρώματος</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>ΟΡΟΦΗ</td><td colspan="2">ηχοαπορροφητική ψευδοροφή</td></tr>
<tr><td>ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΗΧΟΣΤΑΘΜΗ [dB(A)]</td><td>55</td><td>ΠΛΕΥΡΙΚΟΙ ΤΟΙΧΟΙ</td><td colspan="2">σοβάς σε διάφορες αποχρώσεις (πορτοκαλί, άσπρο)</td></tr>
<tr><td>ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΗΧΟΣΤΑΘΜΗ [dB(A)]</td><td>48</td><td>ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ</td><td colspan="2">διπλοί υαλοπίνακες, λευκά κουφώματα αλουμινίου</td></tr>
<tr><td>ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΣΤΑ 250Hz (sec, κατά Sabine)</td><td>0,81</td><td rowspan="2">ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ</td><td colspan="2" rowspan="2">πίνακας με λευκή στιλπνή επιφάνεια, θρανία ξύλινα
ημιδιάφανες κουρτίνες ρολό σε καφέ-κόκκινη απόχρωση</td></tr>
<tr><td>ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΣΤΑ 500Hz (sec, κατά Sabine)</td><td>0,51</td></tr>
</table>

ΑΞΙΟΝ Ιδ. ΓΥΜΝΑΣΙΟ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΗΧΗΣΗΣ ΣΧΟΛΙΚΗΣ ΑΙΘΟΥΣΑΣ			
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ				
διαστάσεις αίθουσας	5,90 * 6,80 * 3,00	όγκος αίθουσας (m^3) χωρίς τον όγκο εξέδρας		120
διαστάσεις εξέδρας	-			
ΔΑΠΕΔΟ	**περιγραφή**	**πλήθος**	**διαστάσεις m**	**m^2**
καθίσματα	πλαστικά καθίσματα (50%)	12	0,40 * 0,40	2
χρήστες	μαθητές σε ξύλινα καθίσματα (50%)	12	0,40 * 0,90	4
έπιπλα	ξύλινα θρανία	12	1,20 * 0,40	6
έδρα του καθηγητή	ξύλινη	1	0,90 * 0,55	0
υπόλοιπο δάπεδο	linoleum	-	6,90 * 6,80 - άνωθεν	34
ΟΡΟΦΗ				
πλακίδια οροφής	πλακίδια ορυκτών ινών	-	6,90 * 6,80	47
ΜΠΡΟΣΤΑ ΤΟΙΧΟΣ				
πίνακας	plaster	2	2,50 * 1,20 1,20 * 1,20	4
πίνακας	ξύλο κολλητό	1	1,20 * 1,20	1
επίχρισμα	πλινθοδομή με σοβά	-	6,80 * 3,00 - άνωθεν	16
ΠΙΣΩ ΤΟΙΧΟΣ				
επίχρισμα	πλινθοδομή με σοβά	-	6,80 * 3,00	20
ΠΛΑΓΙΟΙ ΤΟΙΧΟΙ				
κουρτίνες	μεσαίου βάρους, με πτυχές 1:1,5	4	1,60 * 0,60	4
παράθυρα	με διπλούς υαλοπίνακες	4	1,60 * 1,80 - κουρτίνες	8
φεγγίτης	με διπλούς υαλοπίνακες	1	1,10 * 0,60	1
πόρτα	ξύλινη	1	2,15 * 1,10	2
έπιπλα	ξύλινη βιβλιοθήκη	1	3,35 * 1,70	6
επίχρισμα	πλινθοδομή με σοβά	2	6,90 * 3,00 - άνωθεν	21
			ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΜΒΑΔΟΝ	**176**

Ομαδοποίηση επιμέρους επιφανειών με ενιαία επένδυση		*Υπολογισμός χρόνου αντήχησης με βάση τον συντελεστή ηχοαπορρόφησης υλικών (α)*					
περιγραφή	**m^2**	**125 Hz**	**250 Hz**	**500 Hz**	**1000 Hz**	**2000 Hz**	**4000 Hz**
μαθητές σε ξύλινα καθίσματα	4	0,37	0,44	0,67	0,70	0,80	0,72
L.L.Doelle		1,60	1,90	2,89	3,02	3,46	3,11
ξύλινα θρανία, καθίσματα, βιβλιοθήκες	13	0,15	0,19	0,22	0,39	0,38	0,30
Αθανασόπουλος Νο 60		2,01	2,54	2,94	5,22	5,08	4,01
έπιπλα - έδρα ξύλινη	0	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,07
L.L.Doelle		0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
plaster	4	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
L.L.Doelle		0,53	0,40	0,31	0,22	0,22	0,18

πίνακας από ξύλο κολλητό	1	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Αθανασόπουλος Νο 36		0,40	0,32	0,24	0,13	0,14	0,16
δάπεδο από linoleum	34	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Αθανασόπουλος Νο 26		0,69	1,03	1,03	1,03	1,03	0,69
πλακίδια ορυκτών ινών	47	0,20	0,20	0,50	0,50	0,70	0,70
L.L.Doelle		9,38	9,38	23,46	23,46	32,84	32,84
επίχρισμα από σοβά	68	0,12	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04
Αθανασόπουλος Νο 13		6,73	5,05	3,93	2,80	2,80	2,24
παράθυρα με διπλούς υαλοπίνακες	8	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Αθανασόπουλος Νο 8		2,92	2,09	1,50	1,00	0,58	0,33
κουρτίνα μεσαίου βάρους, με πτυχές 1:1,5	4	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Αθανασόπουλος Νο 20		0,27	1,19	1,88	2,88	2,69	2,30
πόρτα ξύλινη	2	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Αθανασόπουλος Νο 30		0,35	0,26	0,24	0,17	0,14	0,17
ατμόσφαιρα	1	0,00	0,00	0,00	0,30	0,90	2,40
		0,00	0,00	0,00	0,36	1,08	2,89
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΜΒΑΔΟΝ	**176**						
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ Σ(α)		**24,86**	**24,23**	**38,49**	**40,35**	**60,13**	**48,98**
ΟΓΚΟΣ (m^3)		120					
Ideal TR=0,076*V^1/3		**0,37**					
άνω όριο +5%		0,48	0,42	0,39	0,38	0,36	0,35
υπολογισμός κατά τον τύπο SABINE TR (sec)= V*0,163/Σ(α)		**0,79**	**0,81**	**0,61**	**0,48**	**0,38**	**0,40**
κάτω όριο -5%		0,44	0,38	0,35	0,34	0,33	0,32



Σχήμα 3.1 Ενδεικτική καρτέλα υπολογισμού αντήχησης σχολικής αίθουσας.

Για την οικονομία της ανακοίνωσης, η ανάλυση των δεδομένων επικεντρώνεται σε δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις σχολείων του δείγματος.

Το Ιδιωτικό Γυμνάσιο Άξιον, χάρη στη απομονωμένη θέση του, αλλά και την επιμελημένη επιλογή των εσωτερικών επενδύσεων, διαθέτει τις καλύτερες ακουστικές συνθήκες, συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχολεία,. Η παθητική ηχοπροστασία του κτιριακού συγκροτήματος εξασφαλίζει χαμηλές τιμές ηχητικής όχλησης στους υπαίθριους και κλειστούς χώρους. Ωστόσο, η μονάδα υστερεί σημαντικά στην ηχομόνωση των αιθουσών, εξαιτίας κακοτεχνιών στα κουφώματα.

Οι αίθουσες με νότιο προσανατολισμό προσφέρουν επαρκή σκιασμό, ενώ οι κατά περίπτωση υψηλές φωτιστικές στάθμες αντιμετωπίζονται με τη ρύθμιση των εσωτερικών σκιάστρων, τα οποία ωστόσο δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν πλήρως αποτελεσματικά το ενοχλητικό φαινόμενο της θάμβωσης.

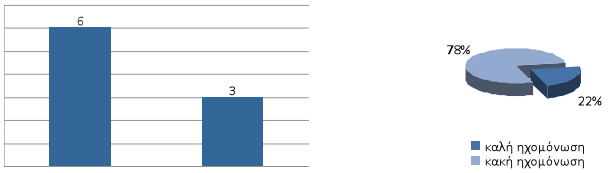
Το Μουσικό Γυμνάσιο – Λύκειο Ξάνθης στεγάζεται προσωρινά σε κτίριο εμφανώς ακατάλληλο για τη συγκεκριμένη λειτουργία. Χρήζει μιας ολοκληρωμένης ακουστικής μελέτης και αντίστοιχων ριζικών οικοδομικών βελτιώσεων. Χαρακτηρίζεται από ακατάλληλη χωροθέτηση (περιβάλλον με έντονη ηχητική όχληση), από μειωμένη ηχοπροστασία (παρά την εφαρμογή εξωτερικών κουφωμάτων με διπλούς υαλοπίνακες) εξαιτίας της έλλειψης αντικραδασμικών διατάξεων και από ανεπαρκή ηχομονωτική ικανότητα στα πρόσθετα διαχωριστικά μεταξύ των αιθουσών.

Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός εκτεταμένων υαλοπινάκων και η έλλειψη ηχοαπορροφητικών επενδύσεων δεν μπορούν να εξασφαλίσουν ανεκτές ακουστικές συνθήκες στο εσωτερικό των αιθουσών. Σε συνθήκες θάμβωσης, λόγω του ανατολικού προσανατολισμού των αιθουσών και την αναποτελεσματική σκίασή τους, καθίσταται αναγκαστική η χρήση τεχνητού φωτισμού. Συνολικά, οι ακατάλληλες αναλογίες της αίθουσας του δείγματος και η μη λειτουργική εσωτερική διάταξή της δυσχεραίνουν τις συνθήκες οπτικής και ακουστικής άνεσης των μαθητών.

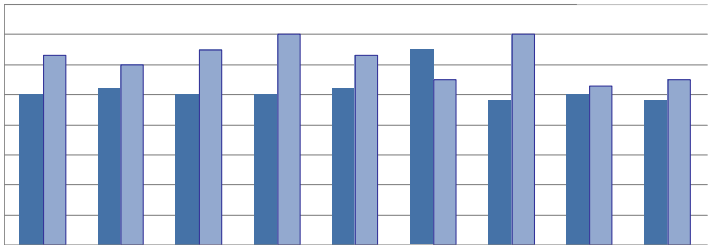
4. Συγκριτικά δεδομένα

4.1 Ηχοπροστασία

Όσον αφορά την ηχοπροστασία, ο θόρυβος του περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα αυξημένος στο 67% των σχολείων του δείγματος [Σχήμα 4.1], ενώ μόλις σε ποσοστό 22% εντοπίστηκε επαρκής ηχομόνωση, με αξιόλογες διαφορές εξωτερικής - εσωτερικής ηχοστάθμης (> 20 dB)



Σχήμα 4.1 (αριστερά) Θόρυβος περιβάλλοντος
Σχήμα 4.2 (δεξιά) Ηχομονωτική ικανότητα αιθουσών

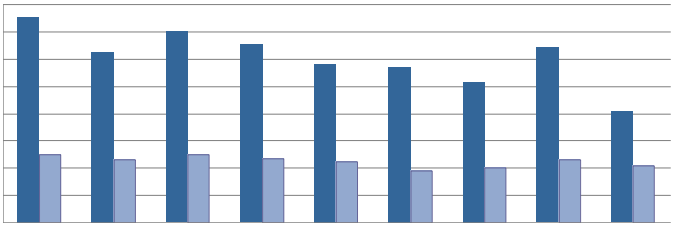


Σχήμα 4.3 Εσωτερικές και εξωτερικές ηχοστάθμες

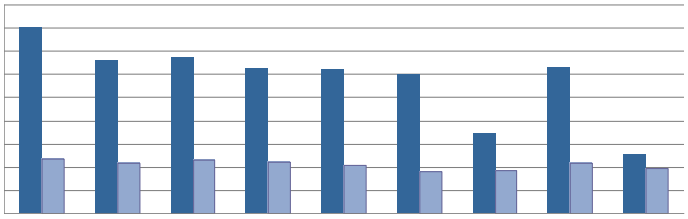
Συνοπτικά, στο σύνολο του δείγματος η εσωτερική ηχοστάθμη ξεπερνάει το όριο της ακουστικής άνεσης του Κτιριοδομικού Κανονισμού για τα εκπαιδευτήρια, ακόμη και στις περιπτώσεις που το κτίριο βρίσκεται σε ήσυχη περιοχή [Σχήμα 4.3].

4.2 Ακουστική διόρθωση

Η ακουστική των αιθουσών κρίνεται ως προβληματική στο σύνολο του δείγματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι υπολογισμένοι χρόνοι αντήχησης (κατά Sabine) εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις από την ιδανική καμπύλη στόχου, εξαιτίας των υλικών επένδυσης και του σχήματος των αιθουσών [Σχήματα 4.4 και 4.5].



Σχήμα 4.4 Χρόνος αντήχησης αίθουσας στα 250Hz



Σχήμα 4.5 Χρόνος αντήχησης αίθουσας στα 500Hz

Χαρακτηριστικό είναι πως οι καλύτερες συχνοτικές προσεγγίσεις εντοπίζονται σε επιλεγμένες αίθουσες του Μουσικού Σχολείου (ποσοστό υπέρβασης 158% στα 250 Hz και 86% στα 500 Hz) και του Ιδιωτικού Γυμνασίου (ποσοστό υπέρβασης 93% στα 250 Hz και 31% στα 500 Hz).

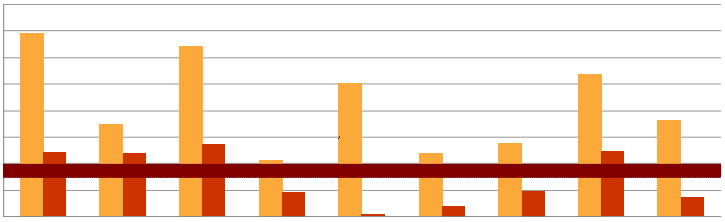
Συνοπτικά, όπως διαπιστώθηκε στο σύνολο του δείγματος, οι σφαιρικές τιμές του χρόνου αντήχησης είναι εξαιρετικά μεγάλες για χώρους ομιλίας (εξαιτίας κυρίως των αποκλίσεων στις χαμηλές / μέσες συχνότητες). Εντούτοις, όπως διαπιστώθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου εκπαιδευτικού λογισμικού,, σε όλες τις περιπτώσεις θα ήταν εφικτό να προσεγγιστούν τα επιβεβλημένα συχνοτικά όρια της

αντήχησης, αντικαθιστώντας με ηχοαπορροφητικά υλικά τις εσωτερικές επενδύσεις, κυρίως στην οροφή και στον πίσω τοίχο των αιθουσών.

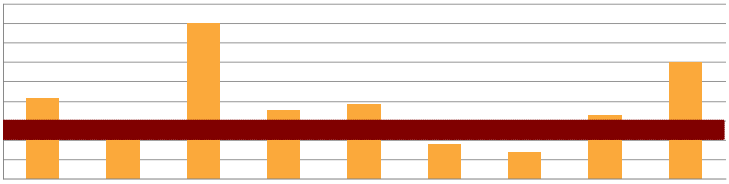
4.3 Φυσικός φωτισμός - σκιασμός

Η πλειοψηφία των κτιρίων του δείγματος (88%) ανήκει στην κατασκευαστική περίοδο μετά το 1970. Χαρακτηριστικό είναι πως μόνο τρεις (3) από τις εννέα (9) αίθουσες του δείγματος έχουν νότιο (κυρίως) προσανατολισμό (όσον αφορά τον τρόπο ηλιασμού) και μόνο δύο (2) διαθέτουν επαρκή σκιασμό, χάρη σε αρχιτεκτονικές προεξοχές.

Όσον αφορά την ένταση του φυσικού φωτισμού (τιμές μέτρησης σε lux στο κέντρο κάθε αίθουσας την ώρα των μετρήσεων) διαπιστώθηκε ότι ποσοστό 88% του δείγματος υπερβαίνει τα επιβεβλημένα όρια [Σχήμα 4.6]. Επιπρόσθετα, οι υπολογισμένες τιμές του συντελεστή DLF (λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ένταση φωτός, %), ο οποίος χαρακτηρίζει την ποιότητα ενός φωτιζόμενου χώρου, εμφανίζουν σημαντικές υπερβάσεις των επιβεβλημένων ορίων (4 έως 6%), στην πλειονότητα των αιθουσών του δείγματος (Σχήμα 4.7)



Σχήμα 4.6 Ένταση φωτισμού (σε lux)



Σχήμα 4.7 Συντελεστής Φυσικού Φωτισμού (DLF) χωρίς εσωτερικά σκίαστρα

5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, τις μετρήσεις και τα υπολογιστικά δεδομένα της έρευνας, σχεδόν στο σύνολο των σχολείων του δείγματος διαπιστώθηκαν:

- υψηλές τιμές θορύβου (υπερβάσεις κατά 13 ως 30dB, στο ελάχιστο όριο ησυχίας 35dB στο εσωτερικό των αιθουσών) και χαμηλοί δείκτες ηχομονωτικής ικανότητας (απομειώσεις 3 ως 22dB μεταξύ εξωτερικής και εσωτερικής ηχοστάθμης) στο κέλυφος και στα εσωτερικά διαχωριστικά (μεγάλη αναλογία ανοιγμάτων, έλλειψη αερο-στεγάνωσης των κουφωμάτων, ασθενείς οικοδομικές διατομές των συμπαγών στοιχείων),
- παντελής έλλειψη ακουστικής διόρθωσης στις αίθουσες διδασκαλίας (υψηλές σφαιρικές τιμές αντήχησης, υπερ-αντήχηση στις χαμηλές και μέσες συχνότητες),
- υψηλές τιμές φωτεινής έντασης (εξαιτίας κυρίως της μεγάλης αναλογίας των ανοιγμάτων και της απουσίας σταθερών συστημάτων σκιασμού στις προσόψεις),
- ανομοιόμορφη κατανομή του φυσικού φωτισμού (προβλήματα θάμβωσης εξαιτίας του μονόπλευρου προσανατολισμού των ανοιγμάτων).

Όπως αποδεικνύεται κατά την επεξεργασία των δεδομένων της έρευνας, σοβαρά κενά εντοπίζονται στις οδηγίες σχεδιασμού των σχολικών μονάδων, αλλά και πλήρης έλλειψη ακουστικών προδιαγραφών διαπιστώνεται στην κατασκευή των σχολικών κτιρίων.

Τέλος, όσον αφορά τις επιμέρους παραμέτρους της έρευνας, η ακουστική διόρθωση αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο πρόβλημα των αιθουσών (μολονότι είναι το ευκολότερο στην αντιμετώπιση του, έστω και εκ των υστέρων), καθώς οι εσωτερικές επενδύσεις φαίνεται πως επιλέγονται με ποικίλα κριτήρια (αντοχή στη φθορά, οικονομία, αισθητική), τα οποία παραγνωρίζουν την κρισιμότητα της αντήχησης στην μαθησιακή συγκέντρωση και την καταληπτότητα της ομιλίας κατά την εκπαιδευτική διαδικασία.

6. Αναφορές

[1] Dudek, M, *Schools and Kindergartens: A Design Manual,* Birkhäuser Architecture, Boston (2007)

[2] school-noise-control.com/reverberation.html

[3] Μπάρκας, Ν. *Ειδικά Κεφάλαια Φυσικής,* Ε. Α. Δ. Π ΔΠΘ, Ξάνθη (2005)

[4] Αθανασόπουλος, Χρ. *Προστασία Κτιρίων: Θερμομόνωση, Ηχομόνωση, Ηχοπροστασία,* Αθήνα (1991)

[5] Τσινίκας, Ν. *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων* University Studio Press, Θεσσαλονίκη (2005).

[6] Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων *Οδηγίες Βιοκλιματικού Σχεδιασμού Σχολικών Κτιρίων,* Αθήνα (2008)

[7] Ανδρεαδάκη – Χρονάκη, Ελένη *Βιοκλιματικός Σχεδιασμός: Περιβάλλον και Βιωσιμότητα.* University Studio Press, Θεσσαλονίκη (2006)

[8] Ευρωπαϊκή Επιτροπή *Ενέργεια στην Αρχιτεκτονική* (μετάφραση, επιμέλεια : Ε. Τσίγκας), Μάλλιαρης Παιδεία, Θεσσαλονίκη (1996)

Ακουστική Μελέτη Σχολικών Αιθουσών Μέσης Εκπαίδευσης

Κωνσταντίνος Μπακογιάννης
υπ. Διδ. Φοιτητής ΕΜΠ / εργαστήριο Ακουστικής, Επικοινωνιών και ΜΜΕ, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ
kostas_bako@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ακουστική συμπεριφορά των σχολικών αιθουσών επιδρά στις μαθησιακές επιδόσεις, στην κοινωνικοποίηση και στην ψυχική υγεία μαθητών και καθηγητών. Παρά τη σπουδαιότητα του αντικειμένου αυτού η μελέτη του στη χώρα μας είναι αρκετά φτωχή, ενώ δεν υπάρχει σαφές νομοθετικό πλαίσιο να την ορίζει.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς ενός μικρού δείγματος σχολικών αιθουσών Μέσης Εκπαίδευσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Η μελέτη συνίσταται στην αξιολόγησή τους μέσω ακουστικών μετρήσεων και της προσομοίωσής τους σε Η.Υ., καθώς και στην παρουσίαση προτάσεων για την βελτίωσή τους.

Λόγω του μικρού μεγέθους και της ανομοιογένειας του δείγματος είναι επισφαλές να καταλήξουμε σε γενικά συμπεράσματα. Αυτό που εν πολλοίς διαπιστώθηκε είναι ότι όσον αφορά τη στάθημα ακουστικής πίεσης, αυτή κειμένεται σε ικανοποιητικά επίπεδα, εξασφαλίζοντας καλό σηματοθορυβικό λόγο. Επίσης, ουσιαστικά προβλήματα ηχομόνωσης δεν παρουσιάστηκαν. Παρολ' αυτά, παρατηρήθηκαν υψηλοί χρόνοι αντήχησης οι οποίοι επηρεάζουν αρνητικά την αντιληπτότητα.

Acoustic Study Of Classrooms in Secondary Education

ABSTRACT

The acoustic behavior of classrooms affects the learning procedure, the socialization and the psychic health of both students and teachers. Despite its significance, that parameter has not been studied properly. Moreover, the relevant legislation is inadequate.

In this paper, the acoustic behavior of a small sample of classrooms in secondary education is studied. The study consists of the evaluation of these classrooms, using the results of acoustic measurements and simulation in PC. Furthermore, suggestions in order to improve their behavior are made.

Due to the small sample and its lack of homogeneity, it is wrong to come to general conclusions. It can generally be deduced that as far as the sound level pressure is concerned, it ranges in satisfactory values, guaranteeing sufficient sound to noise ratio. Moreover, no significant problems of soundproofing were noticed.

Despite these, the reverberation time of most classrooms was above desirable levels, affecting negatively the intelligibility.

Εισαγωγή

Κάθε κοινωνία που έχει όραμα για το μέλλον και έχει στόχο να προοδεύσει και να εξελιχθεί οφείλει να δώσει βάρος στην εκπαίδευση των νέων. Μέχρι τώρα, το ενδιαφέρον εστιάζεται δυστυχώς κυρίως στο περιεχόμενο των γνώσεων και δευτερευόντως στις συνθήκες διάδοσης τους. Μία από τις βασικότερες συνθήκες είναι η ακουστική.

Η ακουστική συμπεριφορά ενός χώρου είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, τόσο από αντικειμενικά μεγέθη που φωτογραφίζουν τον χώρο, τον τρόπο διάδοσης του ήχου σε αυτόν, τις πηγές και τους δέκτες, όσο και από υποκειμενικά, όπως η λειτουργικότητα του χώρου ή οι ιδιαιτερότητες πηγής και δέκτη. Μια σειρά από παραμέτρους έχουν προταθεί για τη μαθηματικοποίηση της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκαν οι ακόλουθες: 1) Στάθμη Ακουστικής Πίεσης (SPL) 2) Ισοδύναμη Συνεχής Ηχοστάθμη (L_{eq}), 3) Θόρυβος Βάθους (L90), 4) Σηματοθορυβικός Λόγος (SNR), 5) Χρόνος αντήχησης (RT60), 6) Αντιληπτότητα Ομιλίας (STI), 7) Φασματική Ανάλυση (1/3 οκτάβας). Σε όσα μεγέθη χρησιμοποιείται η Α – σταθμισμένη ηχοστάθμη θα σημειώνεται δίπλα στη μονάδα μέτρησης το χαρακτηριστικό (Α).

1. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στη μελέτη αυτή επιλέξαμε δώδεκα αίθουσες που αποτελούν ένα αρκετά μικρό αλλά όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικό δείγμα αιθουσών στα σχολεία της Αθήνας. Οι αίθουσες αυτές αναπαραστάθηκαν σε πρόγραμμα ακουστικής προσομοίωσης (Odeon) ενώ πραγματοποιήθηκαν μια σειρά μετρήσεων με κατάλληλα ηχόμετρα. Παράλληλα, ηχογραφήθηκαν ηχητικά δεδομένα στο περιβάλλον των αιθουσών αυτών τα οποία επεξεργάστηκαν με το Matlab. Μέσω της συγκομιδής, επεξεργασίας και ανάλυσης των παραπάνω δεδομένων αξιολογήθηκε η ακουστική συμπεριφορά των αιθουσών και οδηγηθήκαμε σε γενικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Οι μετρήσεις και οι ηχογραφήσεις ήταν διάρκειας 10 λεπτών και διεξήχθησαν σε όλες τις πιθανές δραστηριότητες της σχολικής ζωής –μάθημα, διαγώνισμα, διάλειμμα, εντός και εκτός της αίθουσας- καθώς μετρήθηκε, όπου κρίθηκε απαραίτητο, ο θόρυβος από το γειτνιάζων περιβάλλον –προαύλιο, δρόμοι κ.λ.π.

Όσον αφορά την προσομοίωση, η γεωμετρία της κάθε αίθουσας σχεδιάστηκε με αρκετή ακρίβεια. Τα υλικά επιλέχτηκαν κατά προσέγγιση από τη λίστα υλικών του λογισμικού και ενδεχομένως να παρατηρούνται αστοχίες συγκριτικά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά και την πραγματικότητα.

Οι τιμές των μεγεθών «Ισοδύναμη Συνεχής Ηχοστάθμη (L_{eq})», «Θόρυβος Βάθους (L90)», «Χρόνος αντήχησης (RT60)» καθώς και η «Φασματική Ανάλυση (1/3 οκτάβας)» προκύπτουν αυτόματα από το ηχόμετρο και από την επεξεργασία μέσω Matlab. Η «Στάθμη Ακουστικής Πίεσης (SPL)» σε συνάρτηση με το χρόνο προέκυψε από την επεξεργασία μέσω Matlab. Για την εξαγωγή του Σηματοθορυβικού Λόγου (SNR) ως θόρυβος ελήφθη ο «Θόρυβος Βάθος (L90)»,

ενώ το επιθυμητό σήμα (ομιλία καθηγητή) υπολογίστηκε από τα ηχογραφημένα τμήματα στα οποία παρατηρήθηκε ότι μιλάει μόνο ο καθηγητής, ενώ συνυπολογίστηκαν τυποιποιημένες τιμές για αντρικές και γυναικείες φωνές οι οποίες ομιλούν είτε με ένταση είτε κανονικά. Η «Αντιληπτότητα Ομιλίας (STI)» προέκυψε από την προσομοίωση στο Odeon.

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πίνακας 2.Α. Παρουσίαση αποτελεσμάτων των μετρήσεων

αίθουσες	9ο & Αθλητικό Γυμν. Περιστερίου			Α' Ενίαιο Λύκειο Αρσακείου Ψυχικού		
	Ξ.Γ.	Α5	Γ2	Ββ	Βγ	Γ7
SPL εν ώρα μαθήματος, dB(A)	69,7	74,8	70,3	67,0	61,9	69,9
όγκος αίθουσας (κυβικά μέτρα)	75,5	152,5	182,0	179,0	187,0	154,5
RT μετρούμενος (sec)	1,01	1,55	2,03	1,28	1,27	1,13
RT από προσομείωση (Odeon) (sec)	2,51	2,66	2,91	1,86	1,96	1,84
Διαφορά RT προσομείωσης - μέτρησης (sec)	1,50	1,11	0,88	0,58	0,69	0,71
STI	0,49	0,46	0,46	0,5	0,51	0,51
L90 (noise), dB(A)	50,4	56,4	48,9	48,4	45,4	39,3
SOUND, dB(A)	66,23	70,52	65,44	62,56	58,98	58,46
SNR	15,80	14,14	16,51	14,19	13,63	19,14

Πίνακας 2.Β. Παρουσίαση αποτελεσμάτων των μετρήσεων

αίθουσες	ΕΠΑΛ Αγ. Παρ.		4ο ΣΕΚ Αθηνών		5ο Γυμν. Αθηνών		Μέσος Ορος
	Διδ/λίας	Η/Υ	Lab	Η/Υ	Διδ/λίας	Εκδηλ.	
SPL εν ώρα μαθήματος, dB(A)	76,5	65,8	60,6	63,3	65,1	66,0	67,57
όγκος αίθουσας (κυβικά μέτρα)	68,0	156,0	324,0	308,0	163,5	485,5	202,96
RT μετρούμενος (sec)	1,97	0,70	1,21	1,19	1,87	3,23	1,54
RT από προσομείωση (Odeon) (sec)	2,01	1,42	2,11	1,78	2,75	7,24	2,59
Διαφορά RT προσομείωσης - μέτρησης (sec)	0,03	0,72	0,90	0,59	0,88	4,01	1,05

STI	0,48	0,5	0,48	0,48	0,43	0,36	0,48
L90 (noise), dB(A)	55,1	51,7	50,7	49,7	51,0	50,2	49,77
SOUND, dB(A)	71,95	62,50	58,65	58,61	62,07	61,36	63,11
SNR	16,85	10,77	7,93	8,93	11,09	11,12	13,34

3. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

3.1 Όγκος αιθουσών και χρόνος αντήχησης

Η βασικά παρατήρηση αναφορικά με τη σχέση του όγκου μιας αίθουσας και του χρόνου αντήχησής της είναι ότι δεν μπορεί να εξαγχθεί με βάση το υπάρχον δείγμα μια σχέση αναλογικότητας μεταξύ των δύο μεγεθών. Επί παραδείγματι, η αίθουσα διδασκαλίας του ΕΠΑΛ Αγ. Παρ. έχει κατά 0,7sec περίπου μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης από ότι οι αίθουσες του 4^{ου} ΣΕΚ Αθηνών, των οποίων ο όγκος είναι πάνω από τέσσερις φορές μεγαλύτερός της. Αντίστοιχα, η αίθουσα Γ2 του 9^{ου} Γυμν. Περιστερίου, με όγκο περίπου ίσο με τις αίθουσες Ββ και Βγ του Α' Εν. Αρσακείου Ψυχ., παρουσιάζει χρόνο αντήχησης περίπου 0,7sec μεγαλύτερο από τις προηγούμενες. Επομένως, δεν μπορεί να αξιολογηθεί βάσει του δείγματος και των μετρήσεων, το κατά πόσον οι πιθανόν υψηλοί χρόνοι αντήχησης που παρατηρούνται σε κάποιες αίθουσες οφείλονται κατά κύριο λόγο στον όγκο της αίθουσας ή σε λοιπά χαρακτηριστικά (επίπλωση, υλικά, σχήμα / διάταξη κ.α.).

Μια επιπλέον προφανής παρατήρηση είναι ότι ο μέσος όρος του χρόνου αντήχησης είναι κατά πολύ υψηλότερος αυτού που έχει προταθεί ως μέγιστος επιτρεπτός, δηλαδή 0,8sec. Μόνο σε μία αίθουσα –αυτή της αίθουσας Πληροφορικής του ΕΠΑΛ Αγίας Παρασκευής- επιτυγχάνεται επιθυμητή τιμή. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της αίθουσας είναι το χαμηλό της ύψος καθώς και τα ξύλινα πατώμα και οροφή. Αναλογιζόμενοι το ότι η εν λόγω αίθουσα είναι μακρόστερνη, συμπεραίνουμε ότι παρά τον καλό χρόνο αντήχησης που παρουσιάζει, η ελλειπής ανακλαστικότητα του υλικού της οροφής, καθώς και το ανεπαρκές της ύψος, εξασφαλίζει καλή ακουστική συμπεριφορά μόνο στους μαθητές πλησίον του καθηγητή, στους οποίους φτάνουν αμείωτα τα ηχητικά κύματα απευθείας διάδοσης.

Επομένως, ανεξάρτητα από τα ποια είναι η κύρια αιτία του μεγάλου χρόνου αντήχησης, πρέπει να μεριμνηθεί η μείωση του όγκου των αιθουσών, π.χ. με ηχοαπορροφητικές ψευδοροφές. Η μείωση αυτή όμως δεν πρέπει να γίνεται απρόσκοπτα αλλά να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές ανακλάσεις.

Σε κάθε περίπτωση, οι «γυμνές» αίθουσες είναι απαγορευτικές – όπως η αίθουσα διδασκαλίας του ΕΠΑΛ Αγ. Παρ. η οποία με όγκο μόλις 68m^3 έχει χρόνο αντήχησης γύρω στα 2sec. Γι αυτό το λόγο, κρίνεται ως απαραίτητη χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών (κουρτίνες, ταμπλό με ειδικό φελό, ηχοαπορροφητικές ψευδοροφές, κρεμάστρες για τα μπουφάν κ.α.), καθώς και υλικά στους τοίχους για την επίτευξη της διασποράς των ηχητικών κυμάτων (ράφια, ντουλάπια, γλάστρες, κ.α.). Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται και τα στάσιμα κύματα.

3.2 SNR, θόρυβος βάθους, SPL εν ώρα μαθήματος

Παρατηρούμε ότι ο μέσος όρος του θόρυβου βάθους είναι περίπου 50dBA. Κοντά στο μέσο όρο κειμένονται οι τιμές στις περισσότερες αίθουσες, με εξαίρεση την αίθουσα Γ7 του Α' Ενιαίου Αρσακείου Ψυχ. Η αίθουσα αυτή φιλοξενεί ολιγομελές «ήσυχο» τμήμα, βρίσκεται στον 3^{ο} όροφο, ενώ «βλέπει» σε προαύλιο στο οποίο κατά την ώρα της μέτρησης δεν υπήρχε κάποιο μάθημα γυμναστικής ή κάποια άλλη δραστηριότητα η οποία να γεννά θόρυβο. Επομένως, χαρακτηρίζεται ως ιδανική από άποψη θορύβου.

Ο θόρυβος βάθους οφείλεται στη φασαρία εντός της αίθουσας –ομιλίες και ψίθυροι μεταξύ μαθητών, τριξίματα καρεκλών και θρανίων, η κιμωλία στην αίθουσα-, σε ελλειπη ηχομόνωση από γειτονικούς διαδρόμους, από τον κτυπογενή θόρυβο στις γειτνιάζουσες και στην από πάνω αίθουσες και σε εξωτερικούς χώρους, καθώς και σε περίπτωση ανοιχτών παραθύρων στο θόρυβο του εξωτερικού χώρου. Μια άλλη πηγή θορύβου είναι η ομιλία του ίδιου του καθηγητή, ο οποίος στην προσπάθειά του να υπερνικήσει τον θόρυβο και να ακουστεί μιλά δυνατότερα, και λόγω του υψηλού χρόνου αντήχησης και των καθυστερημένων πολλαπλών ανακλάσεων γεννά εκ νέου θόρυβο. Τέλος, σε αίθουσες με Η/Υ τα «ανεμιστηράκια» εισάγουν επιπλέον θόρυβο, της τάξης των 10dB.

Ο μετρούμενος θόρυβος βάθους δεν είναι απαγορευτικά υψηλός, καθότι η ανθρώπινη φωνή μπορεί να ξεπεράσει αρκετά τα 50dB ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητικός σηματοθορυβικός λόγος. Παρολ' αυτά, κρίνεται ως υψηλός, διότι αφενός ο καθηγητής αναγκάζεται να ομιλεί ιδιαιτέρως δυνατά, με συνέπεια την επιβάρρυνση του συστήματος ομιλίας του, αφετέρου λόγω της καθημερινής και πολύωρης παραμονής μαθητών και καθηγητών στην αίθουσα δημιουργείται ένα ακουστικά βεβαρυμμένο περιβάλλον το οποίο επηρεάζει τόσο τη διαδικασία της διδασκαλίας όσο και την ψυχική υγεία τους.

Συμπερασματικά, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για σηματοθορυβικό λόγο μεγαλύτερο των 10dB (κάποιοι μελετητές βέβαια κάνουν λόγο για ανάγκη το SNR να είναι μεγαλύτερο των 15dB), ο υψηλός θόρυβος βάθους εισάγει προβλήματα. Παράδειγμα είναι οι μετρήσεις την ώρα διδασκαλίας στο 4^{ο} ΣΕΚ Αθηνών, στις οποίες ο καθηγητής ήταν ασθενής και δε δύνατο να μιλά δυνατότερα. Επομένως το SNR πήρε απαγορευτικά χαμηλές τιμές. Αντίθετα, στην αίθουσα Γ7 του Αρσακείου, εξασφαλίστηκε SNR κοντά στα 20dB χωρίς να αναγκάζεται ο καθηγητής να καταβάλει προσπάθεια.

Τέλος, η ισοδύναμη στάθμη ηχητικής πίεσης μετρήθηκε κατά μέσο όρο κοντά στα 67dBA. Η τιμή αυτή είναι ανεκτή καθώς δε δημιουργεί ιδιαίτερα βεβαρυμμένα ακουστικά περιβάλλον. Παρολ' αυτά, είναι εφικτή και θεμιτή η μείωσή της, ειδικά με δεδομένο την καθημερινή και πολύωρη παρουσία μαθητών και καθηγητών στην αίθουσα.

3.3 STI και Χρόνος Αντήχησης που προέκυψε από την προσομείωση

Ενώ έχει επιτευχθεί αρκετά μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά τις διαστάσεις και τη γεωμετρία των αιθουσών κατά την προσομοίωση, οι μετρούμενοι χρόνοι αντήχησης απέχουν αρκετά από αυτούς που προέκυψαν από την προσομοίωση μέσω του προγράμματος Odeon. Οι διαφορές αυτές είναι της τάξης του ενός δευτερολέπτου, όπως προκύπτει και από τον πίνακα 2.Β. Αιτία αυτής της μεγάλης διαφοράς είναι η αστοχία επιλογής των υλικών, η οποία έγινε κατά προσέγγιση.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα προσομοίωσης για τον υπολογισμό των τιμών του STI χρησιμοποιεί ως δεδομένο τον χρόνο αντήχησης. Επομένως, με αρκετά μεγαλύτερο χρόνο αντήχησης από τον πραγματικό, το πρόγραμμα παρουσιάζει τιμιές για την αντιληπτότητα του ήχου αντίστοιχα μικρότερες από την πραγματικότητα. Επομένως, η αξιολόγηση αυτών καθαυτών των τιμών για το STI θα οδηγήσει σε λανθασμένα δεδομένα σε σχέση με την πραγματική ακουστική συμπεριφορά των αιθουσών.

Τα συμπεράσματα τα οποία μπορούμε να εξάγουμε είναι οι συγκριτικές τιμές μεταξύ των διαφόρων θέσεων μέσα στην αίθουσα. Για το λόγο αυτό ορίστηκε αρκετά πυκνή κάνναβος, ώστε να προκύπτουν τημές για κάθε τετραγωνικό μέτρο της αίθουσας. Αυτό που διαπιστώθηκε είναι ότι τις μεγαλύτερες τιμές STI παρουσιάζουν εκείνες οι θέσεις στις οποίες φτάνουν ανεμπόδιστα τα απευθείας ηχητικά κύματα. Γι αυτό, καλύτερες τιμές παρατηρούνται στις αίθουσες στις οποίες ο καθηγητής βρίσκεται σε υπερηψωμένη έδρα, σε σχέση με το επίπεδο των θρανιών.

4. Συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του άρθρου, το μικρό μέγεθος του δείγματος καθώς και ο ανομοιογενής του χαρακτήρας δεν επιτρέπουν την ασφαλή εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Αυτά που εν πολλοίς διαπιστώθηκαν είναι τα εξής:

- Ο μεγάλος όγκος των αιθουσών, το μακρόστενο σχήμα τους ή η υπερβολικά ψηλή οροφή, καθώς και η ελλειπής επίπλωση ευθύνονται για μεγάλους χρόνους αντήχησης, στάσιμα κύματα, μη σωστή διάδοση και κατευθυντικότητα χρήσιμων ηχητικών κυμάτων και μη απαλλειφής ανεπιθύμητων.
- Δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα προβλήματα ηχομόνωσης. Αντίθετα, παρατηρήθηκε λανθασμένη επιλογή τόσο των σχολικών μονάδων –θορυβώδεις κεντρικές περιοχές, δίπλα σε πυκνές οδικές αρτηρίες-, όσο και σχολικών αιθουσών –παράθυρα από την πλευρά του δρόμου και όχι του προαυλίου, υπερβολικά κοντινή γειτνίαση των αιθουσών με το προαύλιο-.
- Παρατηρήθηκε αρκετά υψηλός θόρυβος βάθους, ο οποίος οφείλεται στα παραπάνω καθώς και στον εσωτερικό θόρυβο της αίθουσας. Με δυσκολία επιτυγχάνονται επιθυμητές τιμές σηματοθορυβικού λόγου, των οποίων η επίτευξη βέβαια δεν εξασφαλίζει και ιδανικές ακουστικές συνθήκες.
- Παρατηρήθηκε σχετική ενιαιότητα στον χώρο όσον αφορά την αντιληπτότητα της ομιλίας. Εξαίρεση αποτελούν θέσεις στις οποίες δεν καταφθάνουν ηχητικά κύματα από την απευθείας διάδοση από τον ομιλητή.

5. Προτάσεις

Σε σχολικές μονάδες που πρόκειται να κτιστούν πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης, του προσανατολισμού των αιθουσών, των υλικών που εξασφαλίζουν ικανοποιητική ηχομόνωση, καθώς και το κτίσιμο τσιμεντένιας περίφραξης μεγάλου ύψους για να λειτουργήσει ως ηχητικό φράγμα.

Στις υπάρχουσες αίθουσες μπορούν να γίνουν εύκολες και με σχετικά χαμηλό κόστος παρεμβάσεις. Προαπαιτούμενο είναι τα διπλά τζάμια για να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ηχομόνωση. Για τη μείωση του όγκου της αίθουσας προτείνεται η κατασκευή ηχοαπορροφητικών ψευδοροφών. Πρέπει να έχει προηγηθεί μελέτη σχετικά με τις επιθυμητές ανακλάσεις από την οροφή. Επιβάλλεται η χρήση κουρτίνων και άλλων ηχοαπορροφητικών υλικών στους τοίχους της αίθουσας. Τα τμήματα πρέπει να είναι ολιγομελή ώστε να μην επιβαρρύνεται ο υπάρχον θόρυβος βάθους. Τέλος, οι καθηγητές προτείνεται να κάθονται σε βήμα, σε υπερηψωμένη έδρα, σε σχέση με το επίπεδο των μαθητών.

Ως γενική αρχή είναι να επιτυγχάνεται σε όλο το εύρος της αίθουσας η απευθείας διάδοση της ομιλίας, ενώ να διατηρούνται στον χώρο το πολύ οι πρώτες ανακλάσεις, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΚΗΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΣΥΝΑΘΡΟΙΣΗΣ ΚΟΙΝΟΥ

Θάνος Αθανάσιος
Ηλεκτρολόγος Υπομηχ/κός
Μηχανικός Τεχνικής Σκηνής
thanosmanagement@gmail.com

Χατζηγεωργίου Γεώργιος
B.Eng,MSc,MSc
Πολιτικός Μηχανικός – Σύμβουλος
Ακουστικής
info@acoustical.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι χώροι συνάθροισης κοινού διαδραματίζουν σήμερα τεράστιο ρόλο στη κοινωνική ζωή της σύγχρονης κοινωνίας. Οι χρήσεις αυτών των χώρων είναι ποικίλες. Ως γνωστό, για τους ακροατές και για την κάθε διαφορετική χρήση, χρειαζόμαστε και άλλες ακουστικές απαιτήσεις.

Για την βελτίωση κατάστασης παραγωγής και αναπαραγωγής και ενίσχυσης του ήχου σ' αυτές τις περιπτώσεις, κατά κανόνα προτείνουμε κάποια μορφή ακουστικού κελύφους στην περιοχή της σκηνής, ώστε να αποχτήσει η πηγή την καταλληλότερη θέση σε σχέση με το ακροατήριο.

Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων της σύγχρονης τεχνικής σκηνής στο ακουστικό κέλυφος μπορεί να δώσει πρωτοποθετήσεις κλίσεων των ανακλαστήρων και να απομνημονεύσει τις επιθυμητές μορφές ακουστικού κελύφους, ώστε να επαναληφθούν αυτόματα αν ξαναχρειασθεί.

Η συνεργασία της ακουστικής μελέτης με την μελέτη της τεχνικής σκηνής ενός χώρου συνάθροισης κοινού θεωρείται σήμερα απαραίτητη.

The significance of stage engineering design and use to internal acoustics of auditoriums and theaters.

ABSTRACT

Spaces for general public events, plays an important role to social life of our contemporary society. The use of these spaces are varied. It is known that for audience and every other use, we need different acoustic requirements.

For the improvement of productions,reproduction and amplification of sound at these cases, the acousticians propose a shape of an acoustic shell at the area of main stage, in order the acoustic sources to be located in a relevance area towards audience.. The development of potentiality of contemporary stage design to the acoustic shell, can offer preset inclination of acoustic reflectors, and memorize the desirable shapes of the acoustic shell, in order to be repeated automatically if the need.

The collaboration of the acoustic design with the design of the stage inside a space for speech and music is considered to be essential.

Εισαγωγή

Οι χώροι συνάθροισης κοινού διαδραματίζουν σήμερα τεράστιο ρόλο στη κοινωνική ζωή της σύγχρονης κοινωνίας. Οι χρήσεις αυτών των χώρων είναι ποικίλες. Σ αυτούς τους χώρους αναπτύσσονται οι :

- Θεατρική χρήση.
- Κινηματογραφική χρήση.
- Οι μουσικές εκδηλώσεις.
- Ο χορός.
- Οι εκδηλώσεις λόγου- Κοινωνικές εκδηλώσεις.
- Η συνεδριακή χρήση.

Ως γνωστό, για τους ακροατές και για την κάθε διαφορετική χρήση, χρειαζόμαστε και άλλες ακουστικές απαιτήσεις. Στους χώρους συνάθροισης κοινού, ανά περίπτωση η παραγωγή του ήχου γίνεται με ηλεκτροακουστική ή φυσικό τρόπο. Επίσης ανά περίπτωση η πηγές δεν βρίσκονται πάντα στο ίδιο σημείο.

Στην περίπτωση που τα δρώμενα λαμβάνουν μέρος στην περιοχή των προσκηνίων, είναι ευκολότερο να διεξαχθούν οι εκδηλώσεις χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα ακουστικής, διότι οι πηγές βρίσκονται στο καταλληλότερο σημείο, και η προβλεπόμενη ακουστική μελέτη της αίθουσας εξασφαλίζει ακουστική άνεση στους θεατές.

Όταν τα δρώμενα λαμβάνουν μέρος στην περιοχή της σκηνής, στις εκδηλώσεις που απαιτούν χρήση ορχήστρας, χορωδίας, ή λόγου, υπάρχει έντονο πρόβλημα φυσικής ενίσχυσης του ήχου προς την αίθουσα, πρόβλημα αντήχησης στην περιοχή της σκηνής, κάποιες φορές έντονης ηχοαπορρόφησης από τα υφάσματα της περιοχής, και προβλήματα μικροφωνισμών από στάσιμα κύματα.

Για την βελτίωση κατάστασης παραγωγής και αναπαραγωγής και ενίσχυσης του ήχου σ αυτές τις περιπτώσεις, κατά κανόνα προτείνουμε κάποια μορφή ακουστικού κελύφους στην περιοχή της σκηνής, ώστε να αποχτήσει η πηγή την καταλληλότερη θέση σε σχέση με το ακροατήριο. Αυτό το κέλυφος αποτελείται από πετάσματα κατάλληλου σχήματος και μάζας, ώστε να ακυρώνονται όλα τα ενοχλητικά ακουστικά φαινόμενα, και αποτελούν περίμετρο και οροφή της σκηνής.

1. Εμπειρία από άλλες χώρες και σύγκριση με την Ελλάδα.

Κατά κανόνα, στα δημόσια κτήρια που κατασκευάσθηκαν για χρήση συνάθροισης κοινού, είναι διακριτές οι χρήσεις και αντιστοιχείται με αυτές ο σχεδιασμός των κτηρίων και των εξοπλισμών. Σπανίζει η έννοια «Αίθουσα Πολλαπλών Χρήσεων». Παρ' όλα αυτά τα μεγάλα κτήρια τα οποία διατίθενται για «show», διαθέτουν και αυτές τις τεχνολογικές εξυπηρετήσεις. Για τα μικρά κτήρια γνωρίζουμε ότι οι παράγοντες κάποιας εκδήλωσης φροντίζουν με κινητούς έως αυτοσχέδιους εξοπλισμούς να καλύψουν τις ανάγκες τους. Εντυπωσιακό είναι ότι υπάρχουν εκατοντάδες ιδιωτικές επιχειρήσεις ενοικιάσεων εξοπλισμών που εξασφαλίζουν επαρκώς τις απαιτήσεις του χρήστη.

Στα μεγάλα κτήρια πολλών χρήσεων εν τουτοις υπάρχει απόλυτη συνεργασία ανάμεσα στους Μηχανικούς Ακουστικής και τους Μηχανισμούς Τεχνολογίας Σκηνής τόσο για τον σχεδιασμό των κτηριακών όσο και των εξοπλισμών.

Στη χώρα μας παρατηρούμε ανάπτυξη δύο ταχυτήτων. Διαμορφώνεται μία τάση σε 2-3 μεγάλα αστικά κέντρα η οποία ακολουθεί εν γένει το Ευρωπαϊκό πρότυπο, ενώ στην υπόλοιπη χώρα και σε πόλεις μεσαίου ή μικρού μεγέθους προτιμώνται χώροι ανάπτυξης πολιτισμού πολλών χρήσεων. Αυτό γίνεται μάλλον για λόγους οικονομίας.

2. Προϋποθέσεις

Γενικά

Το αντικείμενο περιλαμβάνει την διαμόρφωση της αίθουσας της Σκηνής και των βοηθητικών της χώρων ώστε να υπάρχουν συνθήκες καλής και ασφαλούς λειτουργίας για τις ζητούμενες χρήσεις.

Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες μεταλλικές υποδομές για την εγκατάσταση του εξοπλισμού σκηνής θεάτρου.

Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες υποδομές για την εγκατάσταση του εξοπλισμού, για τον θεατρικό φωτισμό και οπτικοακουστικών συστημάτων.

Επίσης περιλαμβάνει όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό σκηνής θεάτρου υπερσκηνίου και συγκεκριμένα όλους τους μηχανισμούς κίνησης, συστήματα, κατασκευές και παρελκόμενα αυτών, που έχουν σχέση και διασφαλίζουν την Συνεδριακή, Θεατρική, Κινηματογραφική και Συναυλιακή λειτουργία της Αίθουσας. Περιλαμβάνει τους μηχανισμούς και τα συστήματα μεταφοράς, διακίνησης και αποθήκευσης σκηνικών, ανακλαστήρων ήχου, οθόνων και φωτιστικών εντός του κτιρίου.

Περιλαμβάνει τους μηχανισμούς των ‘masking’ των οπτικών χαράξεων και της σκηνοθεσίας όλων των χρήσεων και λειτουργιών που αναφέρονται ανωτέρω. Περιλαμβάνει επίσης το σύστημα αυτοματισμών και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την προγραμματισμένη κίνηση των μηχανισμών.

2.1 Διαμορφώσεις – Προδιαγραφές Χώρου

Τα τελευταία χρόνια οι απαιτήσεις του κοινού και των εμπλεκομένων στις παραγωγές προϊόντων πολιτισμού τοποθετούν πολύ ψηλά τον πήχη στις προδιαγραφές παρόμοιων χώρων.

Κύριος στόχος είναι η διαμόρφωση του χώρου ώστε το συγκρότημα να υποδεχθεί τον σύγχρονο θεατή, καλλιτέχνη, και τεχνικό με τις απαιτήσεις του και να ενσωματωθεί σύγχρονος εξοπλισμός της Τεχνικής Σκηνής του Θεατρικού Φωτισμού και των Οπτικοακουστικών.

Ένας γενικός κανόνας διαστάσεων είναι ότι το ωφέλιμο ύψος του πύργου της σκηνής είναι τουλάχιστον διπλάσιο του ύψους της μπούκας +3 μέτρα.

Π.χ. Για ένα ύψος μπούκας 5m, χρειαζόμαστε ελεύθερο ύψος στην περιοχή του πύργου 5X2+3=13m.

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι σε ορισμένες περιοχές της χώρας όπου δεν επιτρέπεται η ανέγερση τόσο υψηλών κτηρίων, τα κτήρια στην περιοχή του πύργου σχεδιάζονται να είναι υπόσκαφα.

Κατά τις διαμορφώσεις πρέπει να πάρουμε υπ' όψη μας τους χώρους των μηχανοστασίων. Κατά κανόνα χρειάζονται δύο χώροι για δύο συστοιχίες μηχανών εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα.

Το πλάτος της κάθε ζώνης είναι κατά ελάχιστο 2,5m.

Η ελάχιστη διαφορά ύψους των μηχανών από τα τροχαλιοστάσια είναι 2,2m. Η θέση των μηχανοστασίων μπορεί να είναι σε μεταλλική πασαρέλα που είναι και το πιο κοινό, αλλά και στο υπόγειο του κτηρίου, αν είναι δυνατόν.

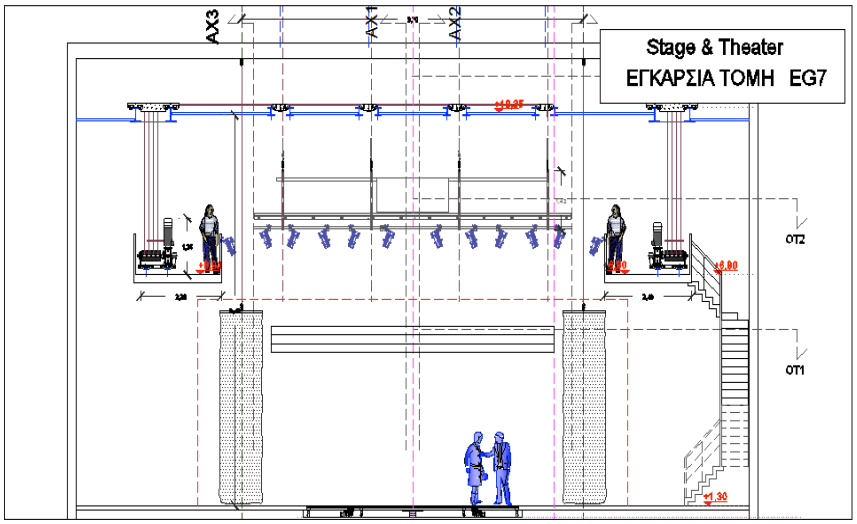
Για τον σχεδιασμό των ανωτέρω είναι απαραίτητη η συνεργασία του στατικού, δεδομένου ότι τα κινητά φορτία είναι σημαντικά.

Επίσης είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός προσβάσεων σε όλα τα σημεία των μηχανισμών ώστε να υπάρχει ασφαλής κατασκευή κα συντήρηση των συστημάτων.

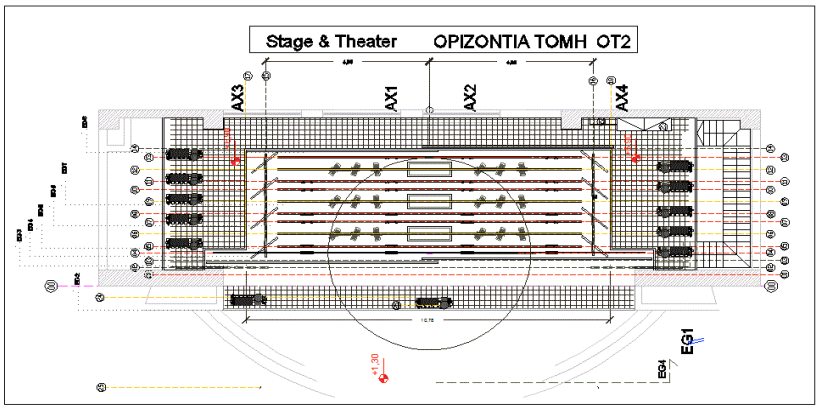
Απαραίτητη είναι και η επαρκής σήμανση ώστε οι χρήστες να προσανατολίζονται τόσο με τους χώρους , όσο και με την χρήση των μηχανημάτων.

Κατά την συνεργασία των μηχανικών ακουστικής και τεχνικής σκηνής, πρέπει να προβλεφθούν οι μάζες των πετασμάτων, ώστε να εξασφαλισθεί η επαρκής ισχύς, όπως επίσης και οι υπόλοιποι παράμετροι των μηχανών.

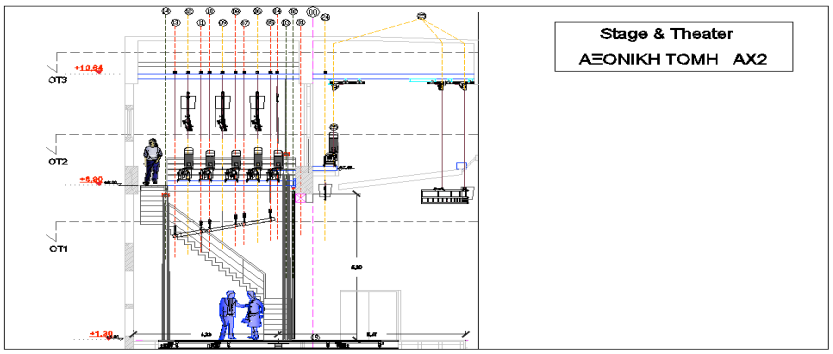
Οι ανωτέρω προϋποθέσεις εμφανίζονται στα κατωτέρω σχήματα.



Σχήμα 2.1. Εγκάρσια Τομή μηχανισμού σε Πύργο



Σχήμα 2.2. Οριζόντια Τομή μηχανισμού σε Πύργο



Σχήμα 2.3. Αξονική Τομή μηχανισμού σε Πύργο

2.2 Προδιαγραφές ασφαλείας

Το επίπεδο ασφαλείας μιας μηχανής ορίζεται από τον σχεδιαστή κατά την κρίση του, την γνώση, την εμπειρία και την συνείδηση του. Πάντα υπάρχει κάποιος πρότυπος κανονισμός οδηγιών που λαμβάνει υπ όψη του. Καμία μηχανή δεν είναι απολύτως ασφαλής εκτός από το ακίνητο.

Ο Ελληνικός κανονισμός δεν καλύπτει τους μηχανισμούς της Τεχνικής Σκηνής. Για τους σχεδιαστές αυτών των μηχανισμών μια καλή πηγή προτύπου, και έως την πλήρη ενημέρωση του Ευρωπαϊκού EN, είναι ο DIN και τα B.S. Παρακάτω θα αναφερθούμε σε επίπεδο ασφαλείας όπως ορίζεται από το Γερμανικό πρότυπο σε όλα τα επί μέρους τεμάχια που διαθέτουν φάκελο βιομηχανικού σχεδιασμού και βρίσκονται σε παραγωγική διαδικασία, και δύνανται να πιστοποιηθούν αποδεδειγμένα. Το ίδιο και για το επίπεδο ασφαλείας SIL3, από αναγνωρισμένο διεθνή φορέα πιστοποίησης Τεχνικής Σκηνής, (όχι Βαρούλκων, αυτοσχέδιων, ή μεμονωμένων κατασκευασμάτων άλλης χρήσης). Η Τεχνική Σκηνής δεν είναι προϊόν αλλά Τεχνικό Έργο. Όλα τα επί μέρους συνδέονται μεταξύ τους ώστε να

παράγουν κοινό έργο. Έτσι η μελέτη αποφασίζει για την ασφαλή συναρμογή και συνλειτουργία μεγάλου αριθμού επί μέρους εξαρτημάτων και μηχανών. Οι οδηγίες των κανονισμών μας προσανατολίζουν σε δύο άξονες. Ο πρώτος είναι οι συντελεστές ασφάλειας σε φορτία, τριβές, πέδηση, ροπές, ισχύς κ.λ.π., ενώ ο δεύτερος σε αριθμό συστημάτων που ασχολούνται με τα προηγούμενα.

Γενικά στο σχεδιασμό της Τεχνικής Σκηνής των Θεάτρων, κατά τον πρώτο άξονα προβλέπονται συντελεστές ασφαλείας πολύ μεγαλύτεροι των οδηγιών, και κατά τον δεύτερο άξονα, διπλά συστήματα επί μέρους κατά την κρίση των μελετητών, και χωρίς υπερβολές. Έτσι θεωρείται απαραίτητη και εγκατάσταση δεύτερης ηλεκτρομαγνητικής πέδης και Hardware και Software με διπλές δικλίδες ασφαλείας.

Συμπληρωματικά εκτός της Εθνικής Νομοθεσίας χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα:

Κατά κανόνα υπολογίζονται οι παράμετροι που εμφανίζονται στον πίνακα 1, και αντιστοιχούνται με τα πρότυπα που αναφέρονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2.2 Παράμετροι Υπολογισμών-αντίστοιχο πρότυπο

Α/Α	Παράμετροι Υπολογισμών	Αντίστοιχο Πρότυπο
1	Total Overload (TÜV) Σύνολο υπερφόρτωσης (TUV)	DIN 56950: 3.2.9, 7.7.4.3 (Prüflast=NutzlastxPrüflastf., Überlastf=1,2) (φορτίο δοκιμής = φορτίο x στ. δοκιμή φορτίου, υπερφόρτωση, f = 1.2)
2	Dynamic Torque (Failure) Δυναμική Ροπή (Αποτυχία)	DIN 56950:5.2.7 (einfache Traglast dynamisch [Störfall]) (απλό φορτίο [περιστατικό] δυναμική)
3	Dynamic Torque (Normal Case) Δυναμική ροπής (κανονική περίπτωση)	DIN 56950: 5.2.7 (zweifache Traglast dynamisch [Betriebsfall]) (διπλό φορτίο [περίπτωση λειτουργίας] δυναμική)
4	Brake Torque (dynamic) ροπή πέδησης (δυναμική)	DIN 56950: 5.2.7 (einfache Prüflast dynamisch [Prüffall]) (απλό φορτίο δοκιμής [δοκιμή] δυναμική)
5	Brake Torque (dynamic) ροπή πέδησης (δυναμική)	DIN 56950: 5.2.7 (einfache Prüflast dynamisch [Prüffall]) (απλό φορτίο δοκιμής [δοκιμή] δυναμική)

6	Dynamic Rope Safety Δυναμική ασφάλεια συρματοσχοίνων	DIN 56950: 5.2.3.1
7	Safety Windings Ασφάλεια Περιελίξεων Τυμπάνου	DIN 56950: 5.2.6.1
8	Max. Deviation Rope (<4°) Μέγιστη Απόκλιση γωνίας Συρματοσχοίνων	DIN 56950: 5.2.6.1
9	Min. Diameter Drum.Ελάχιστη Διάμετρος Τυμπάνου	DIN 56950: 5.2.6.1

3. Διαθέσιμος Τεχνολογίες

Ο απαιτούμενος τεχνολογικός εξοπλισμός αποτελείται από το μηχανολογικό μέρος, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, την ηλεκτρολογική εγκατάσταση, το Hardware και το Software.

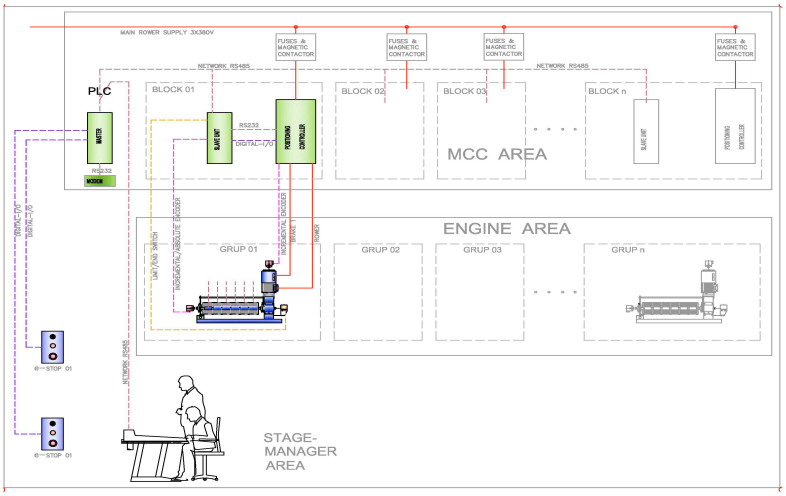
Το μηχανολογικό μέρος είναι το Μπλοκ Κίνησης το οποίο διαθέτει Ηλεκτροκινητήρα, Μειωτήρα Τύμπανο περιέλιξης συρματόσχοινων, Στρωτήρες Συρματόσχοινων, Τερματικούς διακόπτες κλπ.

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης αποτελείται από τα τροχαλιοστάσια Εκτροπής και Ανάρτησης, τα συρματόσχοινα μεταφοράς κίνησης και τους φορείς ανάρτησης των Φορτίων.

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση αποτελείται από τις καλωδιώσεις ισχυρών και ασθενών ρευμάτων, οι οποίες οδεύουν μέσω ηλεκτρολογικών σχαρών μέσα στο κτήριο. Όλα τα καλώδια είναι θωρακισμένα ώστε να μην δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία και κατ' επέκταση βιομηχανικά παράσιτα.

Το Hardware αποτελείται από Βιομηχανικούς Υπολογιστές, Αισθητήρες παρακολούθησης ταχύτητας, επιτάχυνσης, θέσης κλπ, και Χειριστήρια με βιομηχανικές οθόνες Touch Screen.

Το Software αποτελείται από λογισμικά ενσωματωμένα στις προηγούμενες συσκευές, και από το λογισμικό λειτουργίας, το οποίο διατίθεται στην αγορά σε διάφορες εκδοχές. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το επίπεδο ασφαλείας των λογισμικών λειτουργίας ή των συσκευών σε όλες σχεδόν της χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι πλέον SIL3. Στη χώρα μας δεν απαιτείται ακόμη, διότι δεν υπάρχει απόλυτη εναρμόνιση της αντίστοιχης νομοθεσίας. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι δεν υπάρχει επίσημος κρατικός ή ιδιωτικός φορές πιστοποίησης των ανωτέρω τεχνολογικών συστημάτων για αυτή την χρήση.



Σχήμα 3.1. Διάγραμμα συστήματος μετάδοσης κίνησης-Hardware-Software

4. Συνεργασίες Ειδικών Συμβούλων

Οι συνεργασίες των ειδικών συμβούλων πρέπει να γίνονται από το πρώιμο επίπεδο των μελετών. Συνήθως οι υπεύθυνοι των μελετών αγνοούν την χρησιμότητα τους και παρ' ότι υπάρχουν μέσα στις μελετητικές ομάδες Σύμβουλοι Ακουστικής και Τεχνικής Σκηνής, σπάνια έρχονται σε επαφή. Θεωρείται απαραίτητη μόνο η συνεργασία των Μηχανικών Ακουστικής με τους Αρχιτέκτονες, και των Μηχανικών Τεχνικής Σκηνής με τους Μηχανολόγους. Πρακτικά όμως οι μηχανισμοί Τεχνολογίας Θεάτρου και χώρων Πολλαπλών χρήσεων, σχεδιάζονται να κινούν αντικείμενα που σχεδιάζονται και από τους Μηχανικούς Ακουστικής. Αυτά είναι όλες οι κατασκευές του ακουστικού κελύφους της σκηνής, της αίθουσας, οι γιγάντιες καταπακτές οροφής και πλάγιων τοίχων για τους ειδικούς φωτισμούς, οι ηλεκτροκίνητες υφασμάτινες επενδύσεις της σκηνής ή της αίθουσας για ρυθμιζόμενη ηχοαπορρόφηση και άλλα.

5. Βιβλιογραφία

[1]DIN56950 «Entertainment technology, Machinery Installations.Safety Requirements and testing. (2005).

[2] Izenour George *Theater Technology* Yale University Press,(1997) 05).

Σύγχρονες μέθοδοι ακουστικής μελέτης των αρχαίων ελληνικών και ρωμαϊκών θεάτρων

Κωνσταντίνος Αγγελάκης
διπλ. Ηλεκτρολογός Μηχανικός και
Μηχανικός Η/Υ, M.Sc. Ακουστικής
TU Denmark
υποψήφιος διδάκτωρ ΤΑΜ ΔΠΘ
kangelakis@gmail.com

Νίκος Μπάρκας
αναπληρωτής καθηγητής ΤΑΜ ΔΠΘ
nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το επίκεντρο της παρούσας ανακοίνωσης είναι η συνοπτική παρουσίαση των σύγχρονων ερευνητικών μεθόδων, όπως παρουσιάστηκαν στο 1ο Διεθνές Συνέδριο για την Ακουστική των Αρχαίων Θεάτρων (Πάτρα, 09 / 2011). Σκοπός της έρευνας είναι η χαρτογράφηση και επισκόπηση της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας, καθώς και η παρουσίαση των διαθέσιμων εργαλείων για την μελέτη των θεάτρων της αρχαιότητας (προσομοιώσεις σε υπολογιστή, επιτόπιες μετρήσεις, προσομοιώσεις υπό κλίμακα, ακουστικές δοκιμές, μελέτη ηχοτοπίου). Μετά την παρουσίαση της σύγχρονης ερευνητικής προσπάθειας που αποσκοπεί στην μελέτη των αρχαίων θεάτρων, είναι δυνατή η διάκριση δύο κύριων ερευνητικών τάσεων:

-η αναπαραγωγή /προσομοίωση του ηχητικού πεδίου των θεάτρων και

-η μελέτη της επαναλειτουργίας τους.

Contemporary methods of studying the acoustics of ancient greek and roman theatres

ABSTRACT

The aim of this paper is to summarize the contemporary research methods, as presented at the 1st International Conference on Acoustics of Ancient Theatres (Patras, 09/2011). The purpose is to map and overview the current research activity, as well as to present the available tools for the study of ancient theatres (computer simulations, field measurements, scale simulations, listening tests, soundscape study). After the presentation of contemporary research effort aimed at studying the ancient theatres, it is possible to distinguish two main research trends:

-the reproduction / simulation of the sound field of the theatres and

-the study of their contemporary use.

Εισαγωγή

Τα αρχαία ελληνικά και ρωμαϊκά θέατρα αποτελούν επί μακρόν αντικείμενο της ακαδημαϊκής έρευνας που, εκτός από την μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και συμπεριφορών, έχει επεκταθεί και σε ζητήματα που σχετίζονται με την σύγχρονη χρήση τους.

Η παρούσα ανακοίνωση αποτελεί αρχικό τμήμα βιβλιογραφικής έρευνας για την εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο πεδίο της ακουστικής λειτουργίας των αρχαίων θεάτρων. Το επίκεντρο της ανακοίνωσης είναι η συνοπτική παρουσίαση των σύγχρονων ερευνητικών μεθόδων, όπως παρουσιάστηκαν στο 1ο Διεθνές Συνέδριο για την Ακουστική των Αρχαίων Θεάτρων (Πάτρα, 09 / 2011). Σκοπός της έρευνας είναι η χαρτογράφηση και επισκόπηση της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας, καθώς και η παρουσίαση των διαθέσιμων εργαλείων για την μελέτη των θεάτρων της αρχαιότητας.

1 Συνδυασμός επιτόπιων μετρήσεων και προσομοιώσεων σε Η/Υ

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος μελέτης της ακουστικής των αρχαίων θεάτρων είναι ο συνδυασμός επιτόπιων μετρήσεων και προσομοιώσεων σε Η/Υ. Τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων που με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για την μελέτη υποθετικών σεναρίων, όπως παραδείγματος χάριν η μεταβολή της ακουστικής συμπεριφοράς του θεάτρου ανάλογα με τον αριθμό των θεατών, την τοποθέτηση ηχείων, τις σκηνικές και σκηνογραφικές εγκαταστάσεις κλπ (χαρακτηριστικά παραδείγματα [1], [2], [3]).

Τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ψηφιακών προσομοιώσεων είναι συνήθως το CATT (Σουηδία) και το ODEON (Δανία), ενώ περιορισμένη είναι η χρήση του EASE (Γερμανία), του Raynoise (Βέλγιο) και του OTL-Terrain (Κύπρος).

Κατά τις επιτόπιες μετρήσεις, συνήθης πρακτική είναι η μέτρηση συναρτήσεων μεταφοράς και των σχετικών κρουστικών αποκρίσεων, ενός αριθμού συνδυασμών πηγής-δέκτη σύμφωνα με το πρότυπο ISO-3382-1. Σαν πηγές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ηχεία (συνήθως δωδεκαεδρικά) και μικρόφωνα (ή dummy heads) ως δέκτες. Η παραγωγή και ηχογράφηση του σήματος διέγερσης (πχ MLS, sine sweeps, balloon bursts, pistol shots, firecrackers) γίνεται από ψηφιακά λογισμικά όπως το DIRAC, το ARTA κα.

Ενδεικτικά αναφέρονται μερικά ευρωπαϊκά πανεπιστήμια, τα οποία έχουν παρουσιάσει πρόσφατα σχετική ερευνητική δραστηριότητα:
-Μ. Βρετανία: University of Salford, University of York, University of Cambridge,
-Δανία: Technical University of Denmark,
-Ελλάδα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Ξάνθης,
-Ισπανία: University of Valladolid, Miguel Hernandez University,
-Ιταλία: University of Ferrara, Second University of Naples, University of Bologna και
-Φινλανδία: Aalto University κα.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθούν οι ενστάσεις που έχουν διατυπωθεί αναφορικά με την αποτελεσματικότητα των διαθέσιμων λογισμικών ακουστικής προσομοίωσης, τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως για σύγχρονους αρχιτεκτονικούς χώρους. Σύμφωνα με τον J. Kang [4], πολλά από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αρχαιολογικών χώρων δεν έχουν ληφθεί υπόψη και, κατά συνέπεια, δεν είναι πρόσφορο να εφαρμόζονται άμεσα σε αρχαιολογικούς χώρους τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού.

Σχετικά, θεωρείται απαραίτητη, εκτός από την επικύρωση των προσομοιώσεων με επιτόπιες μετρήσεις, η θεωρητική ανάλυση και λεπτομερής εξέταση των ιδιοσυχνοτήτων και της περίθλασης των επιμέρους αρχιτεκτονικών στοιχείων του χώρου, καθώς και ο υπολογισμός συνηχητών Helmholtz.

Ειδικά με χρήση συνηχητών στα αρχαία θέατρα, μελέτες έχουν παρουσιάσει οι Καραμπατζάκης et al [5] και Πολυχρονόπουλος et al [6].

2 Μετρολογία

Ως προς τη μετρολογία, όπως προαναφέρθηκε, κυριαρχεί το πρότυπο ISO-3382-1, ενώ ορισμένοι ερευνητές πειραματίζονται με την χρήση διάφορων μικροφώνων και επικεντρώνονται στην μέτρηση και αναπαραγωγή χωρικών ακουστικών παραμέτρων.

Οι Farina et al [7] παρουσιάζουν μία νέα μέθοδο μέτρησης τρισδιάστατων αποκρίσεων συχνότητας παρέχοντας αφενός την αποτύπωση ηχητικών παραμέτρων υψηλής ανάλυσης και αφετέρου μια πολύ απλή μέθοδο μετα-επεξεργασίας των δεδομένων. Αυτή η μετα-επεξεργασία επιτρέπει την εύληπτη γραφική αναπαράσταση των χωρο-χρονικών πληροφοριών, αλλά και την επαναχρησιμοποίηση των μετρημένων αποκρίσεων συχνότητας ως ψηφιακών φίλτρων υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια το θεατρικό χώρο μέσα σε ένα 3D σύστημα surround.

Οι Fazenda et al [8] ηχογραφώντας και χρησιμοποιώντας B-format κρουστικές αποκρίσεις, ασχολούνται επίσης με την αναπαραγωγή και ακουστικοποίηση (auralisation) ηχητικών πεδίων, παρουσιάζοντας μια υβριδική μέθοδο που βασίζεται στην σύνθεση του ηχητικού πεδίου (wavefield synthesis) και σε τεχνικές ambisonic απόδοσης.

3 Προσομοιώσεις υπο κλίμακα

Κατ` αντιστοιχία με τις προσομοιώσεις σε Η/Υ χρησιμοποιούνται, αλλά σε μικρότερη έκταση, οι προσομοιώσεις υπό κλίμακα. Πρόκειται για ένα ερευνητικό εργαλείο που βρίσκει εφαρμογή κατά κύριο λόγο στην έρευνα των ακουστικών ιδιοτήτων των δομικών υλικών και έχει χρησιμοποιηθεί από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου της Ferrara για τη μελέτη (μεταξύ άλλων) του φαινομένου της περίθλασης στα αρχαία θέατρα (Farnetani et al [9]).

Σχετικά, οι Prodi et al [10] μελέτησαν την συσχέτιση τριών (3) δομικών /αρχιτεκτονικών στοιχείων των αρχαίων ρωμαϊκών θεάτρων (τοίχος σκηνής, άνω περίστυλη στοά, κλίση του κοίλου) βασιζόμενοι στην υπόθεση ότι αυτή η συσχέτιση καθορίζει αποφασιστικά τις ακουστικές παραμέτρους σε αρκετές

περιπτώσεις αρχαίων θεάτρων. Επίσης μελέτησαν την επίδραση μιας πρόσθετης σκηνικής εξέδρας, καθώς και εφαρμογή μιας μικροφωνικής εγκατάστασης.

4 Ποιοτική ανάλυση

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η μέτρηση των ακουστικών παραμέτρων των αρχαίων θεάτρων δεν αρκεί για τον χαρακτηρισμό των χώρων με όρους «ακουστικής ποιότητας», αλλά ούτε επιτρέπει να διατυπωθούν εικασίες σχετικά με ακουστική εμπειρία των ανθρώπων που παρακολουθούν ή παρακολουθούσαν παραστάσεις σε αυτά τα θέατρα [11], [12], [13], [14], [15].

Ένα μικρό μέρος της τρέχουσας έρευνας ασχολείται με την διερεύνηση της υποκειμενικής διάστασης των όρων «ποιότητα», «εμπειρία», «intimacy/οικειότητα». Πρόκειται για έρευνες που ασχολούνται με ακουστικές δοκιμές (listening tests) και με ερωτηματολόγια για την υποκειμενική αξιολόγηση προσομοιώσεων ή ηχογραφήσεων.

Σύμφωνα με τους Gade and Angelakis [16], από έρευνα που έγινε στα δύο (2) αρχαία θέατρα της Επιδαυρίας με τη χρήση ηχογραφήσεων κατά την διάρκεια παραστάσεων, επισημαίνεται (μεταξύ άλλων) ότι, η χρήση μικροφωνικής εγκατάστασης συντελεί στη συρρίκνωση της υποκειμενικής αίσθησης του μεγέθους των θεάτρων και στην αύξηση της «intimacy /οικειότητας». Καθώς η «intimacy/οικειότητα» και οι ηχητικές στάθμες SPL είναι ουσιώδη ζητήματα στα υπαίθρια θέατρα (μεγάλες αποστάσεις από τη σκηνή, μικρός χρόνος αντήχησης), είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός κατάλληλων συστημάτων ενίσχυσης του ήχου μπορεί να εκλάβει κεφαλαιώδη σημασία σε πολλά είδη σύγχρονων παραστάσεων.

Τέλος, οι Foteinou and Murphy [17] αντιπαραβάλλουν, μέσω ακουστικών δοκιμών (listening tests) τα αποτελέσματα της «ακουστικοποίησης» που παρήχθησαν από τα CATT και ODEON με τα δεδομένα επιτόπιων ηχογραφήσεων, σε ποικίλες συνθήκες ηχοαπορρόφησης. Σύμφωνα με την έρευνά τους, οι διαφορές στις συνθήκες ηχοαπορρόφησης είναι εμφανώς πιο ευδιάκριτες στις ακουστικές δοκιμές που βασίζονταν σε επιτόπιες ηχογραφήσεις σε σχέση με εκείνες που βασίζονται σε υλικό από προσομοιώσεις.

5 Περιβαλλοντικός θόρυβος

Η διερεύνηση του περιβαλλοντικού θορύβου κατά τη σύγχρονη επαναλειτουργία των αρχαίων θεάτρων είναι περιορισμένη. Οι σχετικές μελέτες στοχεύουν στην διατύπωση κριτηρίων θορύβου και επικεντρώνεται στην παρακολούθηση της εξέλιξης των επιπέδων θορύβου και των πηγών όχλησης.

Οι Barkas και Vardaxis [18] διαπιστώνουν σημαντικές οχλήσεις από το σύγχρονο περιβάλλον των θεάτρων (βιομηχανικές και αστικές χρήσεις, κυκλοφορία) σε έρευνα που πραγματοποίησαν σε δείγμα δέκα τεσσάρων (14) αρχαίων ελληνικών θεάτρων (ηχομετρήσεις και καταγραφές). Προτείνουν την υιοθέτηση σύγχρονων πολεοδομικών ρυθμίσεων (αποτροπή ή αναστολή δραστηριοτήτων, ήπιες χρήσεις) με στόχο τη συμμόρφωση με τα σχετικά διεθνή όρια θορύβου (καμπύλη NC-25).

Παράλληλα, επισημαίνουν τη συνήθη έλλειψη σκηνικού βάθους (τυπική καταστροφή της σκηνής από ρωμαϊκές επεμβάσεις και λιθοθηρία) στα περισσότερα

αρχαία θέατρα και προτείνουν την προσθήκη ενός αισθητικά ουδέτερου και ανακλητού παρασκηνίου κατά την διάρκεια των παραστάσεων το οποίο μπορεί να συμβάλλει συνδυαστικά ως ανακλαστήρας αλλά και ως ηχοπέτασμα.

6 Συζήτηση

Μετά την παρουσίαση της σύγχρονης ερευνητικής προσπάθειας που αποσκοπεί στην μελέτη των αρχαίων θεάτρων, είναι δυνατή η διάκριση δύο κύριων ερευνητικών τάσεων:
-η αναπαραγωγή /προσομοίωση του ηχητικού πεδίου των θεάτρων και
-η μελέτη της επαναλειτουργίας τους.

Στην πρώτη περίπτωση η έμφαση δίνεται στην εξέλιξη των μεθόδων ηχογράφησης των σημάτων διέγερσης, στην βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων σε Η/Υ, καθώς και στη μελέτη των υποκειμενικών ακουστικών παραμέτρων.

Στη μελέτη της επαναλειτουργίας, έμφαση δίνεται στην χαρτογράφηση βασικών ακουστικών παραμέτρων των θεάτρων (πχ. RT, STI) και στο σχεδιασμό ψηφιακών προσομοιώσεων με στόχο την εξάλειψη σοβαρών ακουστικών ατοπημάτων (όπως η λανθασμένη τοποθέτηση ηχείων, σκηνικών και ανακλαστήρων), καθώς επίσης και στην επίδραση του περιβαλλοντικού θορύβου. Όπως διαφαίνεται, κρίσιμες επιλογές που προσδιορίζουν τη μέθοδο και τον κατάλογο των παραμέτρων ανάλυσης μιας έρευνας στο πεδίο της σύγχρονης ακουστικής λειτουργίας των αρχαίων θεάτρων αποτελούν :
-η υφιστάμενη κατάσταση του θεατρικού χώρου (καταστροφές, επεμβάσεις),
-η διαμόρφωση του σκηνικού χώρου κατά τη διάρκεια μιας παράστασης,
-οι εξελισσόμενες επιδράσεις του σύγχρονου ηχητικού περιβάλλοντος
-η δυνητική ενεργοποίηση των ακουστικών χαρακτηριστικών του θεατρικού χώρου, σε συνδυασμό με τις αρχιτεκτονικές δυνατότητες και τις σκηνογραφικές επιλογές μιας παράστασης.

7 Αναφορές

[1] K. Angelakis, J.H. Rindel, A. Gade «Theatre of the Sanctuary of Asklepios and the Theatre of Ancient Epidaurus: Objective measurements, computer simulations and listening tests» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[2] C. Goussios, N. Tsinikas, K. Chourmouziadou, G. Kalliris «The Roman Odeion of Nicopolis: Observations of architectural elements affecting its acoustics. Measurements and calculations of acoustic indices» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[3] Th. Nianounakis «The Acoustics of the Ancient Theatre of Hephaistia – Limons island, Greece» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[4] J. Kang University of Sheffield, *Acoustic modeling and measurement for archaeological sites*.

Retrieved from http://ambpnetwork.wordpress.com/introductions-to-the-field/acoustic-modelling-and-measurement-for-archaeological-sites/, on July 15th 2012.

[5] P. Karampatzakis, V. Zafranas, S. Polychronopoulos «A study on Aristoxenus acoustic urns (The Vitruvian secret)» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[6] S. Polychronopoulos, D. Skarlatos, D. Kougias «The use of resonators in ancient Greek Theatres» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[7] A. Farina, L. Tronchin «New measurement technique for 3D sound characterization in theatres» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[8] B. Fazenda, I. Drumm «Recreating the sound of Stonehedge» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[9] A. Farnetani, N. Prodi, P. Fausti «Validation of a numerical code for edge diffraction by means of acoustical measurements on a scale model of an ancient theatre» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[10] N. Prodi, A. Farnetani, R. Pompoli, P. Fausti «Acoustics and architecture in ancient open air theatres» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[11] M. Mota «Meter matters: Embodied rhythms at stage as a challenge to the acoustics of ancient theatres» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[12] J. Blauert «Cognitive aspects of listening in performance spaces» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[13] B. Blesser, «An analysis of the aural experience of ancient spaces» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[14] A. Cocchi, «Theatre design: Science or opportunity?» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[15] Th Vovolis «Mask, Actor, Theatron and Landscape in classical Greek theatre» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[16] A. Gade, K. Angelakis «Acoustics of ancient Greek and Roman theatres in use today», *4th joint meeting of ASA and ASJ. Honolulu*, (2006)

[17] A. Foteinou, D. Murphy «Perceptual validation in the acoustic modeling and auralization of heritage sites: The acoustic measurement and modeling of St. Margaret's Church, York, UK» in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

[18] N. Barkas, N. Vardaxis «Current operation of Ancient Greek Theatres: The problem of environmental noise», in *International Conference on The Acoustics of Ancient Theatres*, HELINA and EAA, (2011)

Μια προσέγγιση στην ακουστική εξέλιξη των αρχαίων Ελληνικών και Ρωμαϊκών Ωδείων 2

Γιώργος Καραδέδος(i), Βασίλης Ζαφρανάς(i), Παναγιώτης Καραμπατζάκης(i)
(i)Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ωδεία της Ρωμαϊκής εποχής, σε αντιδιαστολή από τα αρχαία Ελληνικά ωδεία τα οποία χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για μουσικές εκδηλώσεις, ήταν κλειστές αίθουσες πολλαπλών χρήσεων στις οποίες γίνονταν θεατρικές παραστάσεις, μελόδραμα, παντομίμα, απαγγελίες;, μουσικές εκδηλώσεις, απλή ανάγνωση θεατρικών κειμένων και άλλες παρεμφερείς εκδηλώσεις και παρέχοντας την δυνατότητα διεξαγωγής των εκδηλώσεων ακόμα και τους χειμερινούς μήνες ή κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Ήταν τα κλειστά θέατρα της Ελίτ της Ρωμαϊκής κοινωνίας η οποία από ένα σημείο και μετά δεν αρκούνταν στον διαχωρισμό της από τον απλό λαό σε προνομιούχες κερκίδες μέσα στα ανοικτά θέατρα.

Η εξέλιξη της τυπολογίας των ωδείων σχετίζεται με τις υπόστυλες αίθουσες των αρχαϊκών και κλασικών χρόνων (Τελευστήρια, Βουλευτήρια κ.α.) σε σχέση με τις οποίες έγινε μία διαχρονική προσπάθεια να απωθηθούν τα κεντρικά υποστυλώματα προς τα άκρα καθώς αποτελούσαν οπτικές και ακουστικές οχλήσεις.

Η έρευνα αυτή, εξετάζει με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων πρόγνωσης ακουστικών παραμέτρων, τις μεταβολές που ενδεχόμενα έχουν επιτευχθεί με την εξέλιξη της τυπολογίας των ωδείων (γεωμετρικά δεδομένα) και των υλικών κατασκευής ή των ειδικών επενδύσεων. Τέλος παρουσιάζεται μια ιδιαίτερη μορφή Ρωμαίικου ωδείου που ενδεχομένως αποτελεί, μια ευέλικτη, μεταβατική φάση στην εξέλιξη της μορφολογίας των Αρχαίων ωδείων.

An approach into the evolution of ancient and roman odea 2

ABSTRACT

Ancient Roman Odea, in contrast to ancient Greek ones which were used exclusively for musical events, were roofed buildings used for multiple purposes such as theatrical performances, singing exercises, musical shows and poetry competitions among others and they were designed to be in use all year long, in all weather conditions.

They were the closed theaters of the Roman elite which from some point in time onwards could not be contempt with just having privileged seats in the open public theaters.

The evolution of the typology of the Odeon is in close relation to the evolution of the large halls of archaic and classical years (such as Telesterion and Bouleuterion), in which there was a permanent trend to move the central pillars to the edges as these were seen as optical and auditory obstructions to the function of the room.

This paper examines the variations that have taken place with the evolution of the typology of the odea in the typology (geometry) and the materials of the constructions using mathematical models and sound prediction software analysis. Finally this paper presents a special type of Roman odeum, which potentially represents a flexible, transitional phase in the evolution of the morphology of the Ancient odeum

1. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αφορά μία προσέγγιση στην ακουστική εξέλιξη χώρων των Αρχαίων και Ρωμαϊκών χρόνων, που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν είτε για συνάθροιση κοινού, είτε για μουσικές εκδηλώσεις και τελικά έφτασαν να υποστηρίζουν πολλαπλές χρήσεις και θεάματα.

Επιλέχθηκαν να εξεταστούν 6+1 χώροι οι οποίοι αποτελούν τα χαρακτηριστικά βήματα της υπό εξέταση μορφολογίας. Τα τελικά μοντέλα της επεξεργασίας, κρατούν τις αρχικές διαστάσεις και τα κυριότερα χαρακτηριστικά

Οι χώροι που εξετάστηκαν είναι:

Πίνακας 1

α/α	**Χώρος**	**Τύπος**	***Αντιστοιχία***
1	Τελεστήριο	Μεγάλη υπόστυλη Αίθουσα	*«Ωδείο» Περικλή (5^{ος} π.Χ.)*
2	Εκλησιαστήριο	Μικρός ορθογονικός χώρος με ορθογωνικές κερκίδες.	*Εκλησιαστήριο* Πριήνης *(2^{ος} π.Χ.)*
3	Βουλευτήριο	Ορθογονικό κτίσμα με ημικυκλικές κερκίδες.	*Βουλευτήριο Μιλήτου (2^{ος} π.Χ.)*
4	Ωδείο Πεπλατυσμένο	Ορθογωνικό κτίριο πεπλατυσμένο κατά την έννοια του πλάτους	Ωδείο Άργους*(2^{ος} μ.Χ.)*
5	Ωδείο διάμηκες	Ορθογωνικό κτίριο πεπλατυσμένο κατά την έννοια του βάθους	Ωδείο Επιδαύρου *(2^{ος} μ.Χ.)*
6	Ωδείο ημικυκλικό	Ημικυκλικό ωδείο εσωτερικά και εξωτερικά.	Ωδείο Αφροδισιάδας *(3^{ος} μ.Χ.)*
7	Μεταβατικός τύπος	Μεταβατικός τύπος, ορθογωνικό	Ωδείο θερμών Δίου *(2^{ος} π.Χ.)*

		κτίριο με ημικυκλικές κερκίδες και περιγεγραμμένο περιστύλιο	

Η προσέγγιση έγινε με συγκριτική μέθοδο των αποτελεσμάτων των ακουστικών μοντέλων που επεξεργαστήκαν σε Η/Υ. Εξετάστηκαν οι παράμετροι Τ30 (χρόνος αντήχησης σε sec), D50 (καταληπτότητα σε %), Διαύγεια - Σαφήνεια (C80 σε dB) και Δίκτης Ισχύος (G10 σε dB). [1]

Για την περίπτωση του ωδείου των Θερμών του Δίου, εξετάστηκαν 3 περιπτώσεις, 1η με την ορθογωνική κάτοψη (πλήρες κτίριο), 2η με ανεπτυγμένο το πέτασμα (κουρτίνα), δηλαδή ημικυκλικό χώρο και 3η με ανεπτυγμένο το πέτασμα (ξύλο), δηλαδή και πάλι ημικυκλικό χώρο.

Τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα μόνο για μεταξύ τους σύγκριση, μιας και οι χώροι αναλύθηκαν με τα βασικά – στοιχειώδη υλικά και δεν απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες των χώρων.

Τα γεωμετρικά στοιχεία, προέρχονται από βιβλιογραφικές πηγές (G. Izenour, "Roofed Theatres of Classical Antiquity") [8] [9] και είναι εικαστικές προσεγγίσεις, που βασίζονται ωστόσο, σε πραγματικά μετρικά δεδομένα.

Στα μοντέλα, που σχεδιάστηκαν σε φυσική κλίμακα, αποδόθηκαν ακουστικές ιδιότητες όπως ακουστική απορρόφηση (σε %) και ακουστική διάχυση (σε %). Η διάχυση, όπου, δεν προέκυπτε από τον σχεδιασμό του χώρου, εκτιμήθηκε με τον αλγόριθμο που προτείνει το λογισμικό Catt. [2]

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Πίνακας 2

	125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Μάρμαρο	1	1	1	1	2	3
Ξύλινη επένδυση 25mm σε σανίδωμα	15	10	6	8	10	5
Τούβλο συμπαγές	2	2	3	3	4	5
Κουρτίνα 300gr/m²	15	45	90	92	95	95
Πλευρά ακροατηρίου	8	12	27	34	40	37
Ακροατήριο (65-70% πλήρες)	16	24	56	69	81	78

Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό Catt V8.00g. [2]

*****Τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα μόνο για μεταξύ τους σύγκριση, μιας και οι χώροι αναλύθηκαν με τα βασικά – στοιχειώδη υλικά και δεν απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες των χώρων.

2. Ιστορικά – Μορφολογική εξέλιξη

Τα ωδεία στη ρωμαϊκή εποχή, σε αντιδιαστολή με τα ανοικτά θέατρα , ήταν κτίρια στεγασμένα και για αυτό οι διαστάσεις τους ήταν περιορισμένες [3]. Σε αντίθεση με τα Ελληνικά ωδεία, τα οποία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σχεδόν

για την τέλεση μουσικών αγώνων, τα Ρωμαϊκά ωδεία ήταν στεγασμένες θεατρικές αίθουσες[i] ήταν ακριβέστερα αίθουσες πολλαπλών χρήσεων, στις οποίες μπορούσαν να πραγματοποιήσουν διάφορες εκδηλώσεις όπως απαγγελία, μουσική, χορός, θεατρικές παραστάσεις, μιμόδραμα, και παντομίμα [4], διδασκαλία κλπ. Υπάρχουν μάλιστα περιπτώσεις στις οποίες τα ωδεία λειτουργούσαν ως κανονικά θέατρα όταν το θέατρο της πόλης είχε καταστραφεί ή μετατραπεί σε αρένα [4].

Ο κτιριακός τύπος του ρωμαϊκού ωδείου αποτελεί εξέλιξη του ελληνικού Βουλευτηρίου [4] το οποίο με την σειρά του κατάγεται από τις μεγάλες ορθογωνικές υπόστυλες αίθουσες αττικού τύπου, όπως τα Τελεστήρια στα οποία ήδη από την εποχή του Πεισίστρατου υπάρχουν κλιμακωτές θέσεις σε ορθογωνική διάταξη, για τους πιστούς που παρακολουθούσαν τις τελετές. Στον τύπο των Τελεστηρίων άνηκε και το ωδείο του Περικλή στην Αθήνα το οποίο ήταν τετράγωνο κτίριο του 2^{ου} μισού του 5^{ου} π.χ. αιώνα διαστάσεων περίπου 62Χ62m, το οποίο ο Πλούταρχος το περιγράφει ως μία αίθουσα με πολλές θέσεις ακροατών και πολλούς κίονες οι οποίοι στέγαζαν την στέγη.

Η τέλεση μουσικών αγώνων, ήταν σχεδόν ο αποκλειστικός στόχος των ελληνικών ωδείων. Βασικά μειονεκτήματα των μεγάλων υπόστυλων αιθουσών ήταν ο μεγάλος αριθμός εσωτερικών υποστυλωμάτων, τα οποία περιόριζαν την οπτική και όπως θα δούμε παρακάτω την ακουστική άνεση των θεατών, καθώς και ο υπερυψωμένος φεγγίτης στο κεντρικό τμήμα της στέγης, απαραίτητος για να φωτίζεται το εσωτερικό τους λόγω των μεγάλων διαστάσεων τους.

Στο τέλος του 6^{ου} π.χ. αιώνα αρχίζει η αρχιτεκτονική των Βουλευτηρίων, τα οποία είναι αίθουσες στεγασμένες για την συγκέντρωση όλων των μελών της βουλής. Καθώς στέγαζαν μικρότερο αριθμό ατόμων από τα Τελαστήρια και τα Εκκλησιαστήρια, έχουν μικρότερες διαστάσεις, δίνοντας την δυνατότητα βελτίωσης της οπτικής και της ακουστικής άνεσης, με την μείωση του αριθμού των εσωτερικών υποστυλωμάτων και την απώθηση τους προς τα άκρα της αίθουσας. Τα Βουλευτήρια όπως και τα Τελεστήρια έχουν αναγκαστικά ορθογώνιο σχήμα εξωτερικά, ώστε να μπορεί να στηριχθεί η στέγη. Εσωτερικά όμως η διάταξη των καθισμάτων να είναι ορθογωνική όπως στα Τελεστήρια ή ημικυκλική, επηρεασμένη προφανώς από τα ανοικτά θέατρα, για τον σχεδιασμό των οποίων εφαρμόζονταν οι θεωρίες των Πυθαγορείων και από το τέλος του 4^{ου} π.χ. αιώνα οι θεωρίες του Αριστόξενου [4]. Έτσι το παλιό Βουλευτήριο της Αθήνας (τέλος 6^{ου} π.χ. αιώνα) ήταν μία υπόστυλη αίθουσα με ορθογωνική διάταξη καθισμάτων ενώ στο νεότερο (5^{ος} αιώνας π.χ.) η διάταξη των καθισμάτων ήταν ημικυκλική. Η αρχιτεκτονική των Βουλευτηρίων συνεχίζει εξελισσόμενη έως τη Ρωμαϊκή κατάκτηση με γνωστό όψιμο παράδειγμα το Βουλευτήριο της Μιλήτου (175-164 π.χ.).

Ένα ιδιόρρυθμο Βουλευτήριο – Εκκλησιαστήριο είναι το Θερσίλιον της Μεγαλοπόλεως [5] του 4^{ου} π.χ. αιώνα στον τύπο των μεγάλων υπόστυλων αιθουσών (52.5Χ66.5m) καθώς έπρεπε να στεγάσει τα 10.000 μέλη της Αρκαδικής συμπολιτείας. Η ακτινωτή διάταξη των εσωτερικών κιόνων, είναι μία λογική προσπάθεια μείωσης των οπτικών εμποδίων προς το βήμα του ρήτορα και ενδεχόμενα της ακουστικής άνεσης. Τα καθίσματα ήταν ξύλινα σε ορθογωνική διάταξη.

Ο κτιριακός τύπος του Βουλευτηρίου αποτέλεσε την βάση για την εξέλιξη τόσο του Ρωμαϊκού ωδείου όσο και του Ρωμαϊκού θεάτρου. Έτσι ενώ τα Ρωμαϊκά θέατρα παρουσιάζονται από την αρχή ημικυκλικά, εσωτερικά και εξωτερικά, τα Ρωμαϊκά ωδεία, παραμένουν με ορθογωνική εξωτερική μορφή έως το δεύτερο μισό του 2^{ου} μ.Χ. αιώνα καθώς δεν υπάρχει ακόμα η τεχνική δυνατότητα στέγασης ενός

ημικυκλικού χώρου.

Για να οδηγηθούμε από την αρχιτεκτονική των Βουλευτηρίων στον ολοκληρωμένο τύπο του Ρωμαϊκού ωδείου, με ημικυκλική εξωτερικά μορφή, παρεμβλήθηκαν κάποιοι ενδιάμεσοι εξελικτικοί τύποι. Στα πρώτα Ρωμαϊκά ωδεία όπως της Πομπηίας, της Επιδαύρου ή της Αγοράς της Αθήνας, ($1^{ος}$ π.χ. αιώνας) η αίθουσα γίνεται μακρόστενη κατά την έννοια του βάθους, επειδή η στήριξη των δοκαριών της στέγης γίνεται στους πλευρικούς τοίχους, με αποτέλεσμα να κόβονται τα πλαϊνά καθίσματα και να περιορίζεται το πλάτος της σκηνής. Το επόμενο βήμα της εξέλιξης του τύπου ήταν να μεταφερθεί η στήριξη των δοκαριών της στέγης στον πίσω τοίχο και στον τοίχο της σκηνής με αποτέλεσμα να γίνει η αίθουσα μακρόστενη κατά την έννοια του πλάτους. Οι πειραματισμοί αυτοί θα πρέπει οπωσδήποτε να σχετίζονται όχι μόνο με την προσπάθεια βελτίωσης της οπτικής άνεσης αλλά και της ακουστικής.[6]

Με δεδομένο ότι ήδη από τον $1^{ο}$ μ.Χ. αιώνα με την άνθηση του Νεοπυθαγορεισμού και την επανυπενθύμιση της θεωρίας περί ακουστικής του Αριστόξενου από τον Βιτρούβιο άρχισαν νέες προσπάθειες για την βελτίωση της ακουστικής των ανοικτών θεάτρων.

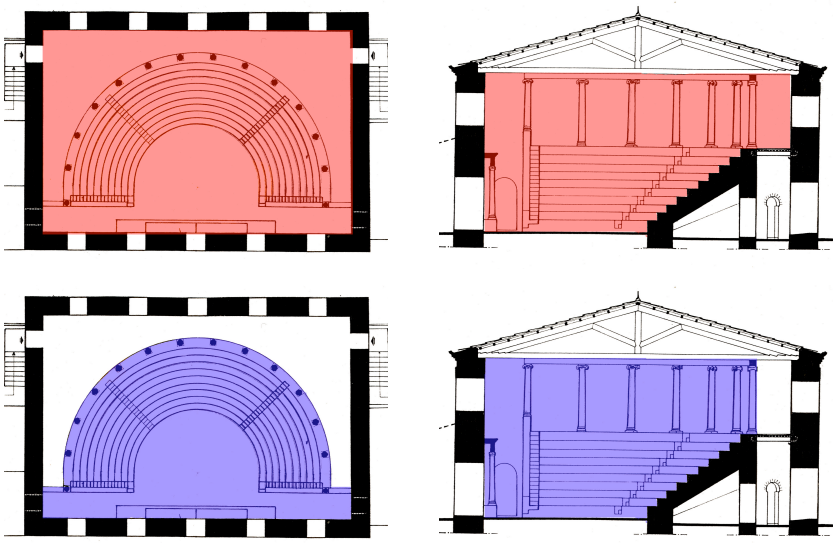
Το τελικό βήμα στην εξέλιξη του τύπου των ωδείων ήταν η αφαίρεση των περιμετρικών τοίχων σε σχήμα Π και η στήριξη της στέγης στον εξωτερικό πλέων ημικυκλικό τοίχο, γεγονός που όπως θα δούμε παρακάτω είχε σημαντικά αποτελέσματα στην βελτίωση της ακουστικής των στεγασμένων αιθουσών. [7]

Ταυτόχρονα η ύπαρξη ενός ιδιαίτερου χώρου που ανασκάφηκε στην πόλη του Δίου (Ν. Πιερίας) μας δίνει στοιχεία που υποστηρίζουν την εξέλιξη που προαναφέρθηκε.

Το ωδείο των θερμών του Δίου είναι ένα σημαντικό μνημείο του $2^{ου}$ μ,Χ. αιώνα, το οποίο παρά την ερείπιώδη κατάσταση στην οποία σώθηκε, έδωσε πολύ σημαντικά στοιχεία για την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων σε πολλά επίπεδα. Οι προσεγμένες κατασκευές του και η εφαρμογή για την κατασκευή του, χαράξεων, οι οποίες αποτελούν έναν συνδυασμό των χαράξεων σε εγγεγραμμένα τετράγωνα και τρίγωνα, που προτείνει ο βιτρούβιος για τα Ελληνικά και τα Ρωμαϊκά θέατρα, αντίστοιχα, δεν αφήνουν αμφιβολίες ότι ο αρχιτέκτονας προβληματίστηκε ιδιαίτερα για την βελτίωση της ακουστικής του.

Πρόκειται για μια αίθουσα ορθογωνική εξωτερικά, για λόγους στήριξης της στέγης, σχετικά μικρών διατάσεων (28,46Χ19,46 εξωτερικά), με ημικυκλική διάταξη των καθισμάτων του κοίλου. Η ύπαρξη ελεύθερης κιονοστοιχίας στην περίμετρο του κοίλου, αρχικά ερμηνεύτηκε ως μορφολογικό στοιχείο και ως βοηθητικό στοιχείο για την στήριξη της στέγης. Όμως είναι βέβαιο ότι η κιονοστοιχία αυτή, άσχετο από το αν τα επιστήλια της ήταν μαρμάρινα ή ξύλινα, καθώς δεν σώθηκε κανένα ίχνος τους, έδινε την δυνατότητα να στηριχτούν συρόμενα υφασμάτινα πετάματα τα οποία μετέτρεπαν κατά βούληση την ορθογώνια αίθουσα σε ημικυκλική. Στην παρούσα εργασία θα καλούμε το μοντέλο «ανοικτό» όταν το πέτασμα δεν έχει ανατηχθεί και η κάτοψη του χώρου είναι ορθογωνική και «κλειστό» όταν το πέτασμα έχει αναπτυχθεί και η κάτοψη έχει μετατραπεί σε ημικυκλική.

Εικόνα 1. κατόψεις και τομές του κλειστού (κάτω) και του ανοιχτού χώρου (επάνω).



Ως προς τα υλικά κατασκευής στο εσωτερικό της αίθουσας, μετά από σε βάθος μελέτης των ανασκαφικών δεδομένων, προκύπτει ότι:

1. Οι τοίχοι, σε "opus mixtum" ή " opus testaseum" ήταν επιχρισμένοι με ασβεστοκονίαμα, η τελική στρώση του οποίου είναι μαρμαροκονία.

2. Η τελική επίστρωση του δαπέδου της ορχήστρας, όπως προκύπτει από την στρωματογραφία, ήταν από ξύλα, τοποθετημένα πάνω σε υπόστρωμα από αργούς λίθους, καλυμβητούς σε ασβεστοκονίαμα, ενώ τα δάπεδα των παρόδων ήταν στρωμένο με οπτόπλινθους.

3. Το δάπεδο του περιμετρικού διαδρόμου, στο επάνω μέρος του κοίλου, ήταν ξύλινη κατασκευή (σανίδες πάνω σε ξύλινα δοκάρια).

4. Οι πλίθινες βαθμίδες των καθισμάτων του κοίλου, είχαν ξύλινη επένδυση, όπως τεκμηριώνεται από τον εντοπισμό οπών, μέσα στις οποίες σώθηκαν, υπολείμματα καμένων ξύλων. Στις οπές αυτές ήταν τοποθετημένα κομμάτια ξύλινων δοκαριών, στα οποία καρφώνονταν, η ξύλινη επένδυση. Αντίθετα οι βαθμίδες των τεσσάρων ακτινωτών κλιμάκων του κοίλου, οι οποίες ήταν επίσης πλήθυνες, δεν είχαν ξύλινη επένδυση, επειδή οι ακμές τους βρέθηκαν φθαρμένες από την πολύ χρήση.

5. Ο νότιος τοίχος της αίθουσας είχε υποτυπώδες προσκήνιο, με τέσσερις μαρμάρινους κίονες, περισσότερο διακοσμητικού χαρακτήρα και λιγότερο λειτουργικού, καθώς και τρεις θύρες οι οποίες εξασφάλιζαν την επικοινωνία με την αυλή των θερμών. Είναι πολύ πιθανό σε

υψηλότερη στάθμη, επάνω από τις θύρες και το προσκήνιο, να υπήρχαν παράθυρα για ελεγχόμενο, με ταμπλαδοτά παραθυρόφυλλα, φωτισμό της αίθουσας,

6. Η αίθουσα ήταν στεγασμένη με ξύλινη στέγη, όπως προκύπτει από το παχύ στρώμα από κάρβουνα, υπολείμματα καμένων δοκαριών και στάχτες, ανακατεμένα με κεραμίδια, το οποίο κάλυπτε όλη την έκταση του κτιρίου. Ο μεγάλος αριθμός σιδερένιων καρφιών μήκους από 8 έως 50 εκατοστά, κάνει πολύ πιθανή την ύπαρξη επίπεδης, ξύλινης οροφής, ίσως κοσμημένης, με φατνώματα, για την κάλυψη των ξύλινων ζευκτών, τόσο για λόγους αισθητικής, όσο και ακουστικής, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται τελείως η διαμόρφωση ξύλινης θολωτής οροφής, μόνο επάνω από τον χώρο του κοίλου και της ορχήστρας. [8]

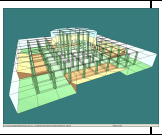
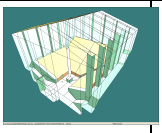
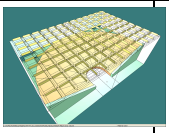
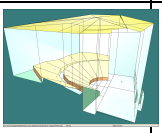
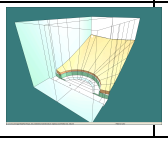
3. Ακουστική ανάλυση

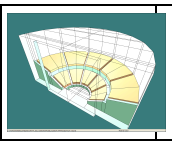
3.1 Ανάλυση των 6 χώρων (πλην του μεταβατικού)

Μετά το πέρας της διαδικασίας προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν την ακουστική στους εν λόγο χώρους. [9]

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των 6 χώρων που αρχικά εξετάστηκαν, περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3

				Περίοδος Κατασκευής (cen)	Όγκος (m^3)	Συνολική εσωτερική επιφάνεια (m^2)	Επιφάνεια ακροατηρίου (m^2)	V/S (m)
1	Pericles	Odeum / Telesterion		5th b.C.	25389	11388	1264	2,23
2	Prines	Ecclesiasterion		2nd b.C.	4502	2342	260	1,92
3	Miletus	Bueleterium		2nd b.C.	7077	3497	576	2,02
4	Argos	Odeum		2nd a.C.	6450	2339	323	2,76
5	Epidaure	Odeum		2nd a.C.	7971	2558	401	3,12

6	Aphrodisias	Odeum		3rd a.C.	15598	4509	576	3,46

(Σημ. ο ο συντελεστής V/S μπορεί να κληθεί και «συντελεστής πολυπλοκότητας» (V=εσωτερικός όγκος σε m^3, S= Συνολικό εμβαδόν εσωτερικών επιφανειών) [10]

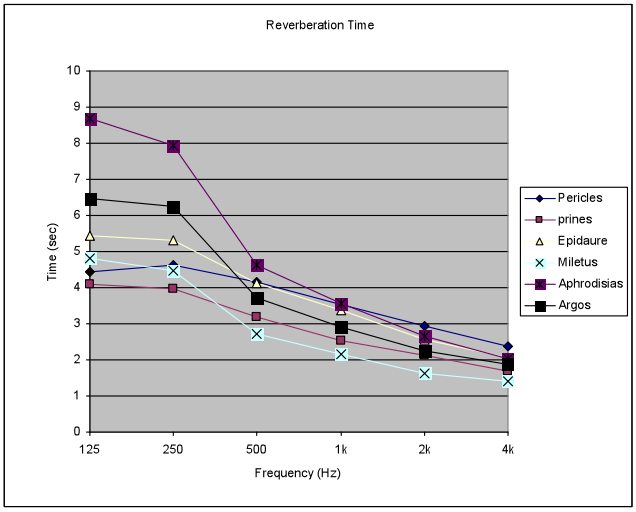
Οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν για τους χώρους του παραπάνω πίνακα είναι:

Χρόνος Αντήχησης T30 σε sec,

Πίνακας 4

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
1	4,44	4,62	4,16	3,52	2,94	2,39
2	4,10	3,96	3,19	2,52	2,13	1,69
3	3,73	3,76	2,61	2,06	1,61	1,42
4	6,47	6,24	3,73	2,90	2,26	1,86
5	5,43	5,31	4,11	3,37	2,57	2,07
6	8,69	7,93	4,62	3,57	2,67	2,02

Γράφημα 1

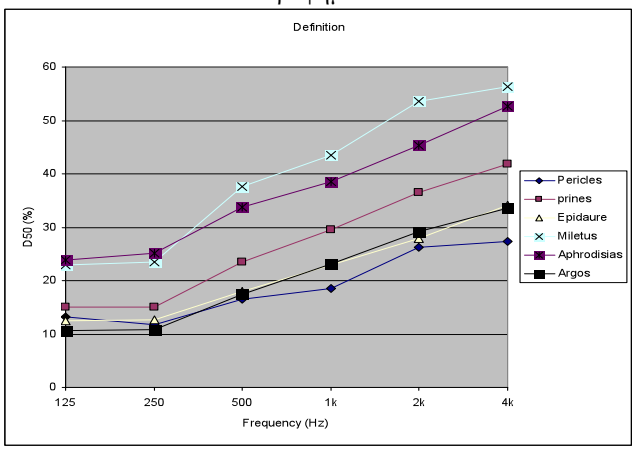


Καταληπτότητα D50 σε %,

Πίνακας 5

	125	250	500	1k	2k	4k
1	13,30	11,70	16,50	18,60	26,20	27,40
2	15,00	15,10	23,40	29,50	36,50	41,90
3	28,30	27,50	39,20	45,60	56,20	56,20
4	10,60	10,90	17,40	23,10	29,10	33,60
5	12,50	12,70	18,00	22,90	27,90	34,20
6	23,90	25,10	33,80	38,60	45,40	52,60

Γράφημα 2

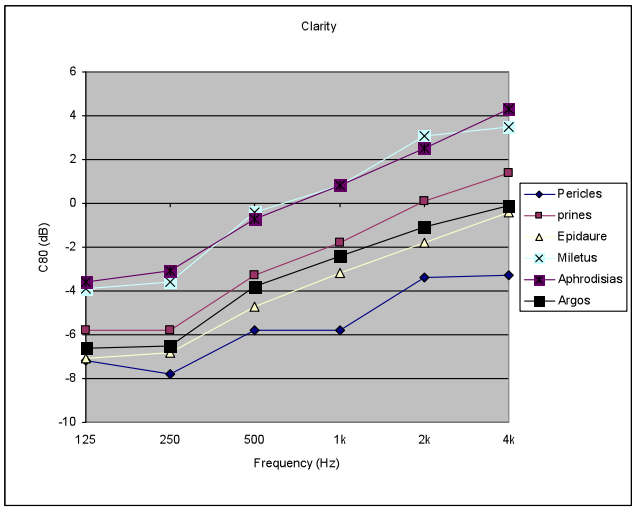


Διαύγεια – Σαφήνεια σε dB

Πίνακας 6

	125	250	500	1k	2k	4k
1	-7,20	-7,80	-5,80	-5,80	-3,40	-3,30
2	-5,80	-5,80	-3,30	-1,80	0,10	1,40
3	-2,50	-2,70	-0,10	1,30	3,40	3,60
4	-6,60	-6,50	-3,80	-2,40	-1,10	-0,10
5	-7,10	-6,80	-4,70	-3,20	-1,80	-0,40
6	-3,60	-3,10	-0,70	0,80	2,50	4,30

Γράφημα 3

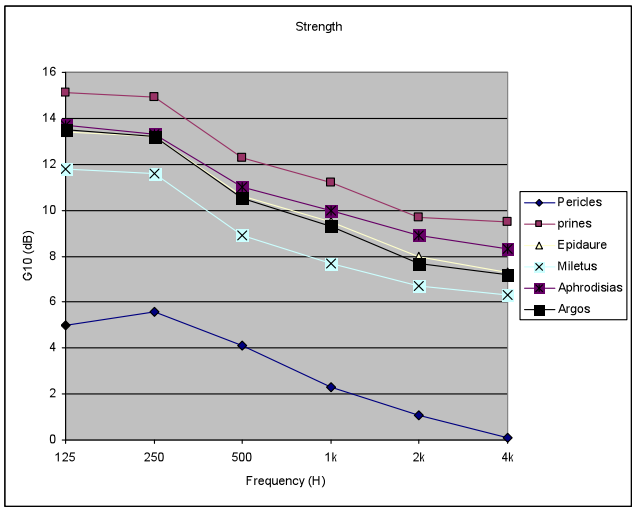


Δίκτης ισχύος G10 σε dB

Πίνακας 7

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
1	5,00	5,60	4,10	2,30	1,10	0,10
2	15,10	14,90	12,30	11,20	9,70	9,50
3	10,90	10,90	8,70	7,50	6,40	6,10
4	13,50	13,20	10,50	9,30	7,70	7,20
5	13,40	13,20	10,60	9,50	8,00	7,30
6	13,70	13,30	11,00	10,00	8,90	8,30

Γράφημα 4



3.2 Το ωδείο των Θερμών του Δίου.

Για τον μεταβατικό χώρο που ερευνήθηκε τα αρχιτεκτονικά δεδομένα ήταν περισσότερα και λεπτομερέστερα, λόγο της πρόσφατης και εκτενούς ανασκαφής που έγινε από τον κ Γ. Καραδέδο.

Οι διαφοροποιήσεις των σεναρίων που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν

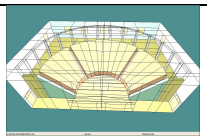
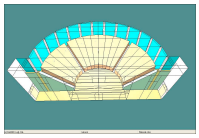
Πίνακας 8

α/α	**Χώρος**	**Τύπος**
A1	Ωδείο ανοικτό	Ωδείο με ορθογωνική κάτοψη και ημικυκλικές κερκίδες (Μίλητος)
A2	Ωδείο Κλειστό με κουρτίνα	Ωδείο ημικυκλικό.
A3	Ωδείο Κλειστό με ξύλινο πέτασμα	Ωδείο ημικυκλικό.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των πιθανών εκδοχών του χώρου, που υπολογίστηκαν, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9

				Περίοδος Κατασκευής (cen)	Όγκος (m^3)	Συνολική εσωτερική επ[ιφάνεια (m^2)	Επιφάνεια ακροατηρίου (m^2)	V/S (m)
A1	Ωδείο Δίου	Ανοικτό μοντέλο		2nd a.C.	2453	1642	167	1.49

								
A2	Ωδείο Δίου	Κλειστό μοντέλο (κουρτίνα)		2nd a.C.	1829	1214	167	1.51
A3	Ωδείο Δίου	Κλειστό μοντέλο (ξύλο)						

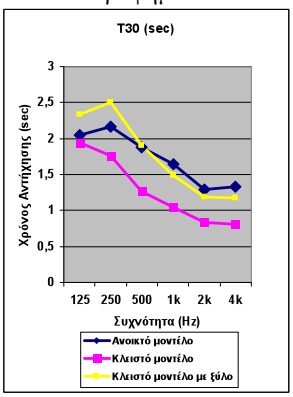
3.2.1 Αποτελέσματα:

Ο Χρόνος Αντήχησης T30 σε sec:

Πίνακας 10

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
A1	2,05	2,16	1,88	1,64	1,29	1,33
A2	1,95	1,76	1,26	1,04	0,83	0,81
A3	2,33	2,5	1,91	1,49	1,19	1,17

Γράφημα 5

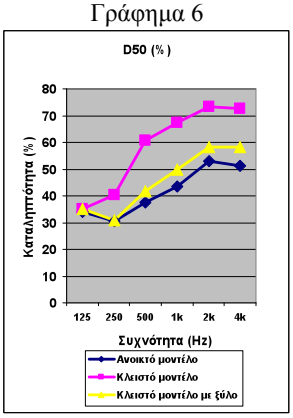


Η Καταληπτότητα D50 σε %

Πίνακας 11

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
A1	34	30,5	37,4	43,5	52,9	51,2
A2	35,1	40,4	60,7	67,4	73,4	72,6
A3	35	31	41,8	50	58,1	58,2

Γράφημα 6

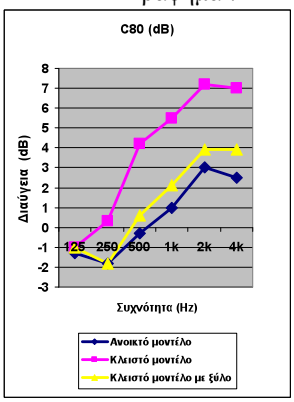


Η Διαύγεια – Σαφήνεια C80 σε dB

Πίνακας 12

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
A1	-1,3	-1,8	-0,3	1	3	2,5
A2	-1	0,3	4,2	5,5	7,2	7
A3	-1	-1,8	0,6	2,1	3,9	3,9

Γράφημα 7



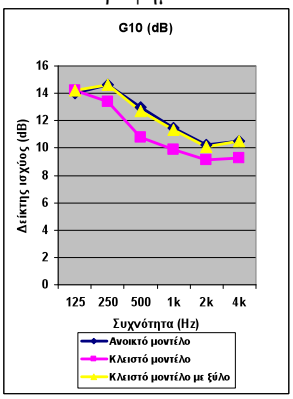
Ο Δείκτης ισχύος σε dB

Πίνακας 13

	125	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**
A1	14	14,6	13	11,5	10,2	10,5
A2	14,2	13,4	10,8	9,9	9,1	9,3

A3	14,2	14,6	12,7	11,3	10,1	10,5

Γράφημα 8



4 Συμπεράσματα

Από την πρώτη ανάγνωση των αποτελεσμάτων γίνεται φανερό ότι οι τιμές του χρόνου αντήχησης που καταγράφηκαν κατά την επεξεργασία των μοντέλων, δεν συναρτώνται άμεσα με το μέγεθος (όγκο) των χώρων. Έτσι ενώ θα ήταν λογικό να αναμένεται μεγαλύτερος χρόνος αντήχησης για το ωδείο του Περικλή, τον κατέχει το ωδείο της Αφροδησιάδας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο πηλίκο «όγκο ανά ακροατή» (O/A) λόγω του ότι μοναδικό απορροφητικό μέσο κατά την επεξεργασία ήταν το ακροατήριο. Στην αντίθετη πλευρά, μικρότερο χρόνο αντήχησης παρουσίαζαν το Βουλευτήριο της Μιλήτου και το Εκκλησιαστήριο της Πρίηνης λόγω μικρού όγκου και μικρού πηλίκου «όγκου ανά ακροατή».

Αντίθετα με τον χρόνο αντήχησης, οι παράμετροι D50 και C80 δείχνουν να βελτιώνονται κατά πολύ, μιας και η αριθμητική τους τιμή, μεγαλώνει, κατά την μετάβαση στον ημικυκλικό εσωτερικά και εξωτερικά, χώρο. Έτσι, η καταληπτότητα και η διαύγεια – σαφήνεια, ως ακουστικές παράμετροι, στο ωδείο της Αφροδησιάδας, δείχνουν να εξέχουν αρκετά των υπόλοιπων και να συγκρίνονται μόνον με αυτή του κατά πολύ μικρότερου σε όγκο Εκκλησιαστήριου της Μιλήτου.

Ο δείκτης G10 δεν παρουσιάζει κάποια έκπληξη και αποδεικνύει σαφώς, πως όλοι οι χώροι, βελτίωναν την ηχηρότητα της πηγής, πλην του χαώδους χώρου του ωδείου του Περικλή.

Μπορούμε να ισχυριστούμε δηλαδή ότι η μετάβαση στον ημικυκλικό τύπο, εξασφάλισε βελτίωση στις βασικές παραμέτρους της ακουστικής D50 και C80, πέραν των οπτικών ή και άλλων βελτιώσεων.

Στην περίπτωση του ωδείου των θερμών του Δίου, εξετάστηκαν δύο βασικές διαφοροποιήσεις, το ανοικτό μοντέλο και το κλειστό. Πράγματι στην περίπτωση του κλειστού χώρου με χρήση κουρτίνας, παρατηρείται μία μείωση του χρόνου αντήχησης από 5-20% για τις χαμηλές συχνότητες ενώ στις υψηλότερες φτάνει έως και 60%, με μέση βελτίωση 35%. Ταυτόχρονα οι παράμετροι D50 και C80 αυξάνουν τις τιμές τους κατά 35% περίπου ο D50 και κατά 2-5 dB ο C80. Ο δείκτης G10 μειώνεται ελάχιστα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απολύτως αναμενόμενο, λόγω της μείωσης του όγκου κατά 34% και της μεγάλης αύξησης της απορρόφησης.

Το ίδιο αποτέλεσμα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό είναι φανερό και στο

κλειστό μοντέλο με ξύλινα πετάσματα, Η βελτίωση που παρατηρείται στους δείκτες D50 και C80 είναι της τάξης του 8% για τον D50 και 1-3 dB για τον C80.

Με δεδομένη την θετική διαφορά του κλειστού από το ανοικτό μοντέλο, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το ωδείο των Θερμών του Δίου, εξ αιτίας της εύκολης και πρόδηλης δυνατότητας αλλαγής του, σε χώρο ακουστικά βελτιωμένο, θα μπορούσε να θεωρηθεί ένας μεταβατικός τύπος στην εξέλιξη των χώρων, σε ημικυκλική κάτοψη, εσωτερικά και εξωτερικά.

Συγγραφείς:

Γεώργιος Καραδέδος, Αρχιτέκτων μηχανικός, Αρχαιολόγος, αν. καθ. Τμήματος Αρχιτεκτόνων ΑΠΘ.

Παναγιώτης Καραμπατζάκης, Αρχιτέκτων Μηχανικός ΑΠΘ, Σύμβουλος ακουστικής, Ερευνητής.
Διεύθυνση: Θειρών 14, 56728, Θεσσαλονίκη – email: info@nestos.net , pkar38@arch.auth.gr – τηλ. 2310 282872, 6977327065

Βασίλειος Ζαφρανάς, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, BEng, MBA, Ερευνητής.
Διεύθυνση: Γραμματεία 5ου τομέα Τμήμα αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ., Πανεπιστημιούπολη ΑΠΘ 54006, Θεσσαλονίκη – email: zafranas@arch.auth.gr – τηλ. 2310 995446

:

Αναφορές - References

[1] ISO 3382 (E): Acoustics-Measurement of the Reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. 1997.
[2] CATT Acoustics, www.catt.se
[3] Γ. Καραδέδος, «Μετρολογικές παρατηρήσεις και γεωμετρικές χαράξεις στο ωδείο των Μεγάλων Θερμών στο Δίον» Νάματα, τιμητική έκδοση για τον καθ. Δ. Παντερμανλή, University studio press, Θεσσαλονίκη 2011, page 411.
[4] H.D. Blume, "Εισαγωγή στο αρχαίο θέατρο, (μετ. Μ. Ιατρού, Αθήνα 1993), pages 134-137, M. Bieber, " The History of Greek and Roman theatre", Princeton 1961 pages. 236-249
[5] G. Karadedos, Koukouli – Chrisanthaki, "from the Greek theatre to the Roman Arena: Theatres at Filippi, Thasos and Maroneia", 10th International conpress of Thracology "Thrace in the Graeco – Roman World", Athens 2007, pages 273-290.
[6] G. Karadedos "Tecnologia dell' antico teatro Greco". «EUREKA, il genio degli antichi", Archaeological Museum of Napoli, 11 Ιουλίου 2005 – 9 Ιανουαρίου 2005, Electa, Napoli, 2005, pages. 180-191 / Γ. Καραδέδος, « Η ακουστική και η οπτική άνεση ως παράμετρος σχεδιασμού του αρχαίου Ελληνικού θεάτρου» , Τεκτεθέντα, τιμητικός τόμος, Ξ. Σκάρπιά – Χόιπελ, Α.Π.Θ.
[7] Χ. Μπούρας, Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής, Ε.Μ.Π. Αθηνα. Pages 310-311

[8] Γ. Καραδέδος, «Το ωδείο των Θερμών στο Δίον» στο «Οι αρχαιολόγοι μιλούν για την Πιερία», ΝΕΛΕ Πιερίας, Θεσσαλονίκη 1990, pages 32-33.
[9] G. Izenour, "Roofed Theatres of Classical Antiquity", Yale University press, New Heaven, 1992
[10] P. Karampatzakis – V. Zafranas, "Did Hades accept visitors? The acoustical properties of the underground crypt of the Acheron Nekromanteion, Preveza, Greece." 5th Annual Meeting of the European Association of Archaeologists, Riva del Garda (Trento, Italy) [15/09/2009-20/11/2010] http://www.eaaitaly2009.com/.

Η Ακουστική των Αρχαίων Θεάτρων· ανασκόπηση επιστημονικών εξελίξεων

Αλεξάνδρα Γ. Σωτηροπούλου [1]
Γεώργιος Καμπουράκης[2]
Αλεξάνδρα Μ. Καφάση[3]

[1]επικ. καθ., Σχ. Αρχ/νων Μηχ/κών ΕΜΠ, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα,
alexia@central.ntua.gr
[2]αν. καθ., ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
gcamb@cs.ntua.gr
[3]σπουδάστρια, Σχ. Πολ. Μηχ/κών ΕΜΠ, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
alexandra_mets@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Επιστημονική προσέγγιση του στον τίτλο θέματος ανάγεται μόλις στα μέσα του 20ου αιώνα και συμπίπτει με τις ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία των μέσων αναπαραγωγής του ήχου. Στην πλειονότητα των οι μελετηταί εκθέτουν αποτελέσματα φυσικών ακουστικών μετρήσεων επιτόπιων και/ή μέσω προσομοίωσης σε Η/Υ· επίσης επιχειρούν ερμηνεία των μετρήσεων των σε σχέση με την αρχιτεκτονική του αρχαίου θεάτρου. Στην παρούσα μελέτη σταχυολογούνται θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης· όπως, η καταλληλότητα των εν χρήσει φυσικών ακουστικών παραμέτρων στην έρευνα της ακουστικής του αρχαίου θεάτρου, καθώς και η συστηματική ανάλυση της αντίληψης τας ακουστικής ποιότητας. Τα παρόντα συμπεράσματα είναι δυνατόν να αποτελέσουν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: *αρχαίο θέατρο, ακουστική.*

Review on the acoustics of ancient theatres

ABSTRACT

Scientific investigation on the acoustics of ancient theatres goes back only to the mid-20th century. This coincides with technological advances in sound reproduction systems. Most of studies involve physical acoustic measurements through computer simulation and/or in situ; researchers attempt to explain their findings in terms of the architecture of the theatre. There are identified questions that remain to be addressed, such as subjective evaluation of the acoustics of ancient theatres, suitability of physical room acoustic criteria in use, etc. The review concludes to hints for further research.

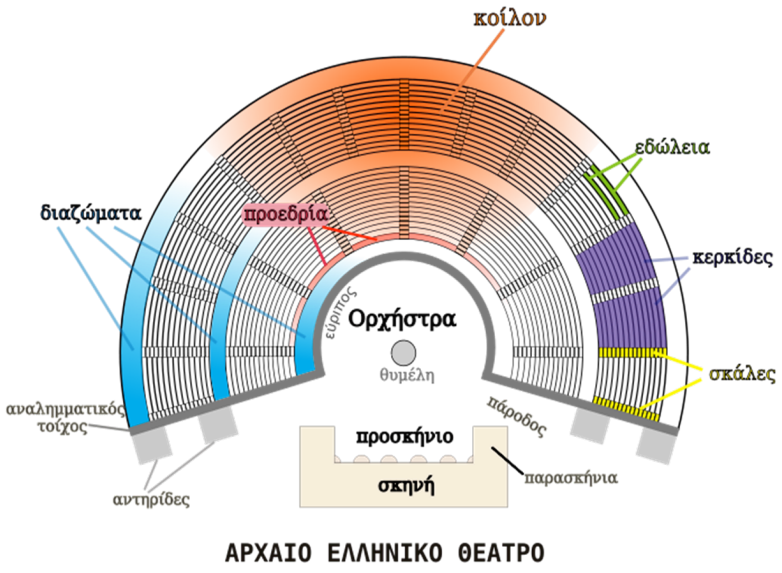
Keywords: *ancient theatre, acoustics.*

Εισαγωγή

Το αρχαίο ελληνικό θέατρο είναι γνωστό παγκοσμίως για την περίφημη ακουστική του. Γραπτές αναφορές από την αρχαιότητα που να εξηγούν την ακουστική των αρχαίων θεάτρων δεν υφίστανται, ενώ μέχρι και τον 19^{ο} αιώνα η προσέγγιση του θέματος αριθμεί ελάχιστες αναφορές και δεν βασίζεται σε επιστημονική μεθοδολογία. Με την εξέλιξη της ακουστικής ως επιστήμης στον 20^{ο} αιώνα, επιχειρείται επιστημονική προσέγγιση του θέματος, στην οποία συμβάλει η ραγδαία εξέλιξη των μέσων αναπαραγωγής του ήχου ιδίως στο δεύτερο ήμισυ του αιώνα. Το παρόν άρθρο αποτελεί μέρος επί διπλώματι εργασίας [1], σκιαγραφεί την εν λόγω επιστημονική διαδρομή και αποσκοπεί στο να ταυτοποιήσει θέματα που χρήζουν περεταίρω διερεύνησης. Η ανέγερση ενός σύγχρονου θεάτρου έχει πολλά να ωφεληθεί από τα διδάγματα του σχεδιασμού του αρχαίου θεάτρου.

1. Αρχαίο θεατρικό οικοδόμημα

Η ώριμη μορφή του αρχαίου θεάτρου διαμορφώνεται στον 5^{ο} π.Χ. αιώνα με αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το θέατρο του Διονύσου στην Ακρόπολη της Αθήνας [2].



Σχήμα 1.1 Τυπική κάτοψη αρχαίου θεάτρου

2. Εξέλιξη επιστημονικής έρευνας

2.1 Φυσικές ακουστικές παράμετροι

Οι κυριότερες φυσικές ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε μελέτες των αρχαίων θεάτρων είναι οι εξής. i) Δείκτης Αρθρώσεως της Ομιλίας (Articulation Index - A.I) που προτάθηκε κατά τη διάρκεια του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου για να διευκολύνει τις τηλεπικοινωνίες [3] · βέλτιστη τιμή: 100%. ii) Κλάσμα των Πρώτων Ανακλάσεων (50ms Early Energy Fraction - 50ms EEF) που προτάθηκε στη δεκαετία του 1950 για να εκφράσει την καθαρότητα (Deutlichkeit) του ήχου της ομιλίας [4]· βελτιστη τιμή: 50%. iii) Δείκτης Μετάδοσης της Ομιλίας (Speech Transmission Index - STI) που προτάθηκε στη δεκαετία του 1970 για να αποτιμήσει την ευκρίνεια (intelligibility) του ήχου της ομιλίας [5, 6]· βέλτιστη τιμή: 100%. iv) Λόγος των Πρώτων-προς-τις-Καθυστερημένες Ανακλάσεις (80ms Early-to-Late sound energy - 80ms E-to-L) [7] που προτάθηκε στη δεκαετία του 1970 για να αποτιμήσει την καθαρότητα του μουσικού ήχου· βέλτιστη τιμή: 0 dB. v) Χρόνος Αντήχησης (classical Reverberation Time -5 έως -35 dB - RT) που είναι από τα πρώτα φυσικά ακουστικά κριτήρια και προτάθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα [8] και vi) Η Στάθμη Εντάσεως (Sound Pressure Level - SPL).στο ακροατήριο, της απ' ευθείας φωνής ηθοποιού που στέκεται στη σκηνή [21]·βέλτιστη τιμή:τουλάχιστον 10dB πλέον της στάθμης του θορύβου βάθους.

2.1 Πρώτες προσεγγίσεις

Από τα λιγοστά πρώϊμα κείμενα που αναφέρονται στην ακουστική των αρχαίων θεάτρων, είναι η μελέτη του Ρωμαίου αρχιτέκτονα και θεωρητικού Βιτρούβιου [9] στον 1^{ο} μ.Χ. αιώνα. Η μελέτη είναι περιγραφική και εκφράζει τις απόψεις του Ρωμαίου συγγραφέα. Μόλις μετά τον 17^{ο} αιώνα, τον αιώνα του Διαφωτισμού, ο ήχος μελετάται σαν φυσικό φαινόμενο για πρώτη φορά από επιστημονική οπτική (Γαλιλαίος, Νεύτων, Laplace κλπ.). Όμως, μόλις στο τέλος του 19^{ου} αιώνα η αρχιτεκτονική ακουστική γίνεται επιστήμη χάρις στην ιδιοφυία του αμερικανού μαθηματικού και ακουστικολόγου Sabine [8]. Έτσι, στον αιώνα που ακολουθεί, κάνουν την εμφάνιση των μελέτες που εξετάζουν συστηματικά πλέον, την ακουστική του αρχαίου ελληνικού θεάτρου.

Από τις πρώτες, πλέον εμπεριστατωμένη μεταξύ αυτών μελέτη, είναι η εργασία του γάλλου ακουστικολόγου Canac στη δεκαετία του 1960 που συνοψίζεται στο βιβλίο του «L' acoustique des théâtres antiques» [10]. Ο Canac επιχειρεί να ερμηνεύσει τις αρχιτεκτονικές χαράξεις των αρχαίων θεάτρων, αφ' ενός με βάση τη φυσική θεωρία του ήχου και την αντίληψη αυτού, και αφ' ετέρου μέσω μετρήσεων της έντασης (intensité) και της ευκρίνειας του ήχου (compréhensibilité) που πραγματοποιεί επιτόπου και μέσω προπλασμάτων σε θέατρα ανά την μεσόγειο.

Την ίδια εποχή αντίστοιχες μελέτες υλοποιεί στην Ελλάδα ο καθηγητής της Σχολής Αρχιτεκτόνων του Μετσοβίου Πολυτεχνείου Dr Ing. Βασίλειος Παπαθανασόπουλος [11].

Στην δεκαετία που ακολουθεί, ήτοι στα 1970, ο Αμερικανός Izenour [12, 13], ειδικός στο σχεδιασμό θεάτρων, ασχολείται με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του

στεγασμένου θεάτρου της κλασικής αρχαιότητας. Η μελέτη συνοψίζεται στο βιβλίο του «Theater Design» και αποτελεί ευρεία προσέγγιση του θέματος εμπλουτισμένη και με αναφορές στην ακουστική των θεάτρων. Μεταγενέστερα, ήτοι στη δεκαετία του 1990 ο ίδιος συγγραφέας δημοσιεύει το επόμενο βιβλίο του στο ίδιο θέμα.

Ομοίως στην δεκαετία του 1970, ο ακουστικολόγος Shankland [14] πραγματοποιεί μετρήσεις του Δείκτη Αρθρώσεως της ομιλίας σε αρχαία θέατρα ανά τη μεσόγειο. και ερμηνεύει τα αποτελέσματα του σε σχέση με την αρχιτεκτονική των θεάτρων. Οι προτάσεις του συνοψίζονται στα εξής: πρώτον, η γεωμετρική χάραξη της περιοχής του ακροατηρίου συμβάλει στην εξαιρετική ακουστική ποιότητα του λόγου, δεύτερον, η ορχήστρα και η σκηνή συνεισφέρουν ευεργετικές έγκαιρες ανακλάσεις προς το ακροατήριο και τρίτον, ο χαμηλός θόρυβος βάθους ο οποίος υποστηρίζεται με τις απάνεμες βουνοπλαγιές όπου αναπτύσσεται το θέατρο, συμβάλλει ευεργετικά. Ο συγγραφέας διαπιστώνει την υπεροχή του αρχαίου θεάτρου έναντι του ρωμαϊκού· επίσης υπογραμμίζει την άρρηκτη σχέση μεταξύ οπτικών και ηχητικών ακτίνων σε χώρους αυτού του είδους.

Περεταίρω οι Cremer και Müller [15] στο βιβλίο των που δημοσιεύτηκε στις αρχές της δεκαετίες 1980 υπογραμμίζουν τις αρετές του αρχαίου Ελληνικού θεάτρου και ιδιαιτέρως του θεάτρου της Επιδαύρου, κάνοντας αναφορές στα στοιχεία σχεδιασμού του θεάτρου και στη συμβολή των στην καλή ακουστική απόδοση.

Οι ανωτέρω μελέτες, όπως όλες αυτού του είδους, χαρακτηρίζονται από τους περιορισμούς του συμφυείς με επιτόπιες μετρήσεις, ενώ τα μέσα μέτρησης δεν παρέχουν στον ερευνητή την άνεση της ψηφιακής τεχνολογίας που πρόκειται να ακολουθήσει. Επί πλέον, οι διαθέσιμές φυσικές ακουστικές παραμέτροι είναι στοιχειώδεις.

2.2 Πρόσφατες μελέτες

Οι πρακτικοί περιορισμοί οι συνυφασμένοι με επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις αίρονται στις πρόσφατες δεκαετίες χάρις στην εισαγωγή μεθόδων προσομοίωσης του ακουστικού πεδίου του θεάτρου, με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σχετικά αυξημένος αριθμός ερευνητών να στρέψουν το ενδιαφέρον των στην ακουστική του αρχαίου θεάτρου. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν επίσης ως αποτέλεσμα, τον εμπλουτισμό της βιβλιογραφίας με νέες φυσικές παραμέτρους που προτείνονται για να αποτιμήσουν την ακουστική ποιότητα σε χώρους ακροατηρίου. Ακολουθεί αναφορά σε μερικές μελέτες αντιπροσωπευτικές αυτής της κατεύθυνσης.(Πίνακες 2.1 και 2.2).

Ειδικότερα:

Η ερευνητική ομάδα του Erato project [18], επί τη βάσει των ακουστικών μετρήσεων των, επιβεβαιώνουν την εξαιρετική ευκρίνεια του ήχου στο αρχαίο θέατρο και σχολιάζουν ότι σε αυτό το εύρημα συνηγορεί ο χαμηλός Χρόνος Αντήχησης ο οποίος μάλιστα αναμένεται να μειώνεται περαιτέρω τη παρουσία ακροατηρίου. Επίσης παρατηρούν ότι ο Δείκτης Μετάδοσης της ομιλίας μπορεί να είναι εισέτι υψηλότερος, εάν αγνοηθεί ο θόρυβος βάθους κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Περαιτέρω, για τις μετρήσεις των στο θέατρο των Συρακουσών, υπογραμμίζουν οι ερευνηταί την αρνητική συμβολή στοιχείων που περιορίζουν τον υπαίθριο χαρακτήρα του θεάτρου, όπως π.χ. είναι η κιονοστοιχία στο πίσω μέρος του θεάτρου στην Ρωμαϊκή του εκδοχή. Ο αυξημένος χρόνος αντήχησης 1,67s με

ακροατήριο στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ανασταλτικά στο Δείκτη Μετάδοσης της Ομιλίας.

Πίνακας 2.1

ΑΡΧΑΙΑ ΘΕΑΤΡΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ Η ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ					
Α/Α	**Θέατρο**	**Χρονολογία**	**Χωρητικότητα (ακροατές)**	**Τοποθεσία**	**Ερευνητές**
1	Διονύσου	600 π.Χ	15000	Αθήνα	Shankland[14], Canac[10], Καμπουράκης et al[16]
2	Συρακουσών	500 π.Χ	10000	Συρακούσες, Σικελία (Ιταλία)	Gullo[17], Erato[18], Shankland[14]
3	Οινιάδων	400-500 π.Χ	4600	Οινιάδες, αρχαία πόλη Ακαρνανίας	Καμπουράκης et al[16]
4	Δελφών	400 π.Χ	5000	Δελφοί, Νομός Φωκίδας	Shankland[14], Izenour[12], Farnetari et al[19]
5	Εγέστης	400 π.Χ	3000	Έγεστα, αρχαία πόλη Σικελίας (Ιταλία)	Shankland[14], Izenour[12], Farnetari et al[19]
6	Επιδαύρου	340-330 π.Χ	13000-14000	Επίδαυρος, Νομός Αργολίδας	Canac[10], Shankland[14], Izenour[12], Βασιλαντωνόπουλος et al[20,21], Καμπουράκης et al[22], Declercq et al[23], Gade A.C et al [24]
7	Δωδώνης	300 π.Χ	18000	Δωδώνη, Ιωάννινα	Βασιλαντωνόπουλος et al[21]
8	Ταορμίνας	300 π.Χ	5000	Ταορμίνα, Σικελία (Ιταλία)	Shankland[14], Izenour[12], Farnetari et al[19]
9	Κουρίου	100 π.Χ	3500	Κούριον, αρχαία πόλη Κύπρου	Πολωκάρπου[25], Οικονόμου et al[26]
10	Γεράσης	91-100 μ.Χ	3000	Γεράσα, αρχαία πόλη Ιορδανίας	Erato[18], Lisa M. et al[27], Farnetari et al[19], Gade et al A.C[24]
11	Ασπένδου	161-180 μ.Χ	7000	Άσπενδος, αρχαία πόλη Αττάλειας, Μικρά Ασία	Erato[18], Gade A.C. et al[24,28], Farnetari[19] et al, Canac[10]

Πίνακας 2.2

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΡΧΑΙΩΝ ΘΕΑΤΡΩΝ								
Α/Α	**ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ/ΘΕΑΤΡΑ**	**ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ**, [Max - Min (Μέση Τιμή)]**						
		Α.Ι (%)	**SPL (dB)**	**RASTI (%)**	**STI (%)**	**RT (s)**	**80msE-to-L (dB)**	**50msEEF(%)**
1	Shankland[14] Επιδαύρου, Δελφών, Διονύσου, Συρακουσών, Ταορμίνας, Εγέστης	74-96 (85)	-	-	-	-	-	-
2	Χουρμουζιάδου[29] αρχιτεκτονική εξέλιξη από τα Μινωικά έως Ρωμαικά	-	38-53 (42,2) [2]	-	42-78 (68) [3] 40-72 (60)*	0,6-1,7 (0,94) [3] 0,3-0,9 (0,5)*	-	-
3	Erato project[18] Γεράσης, Συρακουσών, Ασπένδου	-	-	-	53-88 (65) [3] 61-93 (72) *	1,21-1,95 (1,63) [3] 0,86-1,59 (1,30) *	1,17-12,88 (5,0) [3] 4,08-18,12 (8,6)*	-
4	Βασιλαντωνόπουλος et al[20,21] Επιδαύρου	-	60-83 (71) [3] 47,3-62,2 (54) [3,4] 46,7-60,6 (53) [4]	70-93 (84)* 92-100 (94) 69,8-92,3 (85) [3] 79,2-98 (91,8)*	-	-	10-20 (13,0)* 15-20 (17,7) 7,1-19,6 (13,5) [3] 9,7-21,3 (16,8)*	75-100 (91) * 90-100 (97) 75-97 (91) [3] 87-98 (95)*
5	Βασιλαντωνόπουλος et al[21] Δωδώνης	-	51,1-61,9 (55) [3,4] 47,9-61,9 (54,2) [4]	77-93 (86) [3] 85,7-95,5 (92)*	-	-	9,9-20,3 (14,2) [3] 13-23,5 (17,3)*	85-97 (85)* [3] 91-99 (96)*
6	Πολωκάρπου [25] Κουρίου	-	53-63 (57) [5]	81-95 (83) [3] 55-79 (67)*	-	-	12-33 (19,4) [3] 16-30 (24,5)*	86-98 (95)* 1 94,7-99,8 (99)*
7	Καμπουράκης et al[22] Επιδαύρου	-	60-72 (64) [6]	74-20 (56)*	55-72 (64)	0,2-0,3 (0,27)	-	-
8	Καμπουράκης et al[16] Διονύσου	-	-	46-74 (55)*	-	0,1-0,5 (0,3) [3]	25,24-5,84 (14,3)*	-

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ: *: προσομοιώσεις, 1: χωρίς ακροατήριο **: βλέπε ενότητα 2.1, 2: στάθμη αναφοράς του ήχου 76dB (SWL, στα 500Hz oct.band) , 3: στάθμη αναφοράς τα ήχου 1m από την πηγή 105dB(A), 4: στάθμη αναφοράς του ήχου στην πηγή 73dB (linear : από 125Hz έως 4000Hz oct.band), 5:σήμα αναφοράς 1m από την πηγή 64dB (125Hz) ,67dB(250 Hz), 70dB(500Hz), 73dB(1000Hz), 76dB(2000Hz), 79dB(4000Hz) με ποικίλο συντελεστή κατευθυντικότητας, Η μέτρηση έγινε από 125Hz έως 4000 Hz oct.band, 6: σήμ αναφοράς στην πηγή, μοντέλο ανδρικής φωνής της βιβλιοθήκης πηγών του EASE 4.1.

Οι Gade και Angelakis [24] μετρούν τον χρόνο αντήχησης, το STI, 80ms E-to-L στα θέατρα της Ασπένδου, της Γεράσης, της Αρχαίας Επιδαύρου, της Μεγάλης Επιδαύρου. Οι μετρήσεις των επιβεβαιώνουν τα ευρήματα άλλων ερευνητών που μελετούν τα ίδια θέατρα. Η μελέτη καταλήγει σε σχόλια συσχέτισης των μετρήσεων με τα τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστηκα των θεάτρων.

Οι Χουρμουζιάδου και Kang [29], βασιζόμενοι στα πειραματικά των ευρήματα καταλήγουν ότι η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του αρχαίου οικοδομήματος συνάδει

με την ακουστική εξέλιξη αυτού. Σαν στοιχεία εξέλιξης ,αναφέρουν οι συγγραφείς, την χρήση σχετικά σκληρότερων υλικών (από το ξύλο στην πέτρα και το μάρμαρο), την σχετικά πιο κλειστή μορφή του θεάτρου, την σχετικά πιο υψηλή σκηνή και την σχετική αύξηση της κλίσης του κοίλου. Η εξέλιξη αυτή αναλογεί σε μια γενική αύξηση της Στάθμη Εντάσεως του Ήχου καθώς και της Αντήχησης στο χώρο.

Όσον αφορά στο θέατρο της Δωδώνης οι Βασιλαντωνόπουλος et al [21] καταλήγουν ότι είναι υποδεέστερο από αυτό της Επιδαύρου· αυτό αποδίδουν, στην περιορισμένη ηχοδιάχυση που παρέχει η γεωμετρία των καθισμάτων στο σχετικά εκτεταμένο κοίλο και διαδρόμους μεταξύ των κερκίδων.

Η ερευνητική ομάδα των Καμπουράκη et al [16] από τις μετρήσεις των στο θέατρο του Διονύσου καταλήγουν ότι, ο Δείκτης Μετάδοσης της Ομιλίας και το κλάσμα των Πρώτων Ανακλάσεων ποικίλουν διαμέσου του ακροατηρίου και είναι συνάρτηση της Στάθμης Εντάσεως του Ήχου και του περιβάλλοντος θορύβου στη θέση μέτρησης. Ειδικότερα αι ως άνω παράμετροι έχουν βέλτιστες τιμές στα καθίσματα πλησίον της ηχητικής πηγής. Επίσης, σχολιάζουν οι ερευνηταί, οι παράμετροι αυτές μεταβάλλονται για διάφορες θέσεις και διάφορους προσανατολισμούς του ηθοποιού πάνω στην ορχήστρα, ενώ για όλες τις θέσεις οι τιμές παραμένουν εντός ικανοποιητικών ορίων. Τέλος η ομάδα σχολιάζει ότι το θέατρο είναι ακατάλληλο για μουσικές παραστάσεις λόγω χαμηλών τιμών του Χρόνου Αντήχησης.

Όσον αφορά στο θέατρο της Επιδαύρου, μελέτες των Καμπουράκη et al[22], και Βασιλαντωνόπουλου et al [20, 21] καταγράφουν εξαιρετικά καλές τιμές των παραμέτρων που εξετάζονται. Ιδιαιτέρως, η μελέτη της ομάδας Καμπουράκη πιστοποιεί ότι στη μεσαία περιοχή του φάσματος υπάρχει ενίσχυση του ήχου ενώ στην χαμηλή περιοχή υπάρχει ηχοαπορρόφηση που αποδίδεται στη γεωμετρία των καθισμάτων. Αφ' ετέρου, η ομάδα Βασιλαντωνόπουλου καταγράφει εξ' ίσου καλές τιμές των μετρουμένων παραμέτρων, με την ομάδα Καμπουράκη· αυτό αποδίδει ο Βασιλαντωνόπουλος, αφ' ενός, στις έγκαιρες ανακλάσεις από το δάπεδο της ορχήστρας και τα μέτωπα των εδωλίων και αφ' ετέρου, στην ευεργετική επίδραση του διάχυτου ηχητικού πεδίου· όμως, επισημαίνει ο μελετητής, η εν λόγω διάχυση δεν μπορεί να εξηγηθεί πλήρως από τα γεωμετρικά ακουστικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιεί.

Η μελέτη του Πολυκάρπου [25] στο αρχαίο θέατρο του Κουρίου καταλήγει ότι το θέατρο έχει εξαιρετική ακουστική και αποτελεί ένα επιπλέον παράδειγμα όπου επιβεβαιώνονται οι αρετές σχεδιασμού του αρχαίου θεάτρου.

Ελάχιστοι ερευνηταί έχουν προσεγγίσει συστηματικά το θέμα της ακουστικής από την άποψη του ακροατού. Το κενό αυτό επισημαίνουν σύγχρονοι ερευνηταί· ειδικότερα ο Blesser [30] θεωρεί ότι ο ακροατής της αρχαιότητας με τα δικά του βιώματα είναι δύσκολο να προσομοιωθεί με έναν σύγχρονο ακροατή που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αναδρομικά στη διερεύνηση της ακουστικής αντίληψης. Αντίθετα, ο Blauert [31] θεωρεί ότι πρέπει να κατασκευασθεί ένα μοντέλο που να είναι ανεξάρτητο ακροατών, εποχής και συγκεκριμένων θεάτρων.

3. Συζήτηση-Συμπεράσματα

Τα ανωτέρω άρθρα επιβεβαιώνουν μέσω επιστημονικών μετρήσεων την άρτια ακουστική του αρχαίου θεάτρου· περαιτέρω, στα εν λόγω άρθρα επιχειρείται ερμηνεία των μετρήσεων μέσω αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών του θεάτρου· η ερμηνεία αυτή μπορεί να διαφωτίσει ως προς τον σχεδιασμό συγχρόνων εφαρμογών. Όμως, συστηματική μελέτη της συσχέτισης μεταξύ μετρήσεων και αρχιτεκτονικών στοιχείων του θεάτρου δεν αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία· αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο που στο μέλλον να δώσει σαφέστερες απαντήσεις για το σχεδιασμό του αρχαίου θεάτρου και για εφαρμογές του στο σύγχρονο θέατρο.

Άλλος περιορισμός στις αναφερόμενες μελέτες είναι το γεγονός ότι, οι φυσικές ακουστικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται έχουν ποικίλη προέλευση (βλέπε ανωτέρω ενότητα 2.1)· φυσικές παράμετροι που να εκφράζουν την ακουστική ποιότητα του αρχαίου θεάτρου χρήζουν περαιτέρω αναζήτησης.

Η διερεύνηση της ακουστικής ποιότητας στο αρχαίο θέατρο από την πλευρά του ακροατή, είναι γεγονός ότι αποτελεί μέλημα των περισσοτέρων ερευνητών· λόγου χάριν ο Canac [10] αναφέρει ότι ο Mounet-Sully όταν βρέθηκε στη σκηνή του θεάτρου της Orange στη Γαλλία βίωσε ένα υπέροχο ηχητικό τοπίο που ζήτησε να ετοιμασθεί το θέατρο άμεσα για να φιλοξενεί μεγάλες παραστάσεις αρχαίου δράματος. Αυτό το ηχητικό τοπίο, -συμπληρώνει ο Canac στο βιβλίο του, απομένει να προσδιορισθεί (on peut essayer de la definer). Εν τούτοις το θέμα της ταυτότητας της ηχητικής ποιότητας στο αρχαίο θέατρο δεν έχει τύχει ακόμα συστηματικής προσέγγισης.

Σε αντίθεση με το αρχαίο θέατρο, μελέτες που αναφέρονται σε σύγχρονες αίθουσες συναυλιών, έχουν παράγει αξιόλογη πρόοδο στο θέμα της κατανόησης της ακουστικής ποιότητας και αντίστοιχα του σχεδιασμού των αιθουσών [32]. Η υλοποίηση τέτοιων μελετών για το αρχαίο θέατρο θα μπορούσε πρώτον, να διαφωτίσει ως προς το ερώτημα της ταυτότητας της ακουστικής ποιότητας, δεύτερον, να αναδείξει υποκειμενικώς σημαντικές φυσικές ακουστικές παραμέτρους και τρίτον, να μας διδάξει σαφέστερα τις αρχές και τεχνικές σχεδιασμού του ανοικτού θεάτρου με χρήσιμες εφαρμογές στο σύγχρονο θέατρο.

Αναντίρρητα, ένα σύγχρονο ανοικτό θέατρο σχετικά μεγάλης χωρητικότητας, δεν θα διακινδύνευε να δοθεί προς χρήση χωρίς ηλεκροακουστική ενίσχυση. Υπάρχει τρόπος να παρακάμψει κανείς την τεχνητή ηχοενίσχυση, δανειζόμενος τις τεχνικές σχεδιασμού, για παράδειγμα του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου χωρητικότητας 14.000 ακροατών**;**

4. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τον τ. πρύτανη του Ε.Μ. Πολυτεχνείου καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Μουντζούρη και προς τον διευθυντή του εργαστηρίου Ηχοτεχνίας Ε.Μ. Πολυτεχνείου καθηγητή κ. Γεώργιο Πουλάκο, για την στήριξη στο έργο μας.

5. Αναφορές

[1] Καφάση Α. *Η Ακουστική των Αρχαίων θεάτρων, επί Διπλώματι εργασία,* επιβλέπουσα: επικ. καθ. Αλεξ. Σωτηροπούλου, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος (2012)

[2]Leacroft R. *Theatre and playhouse: an illustrated survey of theatre building from Ancient Greece to the present day / Richard and Helen Leacroft; with isometric reconstructions by Richard Leacroft* Methuen Drama, London (1984)

[3] French N.R. and Steinberg J.C. «Factors governing the intelligibility of speech sounds» J. Acoust. Soc. Am., pp 90-119 (1947)

[4] Thiele R. «Directional distribution and sequence of sound reflections in rooms» Acustica **3**, pp 291-302 (1953)

[5] Houtgast T., Steeneken H.J.M. «Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals» Acustica **25,** pp.355-367 (1971)

[6] Houtgast T., Steeneken H.J.M., Plompe P. «Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. I. General room acoustics» Acustica **46,** pp 50-72 (1980)

[7] Reichardt W.Von, Abdel Alim O., Schmidt W. «Definition und Messgrundlage eines objektives Masses zur Ermittlung der Grenze swischen brauchbarer und undrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung» Acustica **32,** pp 126 (1975)

[8] Sabine W.C. *Collected papers on acoustics* Harvard Univ. Press, Cambridge Mass (1927)

[9] Prestel Dr. Phil. *Zehn Bücher über Architectur der Marcus Vitruvius Pollio* Edition G.H. Heitz, Heitz und Mundel Strasbourg, (1912)

[10] Canac F. *L'Acoustique des théaâtres antiques: ses enseignements* Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris (1967)

[11] Papathanassopoulos V. «Sur l'acoustique des théâtres grecs» in Proceedings of the third International Congress on Acoustics Stuttgart, (1959) et 5e Congrès d'Acoustique, Liège (1965)

[12] Izenour G.C. *Theater design / by George C. Izenour ; With two essays on the Room Acoustics of Multiple-Use* McGraw-Hill, New York (1977)

[13] Izenour G.C. *Roofed Theatres of Classical Antiquity* Yale University Press, New Haven August (1992)

[14] Shankland R. «Acoustics of Greek Theatres» Physics Today **26**, pp.30-35 (1973)

[15] Cremer L., Müller H.A. (translated by T.J. Schultz) *Principles and applications of room acoustics* Vol. 1, Applied Science, London, (1982)

[16] Καμπουράκης Γ., Σωτηροπούλου Α., Δαλιάνης Σ.Α. «Η Ακουστική και η Καταληπτότητα του Διονυσιακού Θεάτρου της Ακρόπολης» in the Proceedings of the International Conference "The acoustics of ancient Theatres'', Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[17] Gullo M. «Acoustic Characterization of the Ancient Theatre at Syracuse» in the Proceedings of 'Acoustics 2008', Paris (2008)

[18] *Erato website: http://www.at.oersted.dtu.dk/~erato/index.htm*

[19] Farnetani A., Prodi N., Pompoli R. «On the Acoustics of ancient Greek and Roman Theatres» J. Acoust. Soc. Am. **124**, pp 1557-1567 (2008)

[20] Βασιλαντωνόπουλος Σ., Χατζηαντωνίου Π., Σκαρλάτος Δ., Ζακυνθινός Τ., Τάτλας Ν.Α., Μουρτζόπουλος Ι. «Μετρήσεις και Ανάλυση της Ακουστικής του Θεάτρου της Επιδαύρου» in the Proceedings of the International Conference "The acoustics of ancient Theatres", Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[21] Βασιλαντωνόπουλος Σ., Μουρτζόπουλος Ι. «A study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics» Acoustica **89**, pp 123-136 (2003)

[22] Cambourakis G., Sotiropoulou A., Savvopoulou A., Poulakos G., Tzouvadakis J., Stamos A. «Investigation of the Acoustics of the ancient theatre of Epidauros» in the Proceedings of the International Conference of "The acoustics of ancient Theatres", Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[23]Declercq N.F., Dekeyser C.S.A. «Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvelous acoustics» J. Acoust. Soc. Am. **121,** pp 2011-2022 (2007)

[24] Gade A., Angelakis K. «Acoustics of ancient Greek and Roman theatres in use today» 4th joint meeting of ASA and ASJ, Honolulu, Hawaii, 28 Nov. – 2 Dec. 2006

[25] Πολυκάρπου Π. *Ακουστικός Σχεδιασμός του Αρχαίου Θεάτρου Κουρίου της Λεμεσού Κύπρου,* Διπλωματική εργασία, επιβλέπων: .καθ. Μουρτζόπουλος Ι. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα Φεβρουάριος 2011

[26] Economou P., Charalampous P., Ioannides S., Polykarpou P. «The significance of sound diffraction effects in predicting acoustics in ancient theatres» in the Proceedings of International Conference "The acoustics of ancient Theatres", Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[27] Lisa M., Rindel H., Christensen C.L. «Predicting the Acoustics of Ancient Open-Air Theatres: The importance of calculation methods and geometrical details» in the Proceedings of Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2004, Mariehamn, Aland (2004)

[28] Gade A.C., Lisa M., Lynge C., Rindel J.H. «Roman Theatre Acoustics; Comparison of acoustic measurement and simulation results from Aspendos Theatre, Turkey» in the proceedings of "The 18th International Congress on Acoustics" ICA 2004, Kyoto Japan, (2004)

[29] Chourmouziadou K., Kang J. «Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres» Applied Acoustics **69**, pp 514-529 (2008)

[30] Blesser B. «An Analysis of the Aural Experience of Ancient Spaces» in the Proceedings of International Conference "The acoustics of ancient Theatres", Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[31] Bleuert J. «Cognitive aspects of listening in performance spaces» ιn the Proceedings of International Conference "The acoustics of ancient Theatres", Univ. of Patras, (υπό έκδοση)

[32] Sotiropoulou A., Hawkes R.J., Fleming D.B. «Concert Hall Acoustic Evaluations by Ordinary Concert-Goers: I Multidimensional Description of Evaluations» Acustica **81,** pp 1-9 (1995)

6ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012, ΕΛ.ΙΝ.Α.
Κέρκυρα, 8-10 Οκτωβρίου, 2012

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΟ ΑΡΧΑΙΟ ΘΕΑΤΡΟ ΕΠΙΔΑΥΡΟΥ

Σωτήριος Ψαρράς (1), Μερκούριος Κουντουράς (2)

1) ACOU Acoustics Engineering, Αθήνα
e-mail: acou@otenet.gr
2) HEAR Hellenic Acoustics Research, Θεσσαλονίκη
e-mail: mk@hear.gr

Περίληψη

Με κατεύθυνση να κατανοηθεί εις βάθος η τοπική επιρροή των περιβαλλοντικών παραγόντων και ο βαθμός που επηρρεάζουν τη διάδοση του ήχου με τη διαρκή εναλλαγή των μετεωρολογικών παραμέτρων και τα φαινόμενα διάθλασης εξαιτίας της θερμοκρασίας του αέρα, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, σε διαφορετικά υψομετρικά σημεία (σύγκριση κάτω με άνω διαζώματος), εγκαταστάθηκαν σε διαφορετικά σημεία του θεάτρου τρεις φορητοί μετεωρολογικοί σταθμοί για καταγραφή και περαιτέρω μετεπεξεργασία των παραμέτρων. Χρησιμοποιήθηκε, επίσης, θερμική κάμερα για να αποτυπωθούν χρωματικά σε εικόνα οι θερμοκρασίες των επιφανειών του κοίλου και της ορχήστρας.

Σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αντικειμενικών ακουστικών παραμέτρων όπως Clarity C_{80}, Definition D_{50}, STI, RASTI, G Strength και άλλες, με χρήση ηχητικής πηγής τοποθετημένης στο κέντρο της ορχήστρας και τρεία φορητά ηχόμετρα ως ηχητικοί δέκτες. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε αμφιωτική κεφαλή και σετ αμφιωτικών μικροφώνων για τη μέτρηση της παραμέτρου IACC.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις: Κατά τη Α' Φάση (15-17.6.2011) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με ασταθείες καιρικές συνθήκες και σχετικά χαμηλές για την εποχή θερμοκρασίες, χωρίς την παρουσία θεατών στο θέατρο. Η Β' Φάση (22-23.7.2011) πραγματοποιήθηκε πριν τη θεατρική παράσταση της Μήδειας ώστε να αποκαλυφθεί για πρώτη φορά, μέσω νέων επιστημονικών δεδομένων, ο αντικειμενικός ακουστικός χαρακτηρισμός του θεάτρου σε διαφορετικές συνθήκες παρουσίας κοινού.

Τα αποτελέσματα των ακουστικών και μετεωρολογικών μετρήσεων συγκρίθηκαν και παρουσιάζονται σε πίνακες και γραφήματα.

Λέξεις κλειδιά
Ακουστικές μετρήσεις
Απορρόφηση
Παρουσία/Απουσία κοινού
Περιβαλλοντικές/μετεωρολογικές μετρήσεις
Διάθλαση ήχου

1. Εισαγωγή

Οι ακουστικές και μετεωρολογικές μετρήσεις της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις:
Α' Φάση: Την 15η, 16η και 17η Ιουνίου του 2011 με ασταθείς καιρικές συνθήκες και χαμηλές για την εποχή θερμοκρασίες και με μεγάλες διαφοροποιήσεις (κατά την 24ωρη περίοδο): πυκνή νέφωση, περίοδο έντονης βροχόπτωσης ή πλήρους ηλιοφάνειας. Οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με στεγνή επιφάνεια εδάφους (στην ορχήστρα) εκτός της περιόδου μετά την ισχυρή βροχόπτωση (μεταξύ 14.00-15.00 στις 16.06.2011).
Β' Φάση: Την 22η και 23η του July 2011 με κανονικές, για την εποχή, καιρικές συνθήκες (+10°C διαφορά θερμοκρασίας αέρα, σε σχέση με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις ίδιες απογευματινές ώρες κατά τη Α' Φάση), με απουσία αλλά και παρουσία κοινού. Οι μετρήσεις με παρουσία κοινού πραγματοποιήθηκαν με εκτιμώμενη συμμετοχή από 300 έως και 3.500 θεατών 10 λεπτά πριν την έναρξη της θεατρικής παράστασης «Μήδεια». Η επιφάνεια του εδάφους της ορχήστρας βράχηκε με νερό καθώς αυτό αποτελεί συνήθη τεχνική σκηνής για τις παραστάσεις βελτιώνοντας την ακουστική ανάκλαση προς το κοινό.

2. Μέθοδοι

2.1 Εξοπλισμός

Το σύνολο των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω εμπορικά διαθέσιμου μετρητικού εξοπλισμού εγκεκριμένου τύπου.

Ακουστικές Μετρήσεις

3 x Φορητός Αναλυτής Χειρός Brüel & Kjær Τύπος 2270-E με λογισμικό Προηγμένης Καταγραφής BZ-7225 και Επιλογή Ηχογράφησης BZ-7226
1 x Φορητός Αναλυτής Χειρός Brüel & Kjær Τύπος 2250-E με λογισμικό Προηγμένης Καταγραφής BZ-7225 και Επιλογή Ηχογράφησης BZ-7226
2 x Μικρόφωνο Υπαίθρου Brüel & Kjær Τύπος 4952
2 x Κιτ Μικροφώνου Υπαίθρου Brüel & Kjær UA-1404
1 x Ηχητική Πηγή OmniPower Brüel & Kjær Τύπος 4292
1 x Ενισχυτής Brüel & Kjær Τύπος 2716
1 x Προσομοιωτής Κεφαλής και Κορμού Brüel & Kjær Τύπος 4100
1 x Αμφιωτικό Μικρόφωνο Brüel & Kjær Τύπος 4101
2 x Βαθμονομητής Ήχου Brüel & Kjær Τύπος 4231
1 x Λογισμικό Ακουστικής Χώρων Dirac v.5 Brüel & Kjær Τύπος 7841
1 x Κάρτα Ήχου MOTU Traveler 8ch I/O Firewire
1 x Notebook Windows 7

Μετεωρολογικές Μετρήσεις	**Μετρήσεις Αποστάσεων**	**Παρελκόμενα**	**Πιστοποιημένη Διακρίβωση**
3 x Μετεωρολογικός σταθμός Davis Vantage Vue	2 x Αποστασιόμετρο Laser Leica Disto	Θήκη παντός καιρού Brüel & Kjær Τύπος 3535-A, 1 x ιστός <15m, 1 x τρίποδας <7m, 4 x τρίποδας < 1,5m, καλώδια ήχου και ρεύματος κ.α.	Οι Αναλυτές Brüel & Kjær Τύποι 2250/70, τα Μικ-ρόφωνα Τύπος 4952 και ο βαθμονομητής Τύπος 4231, διέθεταν πιστοποιημένες διακριβώσεις.
1 x Καταγραφέας Davis Envoy8x			
1 x Notebook Windows 7			

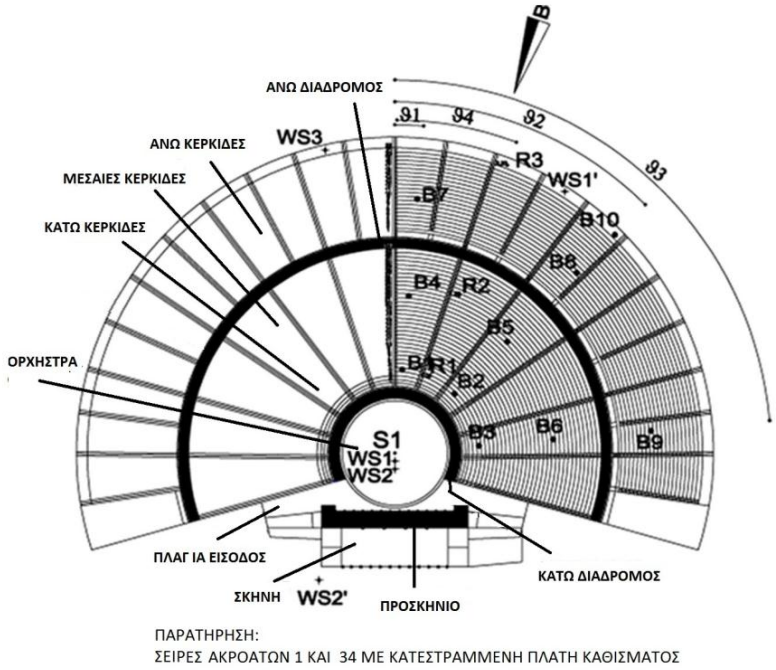
Πίνακας 1 – Εξοπλισμός

2.2 Μεθοδολογία Ακουστικών Μετρήσεων

2.2.1 Α' Φάση Μετρήσεων (Θέατρο χωρίς παρουσία κοινού)

Το σύστημα ακουστικών μετρήσεων περιελάμβανε 3 φορητά ηχόμετρα B&K ως δέκτες R1, R2, R3, έναν προσομοιωτή κεφαλής και κορμού B&K με ένα σετ αμφιωτικών μικροφώνων για τις αμφιωτικές μετρήσεις B1-10 και ένα δωδεκάεδρο ηχείο B&K ως ηχητική πηγή S1 τοποθετημένη στο κέντρο της ορχήστρας (1,7μ από την επιφάνεια του εδάφους) (Σχ.1). Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και στην αρχαιότητα η βασική δραματική παράσταση όπως και οι ομιλίες διαδραματίζονταν στο προσκήνιο, λόγω της τωρινής απουσίας του αλλά και εξ αιτίας της σχετικής προγενέστερης επιστημονικής έρευνας[1,2], τοποθετήθηκε η ηχητική πηγή στο κέντρο της ορχήστρας. Χρησιμοποιήθηκαν τρία ηχόμετρα ως ηχητικοί δέκτες. Το ηχητικό σήμα (α. Λογαριθμικό ημιτονοειδές sweep διάρκειας 11δ / 20δ και β. ροζ θόρυβος στα 105 dB-Laeq(10δ)/1μ), η επίκτηση των δεδομένων, η επεξεργασία και εξαγωγή των ακουστικών δεικτών πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού B&K Dirac. Το λοιπό μέρος της μετρητικής αλυσίδας σήματος περιελάμβανε μικρόφωνα υπαίθρου συνδεδεμένα εξ αποστάσεως με τα ηχόμετρα μέσω εγκεκριμένων από τον κατασκευαστή καλωδίων για αποφυγή αλλοιωμένου μετρητικού σήματος. Τα ηχόμετρα συνδέθηκαν στις εισόδους της κάρτας ήχου MOTU Traveler μέσω ποτενσιόμετρων «κλιμακούμενης» προενίσχυσης για την αποφυγή απορύθμισης της στάθμισης του τελικού βαθμονομημένου μετρητικού συστήματος.

.



	ΘΕΣΕΙΣ ΔΕΚΤΩΝ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΗΓΗ(μ)
ΚΑΤΩ ΚΕΡΚΙΔΕΣ LOW LEVEL TIERS	R1 - ΜΟΝΟΚΑΝΑΛΟ	15.63
ΜΕΣΑΙΕΣ ΚΕΡΚΙΔΕΣ MIDDLE LEVEL TIERS	R2-ΜΟΝΟΚΑΝΑΛΟ	31.75
ΑΝΩ ΚΕΡΚΙΔΕΣ UPPER LEVEL TIERS	R3-ΜΟΝΟΚΑΝΑΛΟ	57.60
ΟΛΕΣ ΟΙ ΚΕΡΚΙΔΕΣ ALL TIERS	B1-B10 ΑΜΦΙΩΤΙΚΑ	B1, B2, B3 : 15.63 B4, B5, B6 : 29.42 B7, B28, B9 : 47.59 B10 : 57.60
ΓΩΝΙΑ(κατά προσέννιση) ANGLE (approximately)	$\Theta1=5^0$ $\Theta2=45^0$ $\Theta3=85^0$ $\Theta4=21^0$	
S1	ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΗΓΗ	(H: +1.70)
WS 1 (15-17.07.11) WS 1' (22-23.07.11)	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ 1, 1'	(H: +2.00 m)
WS 2 (15-17.07.11) WS 2' (22-23.07.11)	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ 2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ 2'	(H: +7.00 m) (H: +2.00 m)
WS 3 (15-17.07.11)	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ 3	(H: +2.00 m)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:
ΣΕΙΡΕΣ ΑΚΡΟΑΤΩΝ 1 ΚΑΙ 34 ΜΕ ΚΑΤΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΠΛΑΤΗ ΚΑΘΙΣΜΑΤΟΣ

Σχ. 1 – Κάτοψη θεάτρου/θέσεις μετρήσεων

Πριν την έναρξη των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία βαθμονόμησης στο πεδίο που περιελάμβανε τρείς διαδοχικές βαθμονομήσεις:

Α. Βαθμονόμηση της κάρτας ήχου μέσα από το λογισμικό Dirac.

Β. Βαθμονόμηση απόλυτης στάθμης των ηχομέτρων με το βαθμονομητή ήχου B&K.

Γ. Βαθμονόμηση του σήματος για μέτρηση της παραμέτρου StrenGth. Τα ηχόμετρα ή τα μικρόφωνα υπαίθρου (με τις προεκτάσεις καλωδίων εντός της μετρητικής αλυσίδας) τοποθετήθηκαν στο ίδιο ύψος και σε απόσταση 1μ γύρω από το δωδεκάεδρο στον ημισφαιρικό άξονα χ/ψ στις -90, 0 και 90 μοίρες (όπου 0 μοίρες = από το κέντρο της ορχήστρας με μέτωπο προς το κοίλο).

Αναφορικά στις τρεις θέσεις δεκτών R1-R3, σκοπός ήταν η μέτρηση – σε επιλεγμένα χρονικά μεσοδιαστήματα – των ακουστικών παραμέτρων σε 'σταθερές' θέσεις διαφορετικής απόστασης και υψομετρικής διαφοράς από την πηγή. Όσον αφορά στις αμφιωτικές μετρήσεις, αυτό που ενδιέφερε κυρίως ήταν η χωρική διανομή της διαφοροποίησης των παραμέτρων. Μαζί με τις προγραμματισμένες μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αρκετές δοκιμαστικές μετρήσεις ελέγχου, με χρήση του 4^{ου} ηχομέτρου:

i. Μετρήσεις καταγραφής του υποβάθρου περιβαλλοντικού θορύβου.
ii. Μετρήσεις καταγραφής των τυπικών σταθμών και φασμάτων θεατρικής ομιλίας.
iii. Μέτρηση της ακουστικής επιστροφής στην ορχήστρα (έμφαση στον καλλιτέχνη).
iv. Μέτρηση καταγραφής της «ηχοδιαδρομής» στο κοίλο ξεκινώντας από την κορυφή και καταλήγοντας στην ορχήστρα, με σκοπό τη μέτρηση της διαφοράς της φασματικής απόκρισης σε διαφορετική απόσταση/ύψος (σχ.15).
v. Μέτρηση του δείκτη G στο ημισφαίριο του άξονα ζ/ψ και σε ακτίνα 15μ κατά μήκος της διεύθυνσης του ανέμου προκειμένω να ερευνηθεί η μετεωρολογική συνεισφορά στην τοπική διάδοση του ήχου που παραγόταν από την ηχητική πηγή στο κέντρο της ορχήστρας (σχ.14).

2.2.2 Β' Φάση Μετρήσεων (Θέατρο με παρουσία κοινού έως και περίπου 3.500 θεατών)

Εξαιτίας περιορισμών στην τοποθέτηση του μετρητικού εξοπλισμού και στην πραγματοποίηση των πραγματικών μετρήσεων μόλις λίγα λεπτά πριν την πρεμιέρα της θεατρικής παράστασης «Μήδεια», έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί η μετρητική διάταξη. Ως αποτέλεσμα, οι ακουστικές παράμετροι μετρήθηκαν σε τρεις θέσεις δεκτών (2 μονοκάναλες και 1 αμφιωτική): R1, R2 και B4. Επιπλέον, τοποθετήθηκαν άλλα δύο ηχόμετρα στο άνω μέσο διάζωμα και στην άνω τελευταία σειρά προκειμένω να μετρηθούν και να καταγραφούν οι ηχητικές στάθμες. Ο περιορισμός της πρόσβασης στην ορχήστρα πριν την παράσταση δεν επέτρεψε τη βαθμονόμηση του συστήματος για μέτρηση της παραμέτρου StrenGth και, επιπλέον, το λογαριθμικό ημιτονοειδές sweep μειώθηκε από 20 σε 11 δευτερόλεπτα προκειμένω να μειωθεί η προκαλούμενη όχληση στο κοινό.

2.2.3 Μετρηθείσες αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι

Οι αντικειμενικές ακουστικές παράμετροι που εξήχθησαν και εξετάσθηκαν με χρήση του λογισμικού Dirac [3,4,5], ήταν:

(1) Στάθμη Ηχητικής Πίεσης L_{Aeq}, L_{AF} και L_N (ευρυζωνικά και ανάλυση 1/3 οκτάβας).

(2) Χρόνος Κέντρου Centre Time (Ts), ο χρόνος του ενεργειακού κέντρου βαρύτητας της τετραγωνισμένης κρουστικής απόκρισης, που επίσης ονομάζεται "Schwerpunktzeit" (ευρυζωνικά και ανάλυση 1/3 οκτάβας). [6].

(3) Ενίσυχη, Strength (G) ο λογαριθμικός λόγος της ολοκληρωμένης ηχητικής ενέργειας της υπό μέτρηση κρουστικής απόκρισης προς την αντίστοιχη σε απόσταση 10 m από την ίδια ηχητική πηγή σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (ανάλυση 1/1 οκτάβας) [6].

(4) Ευκρίνεια, Definition (D_{50}) ο λόγος αρχικής-προς-συνολικής ηχητικής ενέργειας, που επίσης ονομάζεται "Deutlichkeit" (ανάλυση 1/1 και 1/3 οκτάβας).

(5) Διαύγεια, Clarity (C_{80}) ο λόγος αρχικής-προς-καθυστερημένης ηχητικής ενέργειας (ανάλυση 1/1 και 1/3 οκτάβας) [6,7,8].

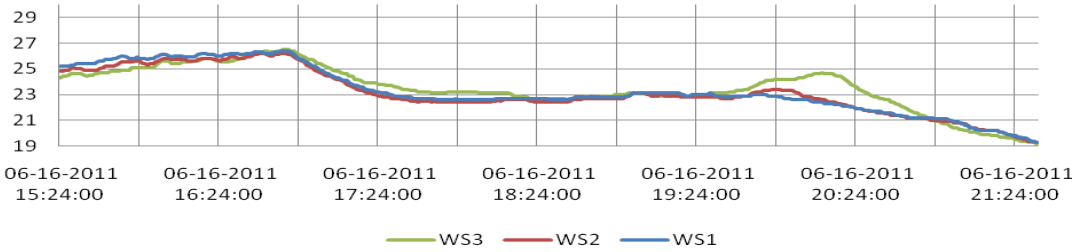
(6) Χρόνοι Αντήχησης T_{20} και T_{30} προερχόμενοι από το τμήμα καμπύλης απόσβεσης 5-25 dB και 5-35 dB αντίστοιχα κάτω από το αρχικό επίπεδο (ανάλυση 1/1 και 1/3 οκτάβας).

(7) Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας, Speech Transmission Index (STI) και οι απλοποιημένες παραλλαγές του STI που καλύπτουν λιγότερες φασματικές ζώνες και/ή διαφορετικές συχνότητες διαμόρφωσης: Rapid Speech Transmission Index (RASTI), STI Male/Female, STI for public address systems (STIPA Male/Female) (ανάλυση 1/1 οκτάβας) [9,10,11,12].

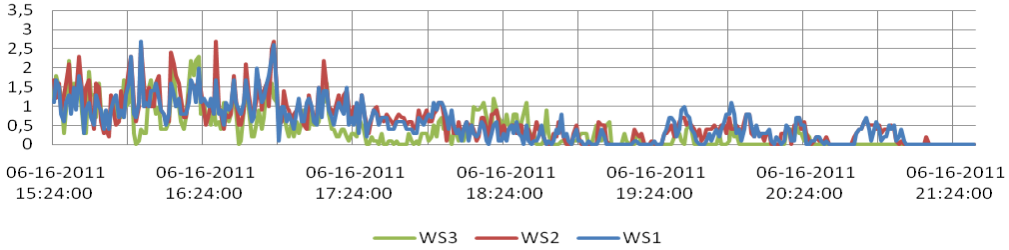
(8) Συντελεστής Διωτικής Συσχέτισηςς, Inter-Aural Cross Correlation Coefficient (IACC) με χρήση αμφιωτικής τεχνικής για μέτρηση δύο σημάτων προσομοιώνοντας την ακρόαση από το αριστερό και δεξί αυτί των αρχικών ανακλάσεων/του τμήματος αντήχησης (με το χρονικό διάστημα να ορίζεται στα 50 και 80ms) (ανάλυση 1/1 και 1/3 οκτάβας).

2.3 Μεθοδολογία Μετεωρολογικών Μετρήσεων

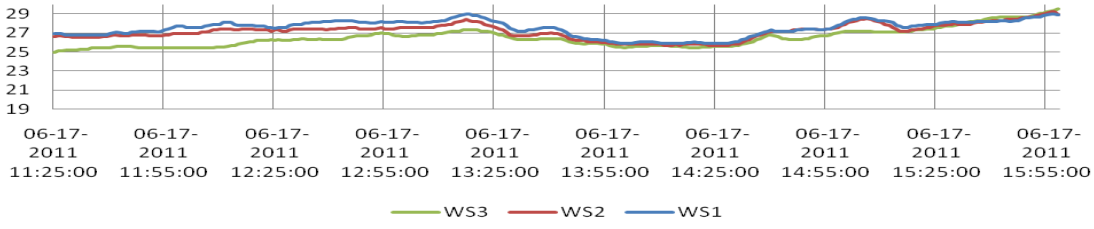
Το σύστημα μετεωρολογικών μετρήσεων αποτελούνταν από τρεις φορητούς μετεωρολογικούς σταθμούς στις θέσεις WS1, WS2 και WS3 (σχ.1) καταγράφοντας εν συνεχεία μέσους όρους, μέγιστα και ελάχιστα μέσων όρων ενός λεπτού των ακόλουθων παραμέτρων: θερμοκρασία αέρα, υγρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, τοποθετημένοι σε θέσεις διαφορετικού υψομέτρου για τις ακόλουθες χρονικές περιόδους: 15.06.2011 10:17:00 έως 17.06.2011 17:28:00 (Σχ.2-5) και 22.07.2011 18:16:00 έως 23.07.2011 19:07:00 (Σχ.6-8).



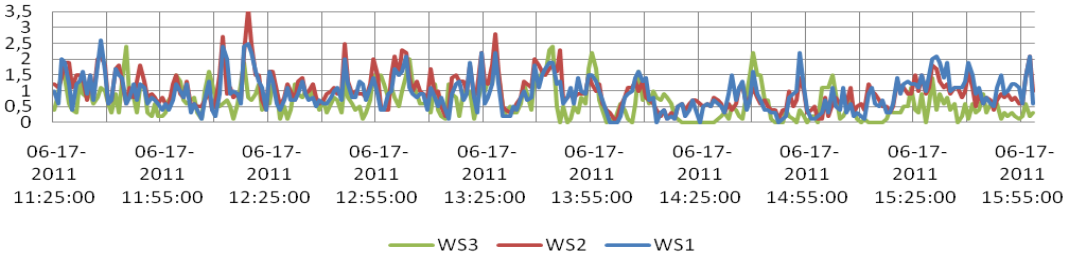
Σχ. 2 – Θερμοκρασία °C/ώρα 16.06.2011



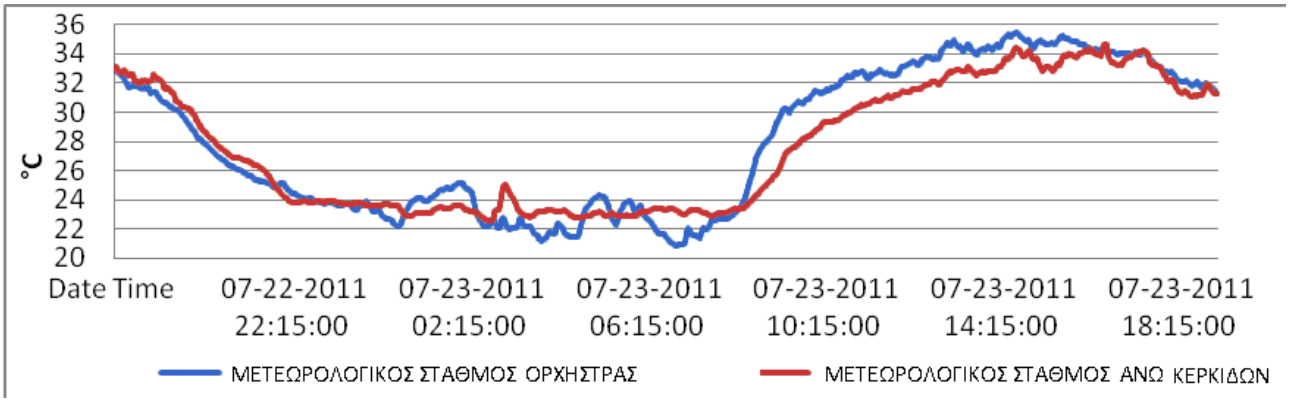
Σχ. 3 – Ταχύτητα Ανέμου Συνολικά 16.06.2011



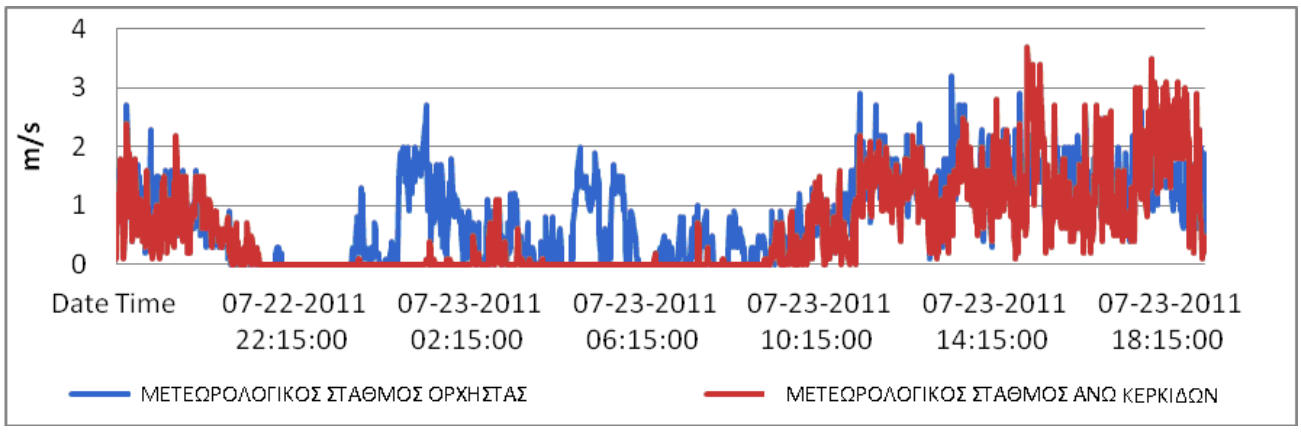
Σχ. 4 – Θερμοκρασία °C/ώρα 17.06.2011



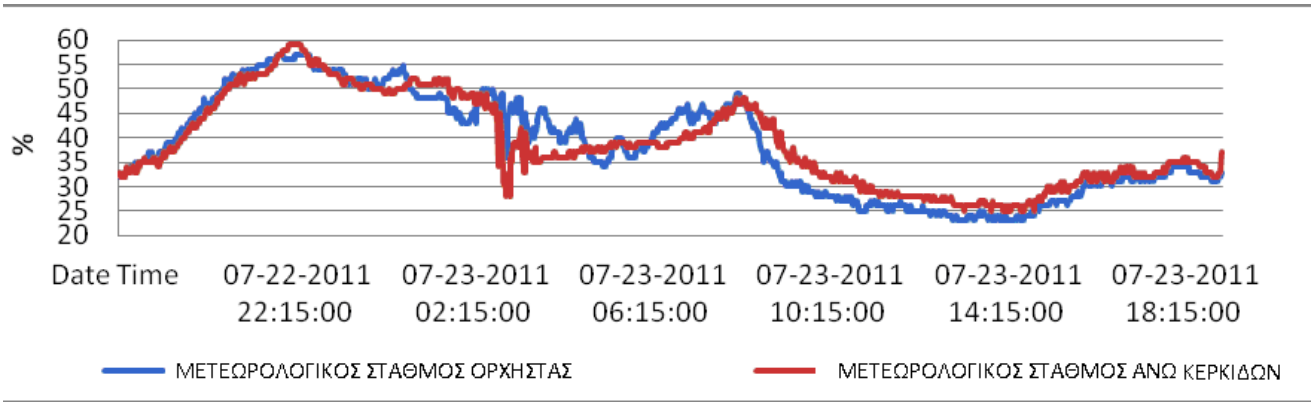
Σχ. 5 – Ταχύτητα ανέμου m/s 17.06.2011



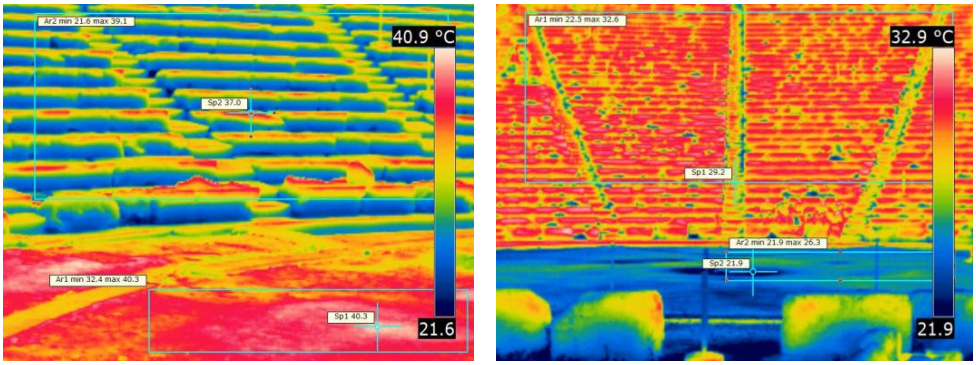
Σχ. 6 – Θερμοκρασία °C/ώρα 22-23.07.2011 διαφορά υψομέτρου μεταξύ WS1-2 ≈ 20,0m



Σχ. 7 – Ταχύτητα ανέμου m/s 22-23.07.2011 με διαφορά υψομέτρου μεταξύ WS1-2 ≈ 20,0m



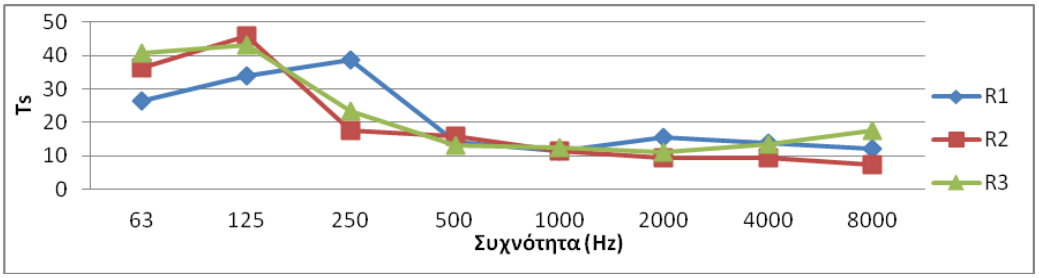
Σχ. 8: Σχετική υγρασία(%) 22-23.07.2011 με διαφορά υψομέτρου μεταξύ WS1-2 ≈ 20,0m



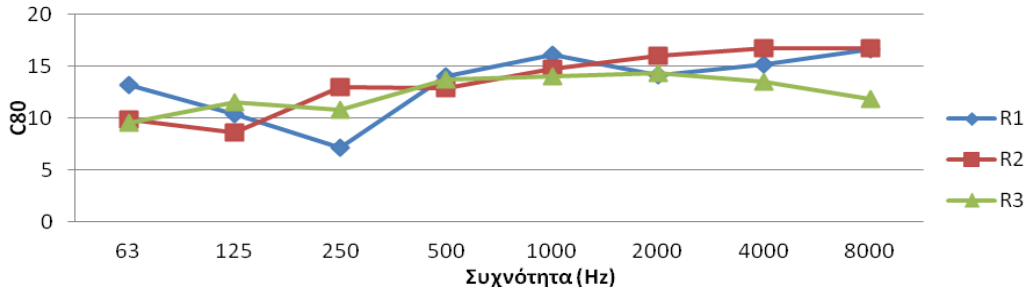
Εικ.1 16/6/2011 Αριστερά (13:00) Ορχήστρα: 40,3°C max 32,4°C min, Κοίλο: 39,1°C max 21,6°C min
Δεξιά (19:00) Ορχήστρα: 26,3°C max 21,9°C min, Κοίλο: 32,6°C max 22,5°C min

3. Αποτελέσματα Ακουστικών Μετρήσεων

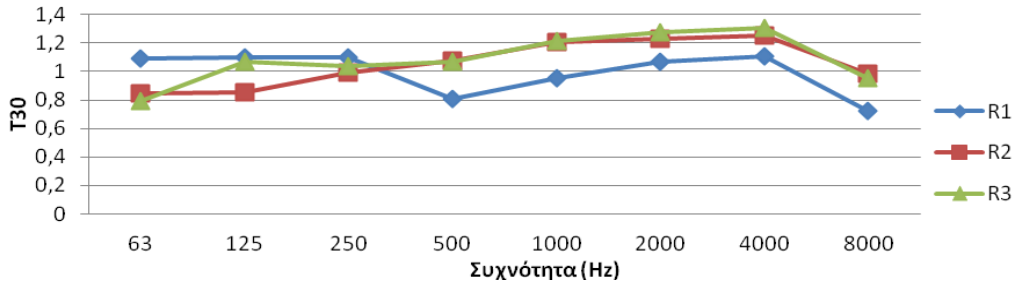
3.1 Μέσοι Όροι Μετρήσεων Διημέρου (16-17.6.2011)



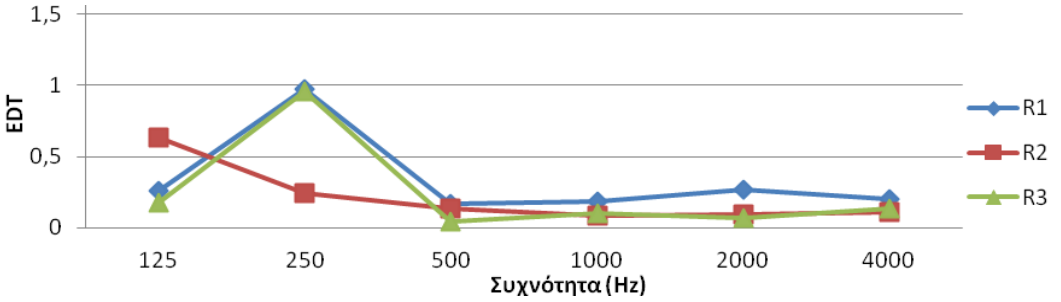
Σχ. 9 – Μέσοι Όροι Ts 16-17.6.2011



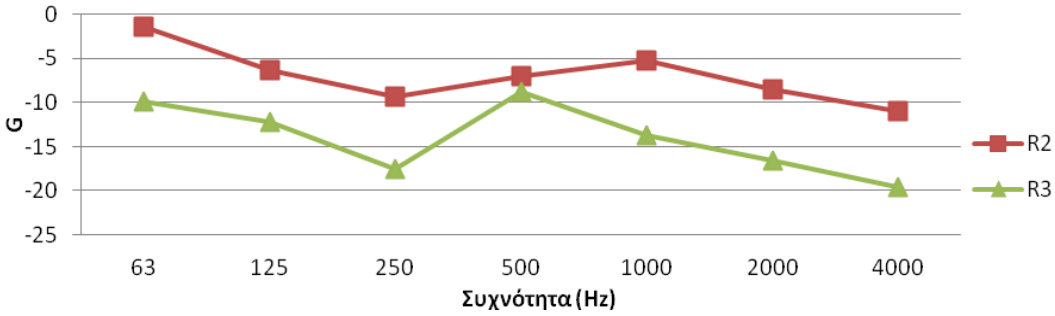
Σχ. 10 – Μέσοι Όροι C_{80} 16-17.6.2011



Σχ. 11 – Μέσοι Όροι T_{30} 16-17.6.2011

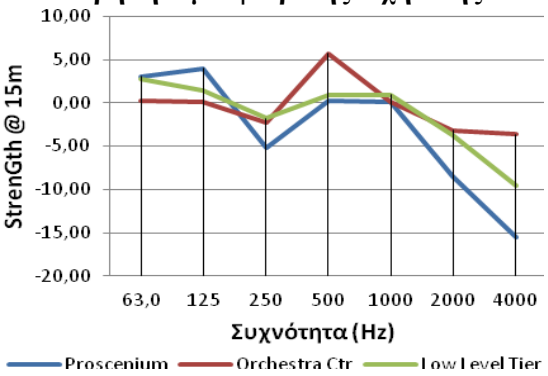


Σχ. 12 – Μέσοι Όροι EDT 16-17.6.2011

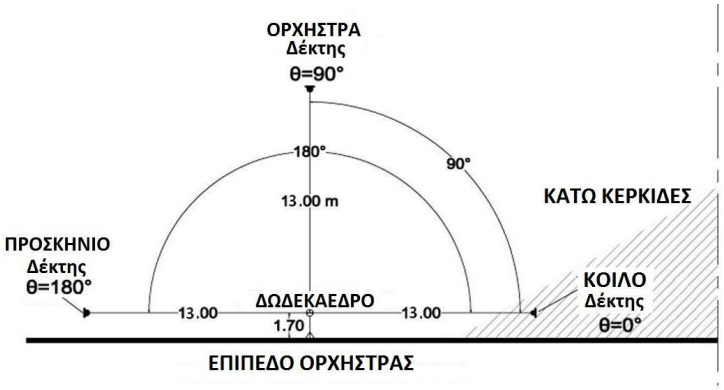


Σχ. 13 – Μέσοι Όροι G 16-17.6.2011

3.2 Μέτρηση Ημισφαιρικής Ηχητικής Διάδοσης



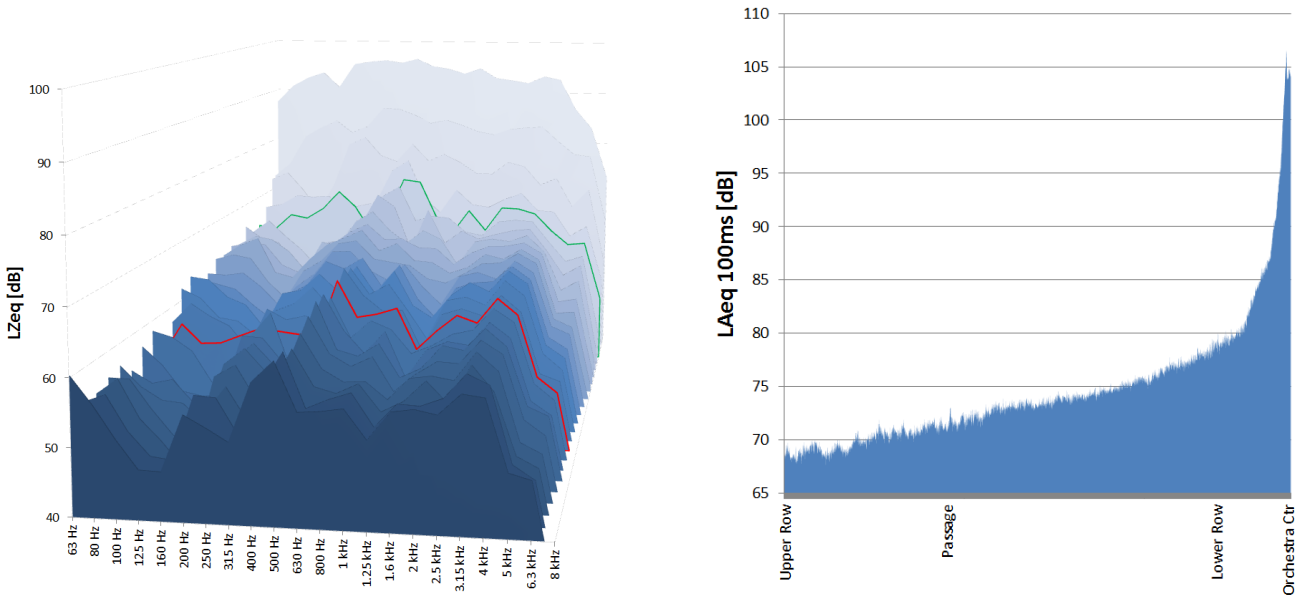
Σχ. 14α – Τιμές G stength



Σχ. 14β – Θέσεις δεκτών

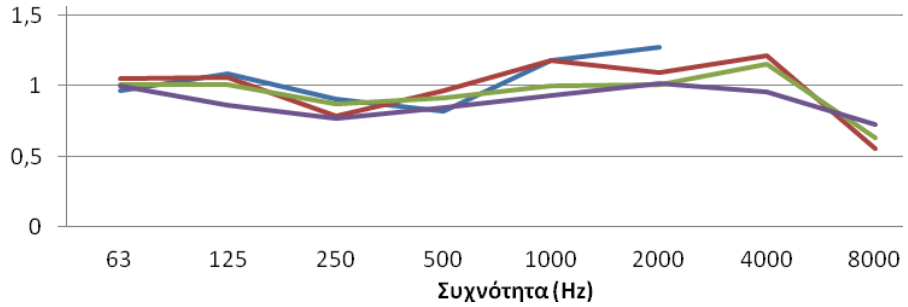
Η παράμετρος G στον ζ/ψ-άξονα ημισφαιρίου ακτίνας 13μ με τους δέκτες τοποθετημένους στις θέσεις όπως εμφανίζονται στο Σχ.14α. Δέκτης Κοίλου: 0° (Στο επίπεδο του κάτω διαζώματος), Δέκτης Ορχήστρας: 90° 13μ ύψος πάνω από το δωδεκάεδρο, Δέκτης Προσκηνίου: 180°, με ταχύτητα ανέμου 0,4-1,1 m/sec και κατεύθυνση ανέμου Β. Στο Σχ.14β παρουσιάζεται η διαφορά στις τιμές που οφείλεται στην αρχιτεκτονική γεωμετρία του θεάτρου.

3.3 Μετρήσεις Ηχοδιαδρομής στο Κοίλο

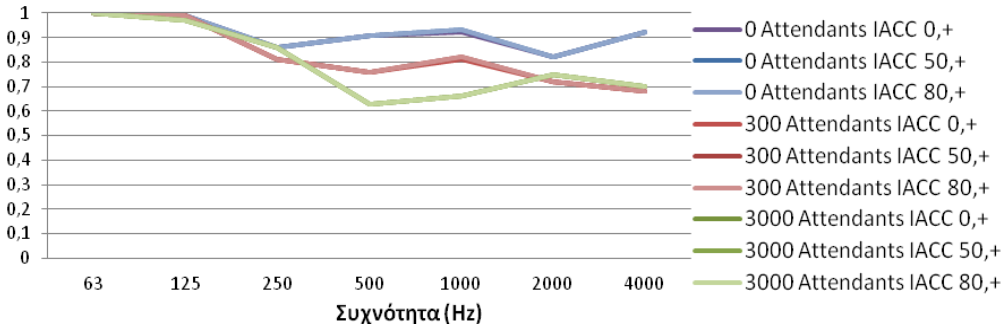


Σχ. 15 – Μέτρηση καταγραφής «ηχοδιαδρομής» στο κοίλο ξεκινώντας από ψηλά προς την ορχήστρα, με σκοπό τη μέτρηση της φασματικής απόκρισης σε διαφορετική απόσταση/ύψος. Στο αριστερό γράφημα, η κόκκινη και πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύουν το διάδρομο και το τέλος του κάτω διαζώματος αντίστοιχα.

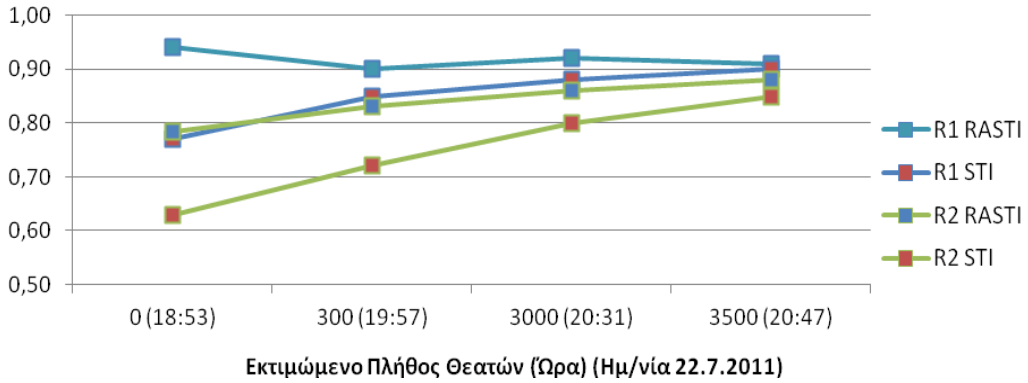
3.4 Συγκρίσεις Μετρήσεων Με και Χωρίς την Παρουσία Κοινού



Σχ. 16 – Σύγκριση Με και Χωρίς Κοινό του δείκτη T30 στη θέση R2



Σχ. 17 – Σύγκριση Με και Χωρίς Κοινό του δείκτη IACC 0,+ / 50,+ / 80,+



Σχ. 18 – Σύγκριση Με και Χωρίς Κοινό Δεικτών Καταληπτότητας Ομιλίας, (υφασμάτινα υποστρώματα τοποθετημένα στο κάτω διάζωμα)

Μετεωρολογικά Δεδομένα	**0 θεατές (18:53)**	**300 θεατές (19:57)**	**3.000 θεατές (20:31)**	**3.500 θεατές (20:47)**
Θερμοκρασία επίπεδο ορχήστρας	31,6°C	29,1°C	27,3°C	26,6°C
Θερμοκρασία άνω διάζωμα	32,2°C	30,2°C	28,1°C	27,3°C
Ταχύτητα ανέμου επίπεδο ορχήστρας	0,8 m/sec	0,7 m/sec	0,7 m/sec	0,6 m/sec
Ταχύτητα ανέμου άνω διάζωμα	0,5 m/sec	0,5 m/sec	0,9 m/sec	0,6 m/sec
Κατεύθυνση ανέμου επίπεδο ορχήστρας	NE	NE	ENE	NE
Κατεύθυνση ανέμου άνω διάζωμα	NE	NE	NE	NE
Υγρασία επίπεδο ορχήστρας	35%	44%	49%	52%
Υγρασία άνω διάζωμα	35,2%	43%	48%	51%

Πίνακας 2 – Μετεωρολογικές Παράμετροι 22.7.2011

4. Συμπεράσματα

Η έρευνα έδειξε ότι κατά τη διάρκεια θεατρικών παραστάσεων με παρουσία μεγάλου αριθμού θεατών, η καταληπτότητα της ομιλίας των καλλιτεχνών αυξάνεται σημαντικά σε όλες τις θέσεις μετρήσεων. Παρότι οι θεατές που καταλαμβάνουν τις χαμηλότερες/πλησιέστερες θέσεις αντιλαμβάνονται, σε απόλυτο βαθμό, καλύτερα την ομιλία, η σχετική συνεισφορά της παρουσίας κοινού είναι πλεονεκτικότερη στις υψηλότερες θέσεις. Επιπλέον, ενώ οι τιμές IACC και χρόνοι αντήχησης T_{20}, T_{30} βρέθηκαν μειωμένοι με την παρουσία κοινού δεν φάνηκε να παρουσιάζονται σημαντικά οι παράμετροι C_{80} and Ts.

Καθώς λόγω συνθηκών τα αποτελέσματα της Β' Φάσης βασίζονται σε μεμονωμένες μετρήσεις με την ελάχιστη στατιστική μεσοστάθμιση σε σύγκριση με την εκτεταμένη δειγματοληψία κατά τη Α' Φάση, προτείνεται περαιτέρω επαλήθευση των μετρηθέντων δεδομένων με παρουσία κοινού. Ένα ζήτημα, το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι το

εποχιακό υπόβαθρο θορύβου εξαιτίας των τζιτζικιών, το οποίο ήταν αρκετά υψηλό σε σχέση με τις ανοχές του μετρητικού συστήματος με αποτέλεσμα την απόρριψη της σχετικής μπάντας οκτάβας από τα τελικά αποτελέσματα.

Αναφορικά στις μετεωρολογικές παραμέτρους, οι θερμοκρασίες ατμοσφαιρικού αέρα που μετρήθηκαν στη θέση του άνω διαζώματος WS3 σε σχέση με τη θέση WS1 στην ορχήστρα, με υψομετρική διαφορά περίπου 20μ, έδειξαν μία μέση διαφορά 2°C (WS1-2,0°C) τις πρωινές ώρες περίπου 08:30-11:30, σύγκλιση των θερμοκρασιών προς το απόγευμα και απόκλιση πάλι 2°C το βράδυ με ανώτερη θερμοκρασία στη θέση του άνω διαζώματος (WS1+2,0°C). Επίσης, οι δύο σταθμοί στην ορχήστρα με διαφορά ύψους 5μ είχαν μία μέση διαφορά 0,5°C με θερμότερη τη θέση WS1. Οι θερμοκρασίες των επιφανειών του κοίλου και ορχήστρας παρουσίαζαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους από περίπου 6 εως 11°C. Τις πρωινές ώρες, παρατηρήθηκε μία αύξηση της ταχύτητας ανέμου κατά 3-4m/sec, η οποία σταδιακά υποχωρούσε το απόγευμα προς βράδυ. Οι κατευθύνσεις του ανέμου είναι κυρίως Β, ΒΑ.



Εικ.2 Περιοχή ορχήστρας: Δωδεκάεδρο, WS1, WS2, Δέκτης Ορχήστρας 90° όπως Σχ.14α

Αναφορές

[1] Vassilantonopoulos, S.L., Mourzopoulos, J.N., "A study of ancient Greek and roman theatre acoustics", Acoustica 89, 2002.
[2] Vassilantonopoulos, S.L., Chatziantoniou, P., Scarlatos, D, Zakinthinos, T., Tatlas, A.N., Mourzopoulos, J.N, "Measurements and Analysic of the acoustics of the ancient theatre of Epidauros", Elina Conference, 2004
[3] A New DIRAC, Measuring Speech Intelligibility. Brüel & Kjær Magazine No. 1, 2008, p26-27.
[4] M.R. Schroeder, "Modulation Transfer Functions: Definition and Measurement," Acustica 49, 179 – 182 (1981).
[5] D.D. Rife, "Modulation Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences", J. Audio Eng. Soc. 40, 779 – 790 (1992).
[6] ISO 3382-1997(E), Acoustics-Measurement of the Reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters
[7] Kuttruff, H., Room Acoustics, Third edition Elsevier Applied Science, 1991
[8] Cremer, L. and Müller, H. A. and Schultz, T., Principles and Application of Room Acoustics, Applied Science, London, 1982, Volume 1

[9] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken and R. Plomp, "Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics," Acustica 46, 60 – 72 (1980).
[10] Jacobsen, T. The RASTI method for objective rating of speech intelligibility, 12th ICA, 1986, paper E10-1
[11] IEC 60268-16 ed4.0 (2011-6) Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index
[12] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken et al., "Past, present and future of the Speech Transmission Index", TNO Human Factors, Soesterberg, The Netherlands, © 2002, ISBN 90-76702-02-0.
[13] Larsson, C., "Meteorological effects on sound propagation", personal homepage, University of Uppsala, Sweden
[14] Larsson, C., "Weather effects on Outdoor Sound Propagation", International Journal of Acoustics and Vibration, Vol 5 No 1, 2000, p.33-36

Κέντρα διασκέδασης σε Βόλο και Ιωάννινα : θόρυβοι λειτουργίας και προβλήματα ηχοπροστασίας των εγγύς κατοικιών.

Γιώργος Κωστής - Λευτέρης Παϊδας- Δημήτρης Πλιάτσικας - Νίκος Μπάρκας
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας προπτυχιακής έρευνας που πραγματοποιήθηκε (2010 - 11) σε συνολικά δεκατέσσερα (14) κέντρα εστίασης και διασκέδασης του Βόλου και των Ιωαννίνων, με σκοπό την διαχρονική εξέλιξη και αποτίμηση της ηχορρύπανσης των αστικών κέντρων εξαιτίας της λειτουργίας των καταστημάτων διασκέδασης, αλλά και την αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης στα γειτονικά κτίρια κατοικίας. Η έρευνα περιλαμβάνει μια διαδικασία ηχομετρήσεων, καθώς επίσης και καταγραφή της υποκειμενικής αντίληψης των περιοίκων. Όπως διαπιστώσαμε, η λειτουργία των καταστημάτων διασκέδασης και εστίασης προκαλεί σημαντικές ηχητικές οχλήσεις και στις δύο πόλεις, με κοινά αλλά και αποκλίνοντα χαρακτηριστικά.

ABSTRACT

The announcement is part of an undergraduate research n fourteen (14) eating and entertainment places in the cities of Volos and Ioannina aiming at the evaluation of urban centres' noise and the acoustic comfort of the neighbour residential buildings. Recurrent and extensive sound measurements took place during the research and, at the same time, the subjective perceptions of the neighbouring residents were recorded, along with their views on the means of reduction of urban noise. As we found out, the operation of entertainment and eating places is causing significant noise nuisances in both cities, with both common and divergent characteristics

Εισαγωγή

Όπως έχει διαπιστωθεί τα κέντρα διασκέδασης αποτελούν μια από τις σημαντικότερες εστίες ηχορύπανσης στη σύγχρονη ελληνική πόλη, εξαιτίας :

-της υψηλής ηχητικής έντασης των μουσικών εκπομπών και των άλλων λειτουργικών θορύβων συνάθροισης,

-των ηχομονωτικών έλλειψης στα κέντρα διασκέδασης,

-της κακής ακουστικής των χώρων, αλλά και της συστηματικής παραποίησης της άδειας λειτουργίας των καταστημάτων. [1], [2], [3]

Οι περιοχές της παρούσας έρευνας εκτείνονται στο παραλιακό μέτωπο του Βόλου, καθώς επίσης και στις οδούς Δωδώνης, Γαριβάλδη, Κάνιγγος και την πλατεία Πάργης των Ιωαννίνων, περιοχές όπου :

-επικρατούν μικτές χρήσεις γης (κυρίαρχη η κατοίκιση), με συνέπεια την άμεση γειτνίαση των κέντρων διασκέδασης με τις εγγύς κατοικίες,

-συσσωρεύεται ικανό πλήθος εγκαταστάσεων, με εκτεταμένη υπαίθρια ανάπτυξη τραπεζο-καθισμάτων και δυνατότητα συγκέντρωσης μεγάλου πλήθους θαμώνων,

-η λειτουργία των καταστημάτων εκτείνεται κατά τις ώρες κοινής ησυχίας,

-χαρακτηρίζονται από υψηλό θόρυβο βάθους.

Εξαιτίας των τοπικών συνηθειών και των ιδιο-χαρακτηριστικών που εμφανίζει ο τρόπος και η διασπορά της διασκέδασης στις συγκεκριμένες πόλεις της έρευνας, το δείγμα περιλαμβάνει δεκαέξι (16) καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος (οχτώ σε κάθε πόλη) : [4], [5], [6], [7],

-στο Βόλο, επιλέχθηκαν κυρίως τσιπουράδικα και ταβέρνες (6 στα 8), δύο café-bar,

-στα Ιωάννινα, επιλέχθηκαν κυρίως café-bar (7 στα 8) και ένα τσιπουράδικο.

Διαδοχικές και επαναλαμβανόμενες ηχομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα Αυγούστου - Οκτωβρίου 2010, περίοδο που περιλαμβάνει κυρίως υπαίθριες, αλλά και στεγασμένες δραστηριότητες (Βόλος 19 – 21/8 και 24 – 26/9, Ιωάννινα 29/9 – 2/10).

Η διαδικασία των επιτόπιων ηχομετρήσεων σε κάθε κατάστημα του δείγματος περιλάμβανε τρεις (3) διαδοχικές μετρήσεις σε διακεκριμένες θέσεις :

-η πρώτη μέτρηση ανάμεσα ή δίπλα στα πρώτα τραπέζια,

-η δεύτερη μέτρηση σε πλάγια θέση (σε απόσταση περίπου 5μ.), και

-η τρίτη μέτρηση σε μετωπική θέση (σε απόσταση περίπου 10μ.).

Σε κάθε θέση μέτρησης, οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν δύο φορές την ημέρα, σε ώρες κοινής ησυχίας (15 - 17μμ και 23μμ – 1πμ).

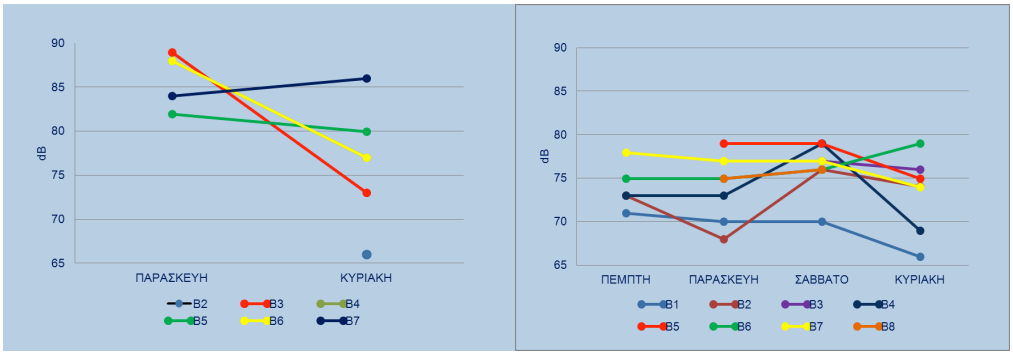
Σε κάθε μέτρηση καταγράφονταν η σφαιρική τιμή (στιγμιαίες μέγιστες / ελάχιστες στάθμες) και η στατιστικά ισοδύναμη ηχοστάθμη (dB[A] και dBeq επί 30 sec).

1. Η ανάλυση των ηχομετρήσεων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία των ηχομετρήσεων ομαδοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στα επόμενα γραφήματα.

Στο Βόλο, οι στάθμες λειτουργίας κάθε συγκεκριμένου καταστήματος δείχνουν ανεξάρτητες της ημέρας μέτρησης. Όπως φαίνεται, στην περίμετρο των καταστημάτων κατά τη διάρκεια της μεσημβρινής κοινής ησυχίας εντοπίζονται έντονες οχλήσεις (>80dB) που οφείλονται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση, παρά στη λειτουργία των καταστημάτων. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νυχτερινής κοινής ησυχίας (μειωμένη κυκλοφοριακή κίνηση), οι αντίστοιχες οχλήσεις (είτε από τσιπουράδικα, είτε από café-bar) κυμαίνονται σε ανεκτά επίπεδα (< 80dB). Σε γενικές γραμμές, οι οχλήσεις στα τσιπουράδικα εξαρτώνται από το μέγεθος της υπαίθριας συγκέντρωσης και τις καιρικές συνθήκες, ενώ στα café-bar από τη λειτουργία της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης. Το Σαββατόβραδο εμφανίζεται ως η πλέον επιβαρυμένη ηχητικά

περίοδος στην περίμετρο των καταστημάτων του Βόλου (75 – 80 dB[A]), ενώ τις υπόλοιπες μέρες της έρευνας καταγράφονται μικρότερες οχλήσεις (πτώση της ηχητικής στάθμης μέχρι 13dB).



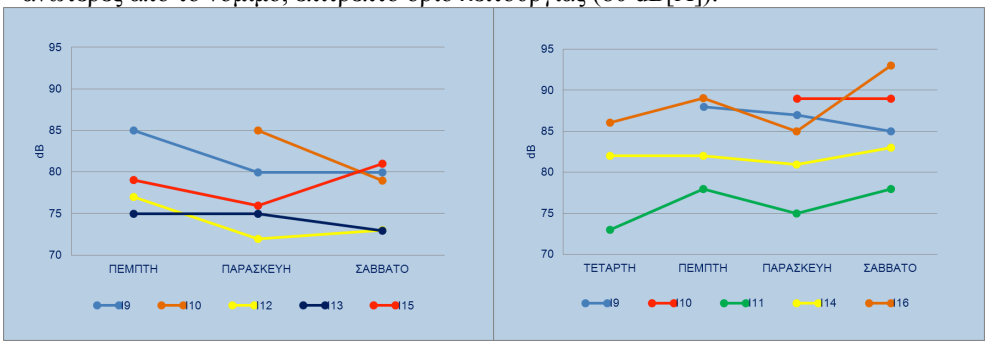
Εικόνες 1.1 και 1.2 : αριστερά η διακύμανση του ημερήσιου θορύβου και δεξιά η διακύμανση του νυχτερινού θορύβου στα καταστήματα του Βόλου.

Στα Ιωάννινα, οι στάθμες λειτουργίας συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία της αγοράς και κυμαίνονται ανάλογα με την ημέρα της μέτρησης. Χαμηλές στάθμες λειτουργίας (< 80dB) διαπιστώνονται σε περιπτώσεις καταστημάτων με αποκλειστικά υπαίθριες συγκεντρώσεις θαμώνων, ενώ οι υψηλές στάθμες (> 80dB) εντοπίζονται στα καταστήματα με ηλεκτρακουστικές εγκαταστάσεις. Χαρακτηριστικό είναι πως στο τσιπουράδικο του δείγματος (χωρίς ηλεκτρακουστική εγκατάσταση) καταγράφονται σταθερά χαμηλές στάθμες όχλησης (< 80dB) ανεξαρτήτως της ημέρας μέτρησης (ο θόρυβος εξαρτάται από το κέφι των συγκεντρωμένων θαμώνων). Σε γενικές γραμμές, το Σαββατόβραδο εμφανίζεται επίσης ως η πλέον θορυβώδης περίοδος στην περίμετρο των καταστημάτων των Ιωαννίνων, με μια σχετικά μικρή αλλά ευδιάκριτη αύξηση των ηχητικών εντάσεων στα καταστήματα με ηλεκτρακουστική εγκατάσταση (80-95dB[A]).

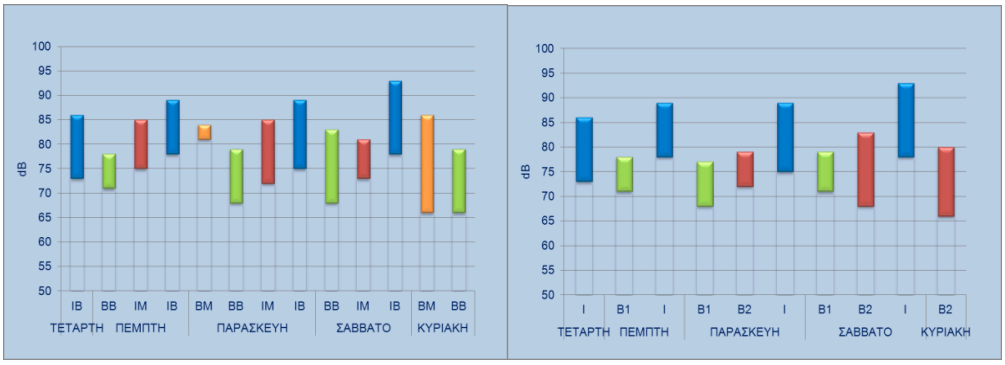
Όπως φαίνεται από τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο πόλεων, στα Ιωάννινα υπερτερούν οι θόρυβοι της νυχτερινής λειτουργίας των καταστημάτων, ενώ αντίθετα στο Βόλο οι θόρυβοι της μεσημβρινής λειτουργίας. Γενικά, η διακύμανση των ηχητικών εντάσεων κατά τη διάρκεια της εβδομάδας είναι μικρή και στις δύο πόλεις. Ωστόσο, κατά τη μετάβαση από τις καθημερινές προς το Σαββατοκύριακο είναι ευδιάκριτη μια σταθερή αύξηση των μέγιστων νυχτερινών οχλήσεων, με παράλληλη μείωση των ελάχιστων μεσημβρινών τιμών. Το Σάββατο είναι η πιο θορυβώδης μέρα της εβδομάδας (λόγω στης αυξημένης κίνησης στα καταστήματα εστίασης και διασκέδασης.

Στα Ιωάννινα, η διαφορά των εντάσεων μεταξύ μεσημβρινής και νυχτερινής όχλησης μετατρέπεται από 6dB τις καθημερινές σε 11dB τα Σάββατα (εξαιτίας της συνδυασμένης μείωσης των μεσημβρινών οχλήσεων και της αύξησης των νυχτερινών), ενώ στο Βόλο τα δεδομένα των δύο περιόδων μέτρησης εμφανίζουν μικρές διακυμάνσεις (περίπου 3 dB). Τέλος τα Ιωάννινα καταγράφονται ως η πλέον θορυβώδης πόλη κατά τις

ώρες κοινής ησυχίας, με ηχητικές εντάσεις στην περίμετρο των καταστημάτων σταθερά ανώτερες από το νόμιμο, επιτρεπτό όριο λειτουργίας (80 dB[A]).



Εικόνες 1.3 και 1.4 : αριστερά η διακύμανση του ημερήσιου θορύβου και δεξιά η διακύμανση του νυχτερινού θορύβου στα καταστήματα των Ιωαννίνων.



Εικόνα 1.5 και 1.6 : αριστερά η χρονική εξέλιξη των θορύβων λειτουργίας από τα καταστήματα και δεξιά η σύγκριση της συνολικής όχλησης από τη λειτουργία των καταστημάτων του δείγματος στις δύο πόλεις.

2. Η ανάλυση της έρευνας γνώμης

Παράλληλα με τη διαδικασία των ηχομετρήσεων, διακινήσαμε ένα έντυπο ερωτηματολόγιο ανάμεσα στους κατοίκους των περιοχών της έρευνας. Με αυτή τη συμπληρωματική έρευνα διερευνήσαμε τις γνώμες των άμεσα ενδιαφερομένων για το μέγεθος και το είδος των θορύβων του περιβάλλοντος, την ποιότητα των κατασκευών σε κατοικίες και καταστήματα, καθώς και τις απόψεις τους για τις πιθανές λύσεις των προβλημάτων ηχοπροστασίας και ακουστικής άνεσης.

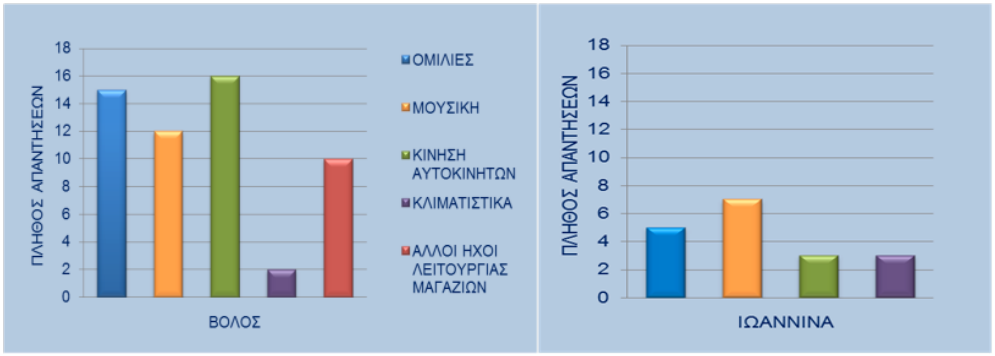
Συνολικά διακινήθηκαν σαράντα ένα (41) ερωτηματολόγια (31 στο Βόλο και 10 στα Ιωάννινα). Για την οικονομία της ανακοίνωσης παραθέτουμε τα σφαιρικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων :

-η ενόχληση κατά τις ώρες κοινής ησυχίας είναι αδιαμφισβήτητη (80% στα Ιωάννινα και 74% στο Βόλο),

-το μέγεθος της ηχητικής ενόχλησης των περιοίκων δεν συναρτάται άμεσα από την ηλικία και την φυσική τους κατάσταση.

-παρά τις μικτές χρήσεις των περιοχών της έρευνας (χαρακτηριστικό της κοινωνικής οργάνωσης των επαρχιακών πόλεων), η πλειονότητα των ερωτώμενων βρίσκονται στα σπίτια τους κατά τις ώρες κοινής ησυχίας και ενοχλούνται.

-ως βασικές αιτίες θορύβου, στο Βόλο αναδεικνύονται η υπαίθρια συνάθροιση (ομιλίες θαμώνων) και η πύκνωση της κυκλοφορίας στην ευρύτερη περιοχή (μετακινήσεις, στάθμευση), ενώ στα Γιάννενα οι μουσικές εκπομπές από τα συστήματα ενίσχυσης ήχου (παρά τη γειτνίαση με δρόμους πυκνού φόρτου, επειδή ο κυκλοφοριακός θόρυβος θεωρείται μέρος του τοπίου της εγκατάστασης),



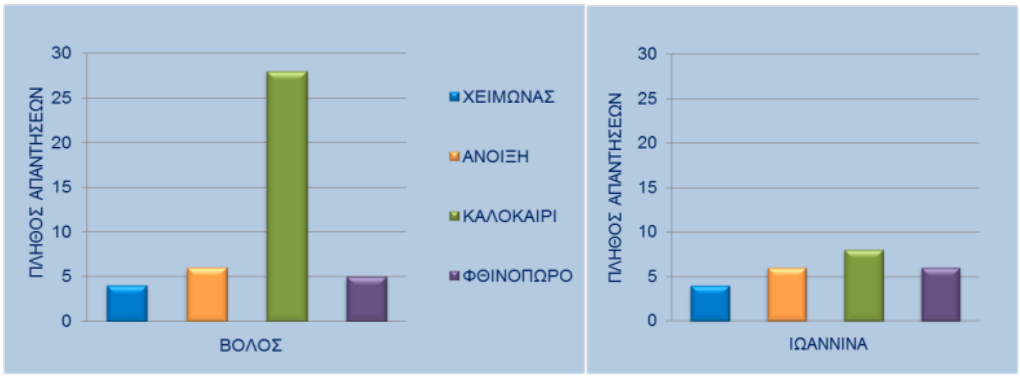
Εικόνα 2.1 και 2.2 : Οι αιτίες προέλευσης της ηχητικής όχλησης κατά τις ώρες κοινής ησυχίας στις δύο πόλεις.



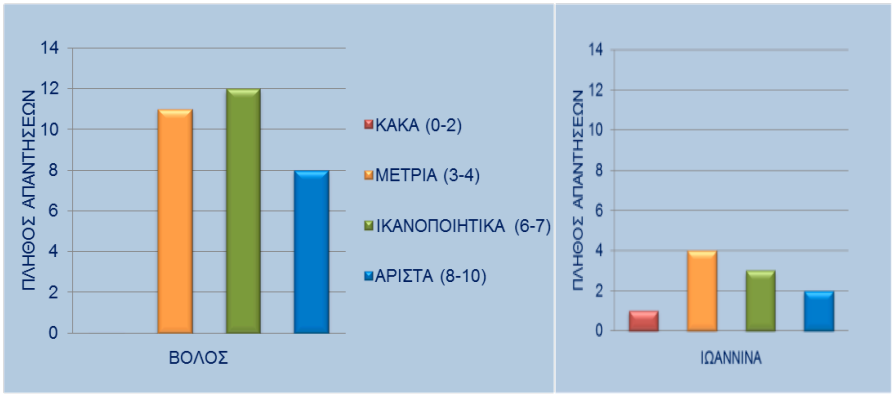
Εικόνα 2.3 και 2.4 : η χρονική επικέντρωση της ηχητικής όχληση στις δύο πόλεις.

-στο Βόλο η ηχητική όχληση επικεντρώνεται τα Σαββατοκύριακα (μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, πύκνωση της σχετικής κυκλοφορίας), ενώ αντίθετα, στα Ιωάννινα φαίνεται πως οι ηχητικές οχλήσεις αποτελούν σταθερό και μόνιμο καθεστώς (παρά στη σχετική αύξηση της έντασης των μουσικών εκπομπών τα Σαββατοκύριακα),

-στο Βόλο η ηχητική όχληση των κατοίκων έχει σαφή εποχιακά χαρακτηριστικά (το καλοκαίρι, εξαιτίας της υπαίθριας συγκέντρωσης των θαμώνων και των ανοιχτών παράθυρων στις κατοικίες), ενώ αντίθετα στα Ιωάννινα, όπου η ηχορύπανση προέρχεται κυρίως από τα ηλεκτρακουστικά συστήματα, η ενόχληση των κατοίκων δεν εμφανίζει σαφή εποχιακά χαρακτηριστικά,



Εικόνα 2.5 και 2.6 : η εποχιακή διακύμανση της ηχητικής όχλησης στις δύο πόλεις.



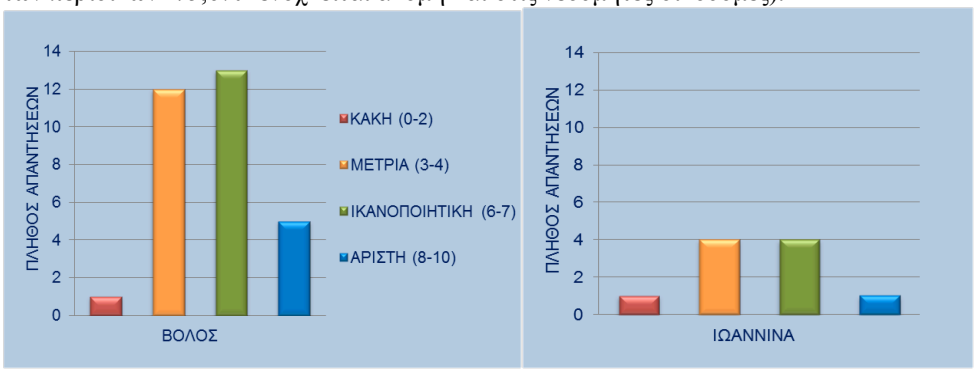
Εικόνα 2.7 και 2.8 : η ηχομονωτική αποτίμηση των κουφωμάτων στις κατοικίες.

-παρά τα εμφανή προβλήματα ηχορύπανσης, η ηχομονωτική ενίσχυση των κατοικιών δεν αποτελεί επιλογή βελτίωσης της ακουστικής άνεσης, ενώ ταυτόχρονα, η ηχομονωτική αποτίμηση των κουφωμάτων στις κατοικίες παραμένει ανεκτή έως υψηλή

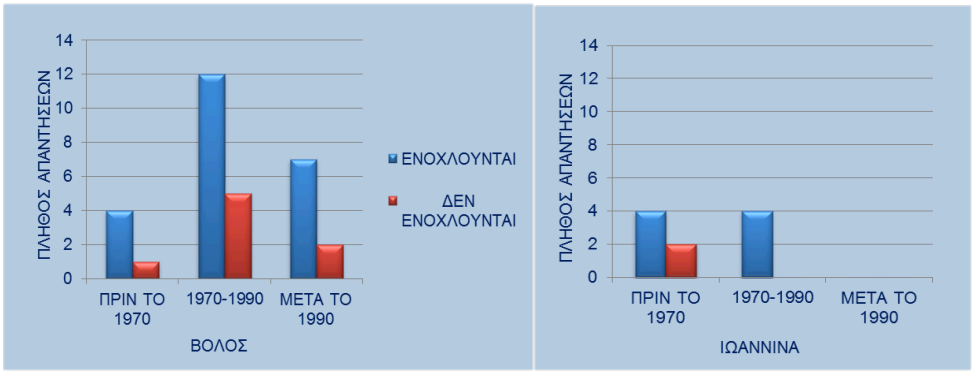
(στα Γιάννενα, οι διαπιστωμένες αλλαγές κουφωμάτων αποδίδονται στην παλαιότητα των κατασκευών),

-η προσδοκία της επίλυσης των προβλημάτων ακουστικής άνεσης δείχνει να μην αφορά την ηχομονωτική ενίσχυση των καταστημάτων, αλλά τον περιορισμό των θορύβων της λειτουργίας τους,

-τέλος, το πρόβλημα της ηχομονωτικής ανεπάρκειας των κατοικιών δείχνει να είναι ανεξάρτητο από την ηλικία και την ποιότητα κατασκευής των κτιρίων (η πλειονότητα των περιοίκων -75,6%- ενοχλείται ακόμη και στις νεόδμητες οικοδομές).



Εικόνα 2.9 και 2.10 : η ηχομονωτική αποτίμηση των κατασκευών στις κατοικίες.



Εικόνα 2.11 και 2.12 : η διακύμανση της ηχητικής ενόχλησης ανάλογα με την ηλικία των κατασκευών.

3. Συμπεράσματα και προτάσεις

Κατά την διαδικασία της συλλογής και της συνδυαστικής επεξεργασίας των δεδομένων της έρευνας διαπιστώθηκε ότι η λειτουργία των καταστημάτων διασκέδασης

και εστίασης στις πόλεις του Βόλου και των Ιωαννίνων προκαλεί σημαντικές ηχητικές οχλήσεις στους περιοίκους, με πολλά κοινά αλλά και ορισμένα αποκλίνοντα χαρακτηριστικά (αναφορικά με τις στάθμες όχλησης και τον τύπο των καταστημάτων διασκέδασης).

Οι ηχητικές οχλήσεις στον Βόλο οφείλονται κυρίως στη συνάθροιση των θαμώνων (ομιλίες, οχλοβοή, παραβατικές συμπεριφορές εξαιτίας της κατανάλωσης αλκοόλ κλπ) και στην αύξηση της κυκλοφορίας (πεζών και οχημάτων) στην ευρύτερη περιοχή, ενώ στα Γιάννενα προέρχονται κυρίως από τη λειτουργία των ηλεκτρακουστικών συστημάτων (αερόφερτοι θόρυβοι εξαιτίας της χαμηλής ηχομονωτικής ικανότητας των κινητών / σταθερών διαχωριστικών, κτυπογενείς θόρυβοι εξαιτίας της μετάδοσης κραδασμών στο κέλυφος). Αξιοσημείωτο είναι ότι στο Βόλο, ο αστικός θόρυβος βάθους αποτελεί μια ισοβαρή πηγή ενόχλησης των περιοίκων, ενώ αντίθετα στα Γιάννενα, αν και ο αστικός θόρυβος βάθους είναι εντονότερος (πχ η κυκλοφορία στην οδό Δωδώνης), δείχνει να αφήνει ανεπηρέαστους τους ενοίκους. Φαίνεται δηλαδή πως το ευδιάκριτο (ένταση) και η πληροφορία (μουσική) της ηχητικής όχλησης επικεντρώνεται και στιγματίζει τη λειτουργία των καταστημάτων. Διαφοροποιήσεις, μεταξύ των δύο πόλεων, εντοπίζονται αναφορικά με την ημερήσια και εποχιακή διάκριση της ηχορύπανσης (καθημερινές / σαββατοκύριακα, κλειστά / ανοιχτά παράθυρα). Στο Βόλο, η ηχητική όχληση είναι σαφώς εντονότερη το καλοκαίρι (υπαίθριες συναθροίσεις), στα Ιωάννινα, αντίθετα, η ηχορύπανση είναι διαρκής (με σχετική αύξηση των οχλήσεων κατά το θέρος και τις αργίες), επειδή προέρχεται από τα συστήματα ενίσχυσης του ήχου,

Οι προτεινόμενες παρεμβάσεις για την εξασφάλιση της ακουστικής άνεσης των περιοίκων, μπορούν να συγκεντρωθούν σε τρεις (3) διακριτές κατευθύνσεις :

-επαύξηση της ηχομονωτικής επάρκειας των κατασκευών

-εφαρμογή και τήρηση των κανονιστικών διατάξεων,

-κανόνες συμπεριφοράς και σεβασμός της κοινής ησυχίας κατά την διασκέδαση.

Ειδικά όσον αφορά το θεσμικό πλαίσιο της αδειοδότησης και λειτουργίας των καταστημάτων διασκέδασης είναι απαραίτητα :

-η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12) και η υποχρεωτική κατάθεση μελέτης ηχομόνωσης κατά την έγκριση μιας άδειας λειτουργίας,

-η εφαρμογή αντι-θορυβικών διατάξεων στα καταστήματα με χώρους υπαίθριας συνάθροισης σε περιοχές κατοικίας,

-ο έλεγχος της πυκνότητας και της διασποράς των εγκαταστάσεων, αλλά και σαφείς πολεοδομικές ρυθμίσεις σε περιπτώσεις συνύπαρξης μκτών χρήσεων.

4. Βιβλιογραφία

[1] Μπάρκας, Ν. – Δεληγιαννίδου, Ρ. – Μαυρίδου, Δ. (2007). *All day bar στο κέντρο της Θεσσαλονίκης : ηχορύπανση, ηχομονωτικές ανεπάρκειες και νομοθετικές ελλείψεις,* Πρακτικά Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ, Ηράκλειο.

[2] Χαλαζωνίτης, Π. (2008) *Έλεγχος και εφαρμογή των υγειονομικών διατάξεων για την ηχορύπανση από τα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος*, Πρακτικά Ημερίδας ΤΕΕ, Αθήνα

[3] Βίττης, Ν. (2008) *Πηγές θορύβου στο αστικό περιβάλλον : προβλήματα του κανονιστικού πλαισίου και εφαρμογή τους,* Πρακτικά Ημερίδας ΤΕΕ, Αθήνα

[4] Κουλίδας, Κ. (2010). *Τα Γιάννινα που έφυγαν (Συνοικίες- Τοπωνύμια- Ιεροί Ναοί- Μοναστήρια)*. Ιωάννινα.

[5] Φωτόπουλος, Κ. (1986). *Τα Γιάννινα, οι μαχαλάδες, τα σοκάκια και τα τοπωνύμια τους με τις ιστορικές και λαογραφικές παραδόσεις,* Αθήνα.

[6] Χαρίτος, Χ. (2004). *Βόλος 1881- 1955, ο χώρος και οι άνθρωποι.* ΔΗ.Κ.Ι., Βόλος

[7] Κουτής, Γ. & Σουλακούδης, Γ. (2003). *Τσιπουράδικα Βόλου- η παράδοση καλά κρατεί.* Εν Βόλω, 10, Βόλος.

CNOSSOS-EU: The European program on Common NOise ASSessment MethOdS for strategic noise mapping in EU as specified in the Directive 2002/49/EC

Dr. Stylianos KEPHALOPOULOS
European Commission, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection / T.P. 281, 21027-Ispra (VA), Italy
E-mail: stylianos.kephalopoulos@jrc.ec.europa.eu

Ass. Prof. Konstantinos VOGIATZIS
University of Thessaly - Civil Eng. Dept.- LTEA / Volos 38334, Greece
Email: kvogiatz@uth.gr

ABSTRACT

CNOSSOS-EU is one of the milestones for the implementation of the Environmental Noise Directive 2002/49/EC (END) and is coordinated by the European Commission's Joint Research Centre on behalf of DG Environment. In accordance with Article 6.2 of the END, Commission efforts are dedicated on developing harmonized assessment methods for road, railway, aircraft and industrial noise to be used for strategic noise mapping in Europe as required by Article 7 of the END after adoption by the EU Member States via a Commission Implementing Decision which will revise Annex II of the Directive. Commission and the EU Member States formally agreed in November 2010 to work on a multiannual work program till 2015 for developing and implementing CNOSSOS-EU in EU-27 by the 3rd round of strategic noise mapping in Europe set for 2017. The European Commission is advancing the preparation of common noise assessment methods in EU (CNOSSOS-EU) with the ultimate scope to enhance the reliability, consistency and comparability of noise data in EU in the years to come.

CNOSSOS-EU: Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα για κοινές μεθόδους Στρατηγικής Χαρτογράφησης Θορύβου στην ΕΕ, όπως ορίζεται στην οδηγία 2002/49/ΕΚ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόγραμμα CNOSSOS-EU αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις λίθους της εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Περιβαλλοντικού Θορύβου 2002/49/ΕΚ και συντονίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕΕ) και ειδικώτερα από το Κοινό Κέντρο Ερευνών για λογαριασμό της Γενικής Διεύθυνσης Περιβάλλοντος. Σε συμφωνία με το

άρθρο 6.2 της Οδηγίας, οι προσπάθειες της Επιτροπής στοχεύουν στην ανάπτυξη μίας εναρμονισμένης μεθόδου αξιολόγησης της έκθεσης του πληθυσμού στον θόρυβο από αυτοκίνητα, τραίνα, αεροπλάνα και βιομηχανικές μονάδες, η οποία θα αποτελέσει την τεχνική βάση για την αναθεώρηση του Παραρτήματος ΙΙ της Οδηγίας. Η ΕΕ και τα κράτη μέλη συμφώνησαν τον Νοέμβριο 2010 να εργασθούν σε ένα κοινό εργασιακό πρόγραμμα μέχρι το 2015 με σκοπό την ανάπτυξη, εφαρμογή και εξασφάλιση της λειτουργικότητας του CNOSSOS-EU στα κράτη μέλη πριν το 2017 στο οποίο προβλέπεται η στρατηγική χαρτογράφηση του θορύβου στην Ευρώπη., Ο απώτερος σκοπός είναι να εξασφαλιστούν η αξιοπιστία, η συνοχή και η συγκρισιμότητα των δεδομένων περιβαλλοντικού θορύβου στην ΕΕ.

Introduction

The health impacts of environmental noise are of growing concern among both the general public and policy-makers in Europe. Environmental noise - especially from road transportation - is widely accepted as a basis for evaluating the impact of noise on the exposed population. Extensive urbanization, and the increase of road transport are the main driving forces for the environmental noise exposure of the population in Europe. The severity of health effects due to noise versus the number of people affected is quite important in EU member states. Annoyance, sleep disturbance, cardiovascular disease, cognitive impairment, hearing impairment and tinnitus are endpoints related to environmental noise. Evidence is available, however, the epidemiological data is not yet complete, but there is sufficient to assume the relationship of environmental noise to health. The fact that noise pollution is one of the most common environmental issues in Europe is clearly shown by the following figures:

- 50% of Europeans live in noisy surroundings
- 1/3 of Europeans experience sleep disturbances due to traffic noise
- 1/4 of Europeans are annoyed by noise from road and neighbourhood
- 1/5 of Europeans is regularly exposed to sound levels at night that could significantly damage health
- 1/3 of European workers are exposed to harmful levels of noise at least a quarter of their time at work

According to the recently published WHO-JRC report [1], one million healthy life years are lost every year from traffic related noise in the western part of Europe. Sleep disturbance and annoyance, mostly related to road traffic noise, comprise the main burden of environmental noise. . Furthermore, recognizing the special need to protect children from the harmful effects of noise, the Parma Declaration which was adopted during the Fifth WHO Ministerial Conference on Environment and Health in 2010 called the stakeholders and policy makers upon working together to reduce the exposure to environmental noise [2]. The European Parliament and Council adopted the Environmental Noise Directive 2002/49/EC on 25 June 2002 with the main objective of providing a common basis for tackling noise problems across the EU. This Directive defines environmental noise as unwanted or harmful outdoor sound created by human activities, including noise from road traffic, railway traffic airports and industrial sites, and focuses on three action areas: the determination of

exposure to environmental noise through noise mapping, based on common assessment methods; the adoption of action plans by the Member States, based on noise-mapping results; and public access to information on environmental noise and its effects (Directive 2002/49/EC) [3]. To this purpose the following actions shall be implemented progressively:

- to determine the exposure to environmental noise through noise mapping, by using common noise assessment methods in the EU Member States;
- to ensure that information on environmental noise and its effects is made available to the public;
- to adopt action plans by the Member States, based upon noise-mapping results, with a view to preventing and reducing environmental noise where necessary and particularly where exposure levels can induce harmful effects on human health and also to preserving good environmental noise quality where this is already achieved.

1. CNOSSOS-EU: why is needed?

Since 2007, the European Commission's Joint Research Centre (JRC) has been technically support the Directorate General for the Environment (DG ENV) concerning the implementation of the END. The first technical advice was provided in the period 2007-2008 was firstly provided regarding the equivalence of the national assessment methods used by the EU Member States for strategic noise mapping against the interim methods, as specified in Annex II of the END and the EC guidelines adopted on 6 August 2003"[4]. Based on the assessment performed by the JRC it was concluded that:

- Concerning the noise assessment methods used:
  - 7 MS provided partial or no information about the methods used;
  - 8 MS used either their national methods or the interim ones depending on the noise source (i.e., road traffic, railway traffic, aircraft, industrial);
  - 5 MS used their own national methods for all four noise sources;
  - 7 MS used the interim noise assessment methods as established in Annex II of the European Noise Directive 2002/49/EC for all four noise sources.
- Concerning the compliance of the EU MS to Art. 6 of the (END):
  - 7 MS were assessed to be compliant with Art. 6 of the END for all noise assessment methods used;
  - 5 MS were assessed to be non-compliant with Art. 6 of the END for at least one noise assessment method;
  - For 15 MS it was impossible to determine their compliance with Art. 6 of the END for at least one noise assessment method because they did not provide enough information to allow assessing whether their national methods are equivalent to the interim ones. Between these, two reported that they are going to provide information by means of the protocols provided by JRC to test the equivalence of the noise assessment methods in EU.

In absence of implementation of the protocols by the EU Member States by the deadlines set by this Administrative Arrangement, JRC implemented the protocols using the interim methods and evaluated statistically what part of the differences

may due to software implementation of the methods and not on the methods themselves, and also prepared some indicators to describe the different results the national methods could eventually give, both in terms of change in noise levels and in the number of people exposed to environmental noise.

It was observed that in most situations for road traffic noise, railway traffic noise and industrial noise the software implementation would be relevant but not necessarily the major cause of differences (a standard deviation less than 3 dB) since the implementation in three of the most used software to predict noise levels give consistently close results. Only in the case of aircraft noise large differences between implementation of the interim method were found, depending whether the European Commission's Recommendation of 6 August 2003 (2003/613/EC) is or not taken into account.

Furthermore regarding the current state of the implementation of the END it should be underlined the following:

- legal transposition and administrative arrangements is largely in place, however coordination between different authorities can be improved;
- the noise mapping has introduced some improvements compared to the situation before but the data reliability, consistency and comparability needs to be further improved, due to the lack of a common noise assessment methodological framework;
- the national limits and noise indicators values vary significantly across MS
- link between noise levels (exceedance of national limits) and action plans is often not stringent due to the fact that an enforcement and penalties framework is lacking;
- the definition and the protection of quite areas is very diverse across MS.

2. The CNOSSOS-EU project: roadmap

CNOSSOS-EU is one of the milestones for the implementation of the Environmental Noise Directive 2002/49/EC (END) and is co-ordinated by the European Commission's Joint Research Centre on behalf of DG Environment. It concerns the development of *Common NOise aSSessment methOdS* (CNOSSOS-EU) for road, railway, aircraft and industrial noise for assessing noise exposure in Europe while in parallel to improving the reliability, consistency and the comparability of assessment results across the EU Member States. The Commission decided to develop the CNOSSOS-EU methodological framework in accordance with article 6.2 of the END. CNOSSOS-EU will provide the technical basis for preparing a Commission Implementing Decision to revise Annex II of the END, which will allow adopting, implementing and making operational CNOSSOS-EU in EU-27 before the 3rd round of noise mapping in Europe set for 2017.

In the context of the END, the European Commission decided to prepare The roadmap for the preparation and implementation of CNOSSOS-EU includes the following steps:

1. The exercise on equivalence of existing noise assessment methods in EU;
2. The definition of the target quality and input values requirements for strategic noise mapping in Europe;

3. The establishment of requirements and criteria for the screening, rating and preselection among existing assessment methods in EU, USA and Japan that best cover the needs and requirements of END;
4. The conceptualization of a 'fit for purpose' framework which allows a two-level application of CNOSSOS-EU according to the objectives of the assessment (i.e. strategic noise mapping on a mandatory basis – first level of application and action planning on a voluntary basis – second level of application);
5. The selection of the components of the common noise assessment methods through a series of dedicated Workshops, benchmarking/testing exercises and other ad-hoc meetings with European noise experts;
6. The drafting of the CNOSSOS-EU methodology along with guidelines for its competent use in connection with data requirements and in line with the two-levels 'fit for purpose' framework;
7. The in-depth consultation, review and finalization of CNOSSOS-EU via a formal process with the EU Members States;
8. The preparation of the operational part of CNOSSOS-EU;
9. The long-term planning for assisting the EU MS to reliably implementing CNOSSOS-EU in the context of the future rounds of strategic noise mapping in Europe.

The CNOSSOS-EU process comprises the following milestones:

- Phase A: Development of the core CNOSSOS-EU methodological framework for strategic noise mapping in EU by July 2012.
- Phase B: Implementation of the CNOSSOS-EU tools (reference software, EU database of input values) and extension of the CNOSSOS-EU framework to enable its application *for action planning (on a voluntary basis) by December 2015.*
- European Commission's Implementing Decision for reviewing Annex II of the Noise Directive and adoption of CNOSSOS-EU by the EU Member States so that it can be fully operational starting from the third round of strategic noise mapping in Europe in 2017

3. The outcome of Phase A of the CNOSSOS-EU process

Since 2010, the European Commission has advanced the preparation and development of CNOSSOS-EU in close liaison with the European Environment Agency (EEA) and the progressive involvement of a wide array of European noise experts who have been involved in critical and in-depth discussions with the EU Member States a process which took into account the state of the art of scientific/technical/practical knowledge about assessment of environmental noise in Europe and also at global scale.

In the period 2010-2012, the core of the CNOSSOS-EU methodological framework to be applied for strategic noise mapping in EU was developed and consists of the following parts:

- A quality framework that describes the objectives and requirements of CNOSSOS-EU;

- Parts describing road traffic, railway traffic, industrial noise source emission and sound propagation;
- A part describing the methodology chosen for the aircraft noise prediction and its associated performance database;
- A methodology to assign receiver points to the façades of buildings and to assign population data to the receiver points at the façades of buildings;
- The scope and the concept of the "Guidance for the competent use of CNOSSOS-EU", which should be fully developed in the implementation phase (phase B) of the CNOSSOS-EU process.

The outcome of Phase A of CNOSSOS-EU was officially presented by DG JRC and DG ENV to the EU MS and noise stakeholders in July 2012. The CNOSSOS-EU methodological framework for strategic noise mapping was published as a JRC Reference report [5].

4. Next steps

In 2012-2015 the Phase B of the CNOSSOS-EU process will be activated, which objective is to implement the CNOSSOS-EU tools and validate the common noise methodological framework before its adoption by the EU MS before the third round of strategic noise mapping in EU foreseen by 2017. The Phase B of CNOSSOS-EU foresees the following:

- developing the CNOSSOS-EU database of input parameters road traffic, railway traffic, aircraft and industrial noise emission parts;
- developing the CNOSSOS-EU reference software (including a point to point calculation procedure along a single path but excluding path finder)
- validating CNOSSOS-EU on a number of test cases to be decided together with the EU MS;
- developing the guidelines on the competent use of CNOSSOS-EU and making them available via a web based platform.

As far as the guidance on the competence use of CNOSSOS-EU is concerned, this is an important part of the overall common noise assessment methodological framework. Its development was motivated by the fragmented and disparate nature of the guidance provided in the context of the first round of strategic noise mapping in EU which naturally lead to use an array of approaches which introduced uncertainty into the process in terms of equivalence and comparability of the assessment results. As a result, the information reported to the EC, and subsequently analyzed by the EEA [6], presented an array of apparent inconsistencies and uncertainties when comparing results across the EU MS [7].

Whereas the technical descriptions of the CNOSSOS-EU methodological framework is focusing on what the methods entail, the CNOSSOS-EU guidance will come alongside the technical description of the framework and will focus on how it can be applied in practice. In the development of the CNOSSOS-EU guidance emphasis will be put on the consideration of:

- Data capture methods of noise related data, such as train emissions, vehicle noise, rail/wheel roughness, road surface data, etc.;

- Updating and expanding the WG-AEN GPGv2 toolkits to deal with CNOSSOS-EU requirements, in order to clarify what should be done on the basis of data availability;
- Developing the inputs and outputs of CNOSSOS-EU within an INSPIRE compliant, open and extensible standard providing a common data format which will empower interfacing with data providers, other data owners and cross border project liaison;
- Using of noise mapping software with emphasis to user settings and calculation processing, and control of uncertainty, receptor points for population assessment and guidance on grid resolution for final mapping scale;
- Post processing with emphasis to population exposure assessment, reporting to EC (ENDRM) and presentation to the public and stakeholders.

The CNOSSOS-EU guidance will be developed as a web based system which will allow tailoring the content of the guidelines across various potential end users (e.g., competent authorities, technical practitioners, data providers, data reporting coordinators).

5. Conclusions

The common noise assessment framework (CNOSSOS-EU) will introduce a coherent, transparent, optimized and reliable use for strategic noise mapping (first level of application, mandatory) and action planning (second level of application, voluntary) in relation to the data requirements, their quality and availability and last but not least, in terms of flexibility to adapt the national databases of input values, thus ensuring a smooth transition from existing national methods to the common methods.

For strategic noise mapping, CNOSSOS-EU can be used with less input data requirements along with default data where appropriate. In the future, CNOSSOS-EU will be extended for use also for action planning, in which case a more sophisticated version of the CNOSSOS-EU with associated increased requirements of input data will be enabled. This would help increasing the consistency among the action plans adopted by the EU MS which are drawn on the basis of the results of the strategic noise mapping as stated in Art. 1 of the END and also would allow a better evaluation of the effectiveness of the action plans and the development of a appropriate Community measures by the Commission to reduce noise emitted by the major noise sources (Art. 1.2 of the END). Last but not least, this would also allow the EU MS concentrating more on the reliable implementation of CNOSSOS-EU and its further improvement in a cost-optimized way.

6. References

[1] WHO-JRC. *Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe*. WHO-European Centre for Environment and Health, (2011).

[2] The Fifth Ministerial Conference on Environment and Health. *Parma Declaration on Environment and Health.* Parma, Italy, 10–12 March (2010)

(http://www.euro.who.int/en/who-we-are/policy-documents/parma-declaration-on-environment-and-health)

[3] Directive 2002/49/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.

[4] M. Paviotti, S. Kephalopoulos, *Assessment of the equivalence of national noise mapping methods against the interim methods.* JRC Technical report no. 2 related to administrative arrangement between DG ENV and DG JRC on "Services to support the implementation of Directive 2002/49/EC on Environmental Noise" (Contract no. 07-0303/2007/477794/MAR/C3), JRC, (2008).

[5] S. Kephalopoulos, M. Paviotti, F.Anfosso-Ledee, *JRC Reference Report on Common NOise ASSessment MethOdS in EU (CNOSSOS-EU)*. Publications Office of the European Union, EUR 25379 EN. ISBN 978-92-79-25281-5, (2012)

[6] C. Nugent, «Overview of noise exposure resulting from Strategic Noise Mapping», *Proceedings of Euronoise 2009* Conference, 26-28 October (2009), Edinburgh.

[7] M. Van den Berg, and G. Licitra, «EU-Noise Maps: analysis of submitted data and comments», *Proceedings of Euronoise 2009* Conference, 26-28 October 2009, Edinburgh.

Αξιολόγηση προγράμματος παρακολούθησης του περιβαλλοντικού Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου από την λειτουργία της Αττικής Οδού (2008-2011)

Επ. Καθ. Δρ Κωνσταντίνος ΒΟΓΙΑΤΖΗΣ
Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Ακουστικής Συγκοινωνιακών Έργων (ΕΠΑΣΕ)
Τμήμα ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Πολυτεχνική Σχολή, Παν. Θεσσαλίας
ΒΟΛΟΣ 38334
Email: kvogiatz@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο περιβαλλοντικός συγκοινωνιακός θόρυβος αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα ανά την ΕΕ που απειλεί την δημόσια υγεία. Η έκθεση στο περιβαλλοντικό θόρυβο στην Ευρώπη παρουσιάζει αυξητικές τάσεις σε σύγκριση με άλλους παράγοντες πρόκλησης στρες. Η διαχείριση του ακουστικού περιβάλλοντος υπήρξε προτεραιότητα της Αττικής Οδού, μέσα από τον κατάλληλο ακουστικό σχεδιασμό και κατασκευή των αναγκαίων μέτρων αντιθορυβικής προστασίας, και μέσω της συνεχούς παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων του οδικού κυκλοφοριακού θορύβου. Στα πλαίσια της ετήσιας εκπόνησης του Προγράμματος Παρακολούθησης Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου (Ο.Κ.Θ.), από τη λειτουργία της Αττικής οδού, και των αποτελεσμάτων του Στρατηγικού Χάρτη Θορύβου στο παρόν άρθρο, γίνεται η συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση των σχετικών ακουστικών καταγραφών για τα έτη 2008 μέχρι και 2011 και διερευνάται η στατιστική συσχέτιση μετρημένων και θεωρητικά υπολογισμένων τιμών των δεικτών θορύβου.

Evaluation of "ATTIKI ODOS" monitoring program on environmental road traffic noise (2008-2011)

ABSTRACT

The health impacts of environmental noise especially from road transportation - is widely accepted as an end-point of environmental noise that can be taken as a basis for evaluating the impact of noise on the exposed population. Attica Tollway, a modern motorway (ring road of the greater metropolitan area of Athens), during 2008-2011, in close collaboration with the University of Thessaly -Faculty of Civil Engineering (Laboratory of Transportation Environmental Acoustics (L.T.E.A.), has completed the Strategic Noise Mapping 2008 and a full environmental noise monitoring program. In this paper an full statistical analysis was performed in order

to evaluate the correlation between theoretical & measured values of both noise indicators L_{den} & L_{night}, for both 8 permanent monitoring stations & 55 selected mobile monitoring locations, proving an excellent correlation.

Εισαγωγή

Ο περιβαλλοντικός συγκοινωνιακός θόρυβος αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα ανά την ΕΕ που απειλεί την δημόσια υγεία. Η έκθεση στο περιβαλλοντικό θόρυβο στην Ευρώπη παρουσιάζει αυξητικές τάσεις σε σύγκριση με άλλους παράγοντες πρόκλησης στρες. Η αστικοποίηση, η αύξουσα ζήτηση οδικής και αεροπορικής μεταφοράς και ο αναποτελεσματικός αστικός χωροταξικός σχεδιασμός αποτελούν τους κύριους παράγοντες έκθεσης στον περιβαλλοντικό θόρυβο[1]. Η εναρμόνιση του Ελληνικού θεσμικού πλαισίου με την Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2002/49/ΕΚ, η οποία υλοποιήθηκε με την ΚΥΑ 13586/724 (ΦΕΚ Β΄384 28.3.2006)[2][3] περί «Καθορισμού μέτρων, όρων και μεθόδων για την αξιολόγηση και τη διαχείριση του θορύβου στο περιβάλλον», σε συνδυασμό με την νεώτερη ΚΥΑ με αριθμ. οικ. 211773/ΦΕΚ Β 1367/ 27 Απριλίου 2012**,** καθόρισε τα όρια του οδικού κυκλοφοριακού, σιδηροδρομικού και αεροπορικού θορύβου, σύμφωνα με τους δείκτες αξιολόγησης L_{den} (24−ωρος) και L_{night} (8−ωρος νυκτερινός), έτσι όπως αυτοί ορίζονται στην ανωτέρω Οδηγία[4].

Η διαχείριση του ακουστικού περιβάλλοντος υπήρξε προτεραιότητα ήδη από τη φάση κατασκευής της Αττικής Οδού, με τον σχεδιασμό και κατασκευή των αναγκαίων μέτρων προστασίας, και μέσω της συνεχούς παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων του οδικού κυκλοφοριακού θορύβου. Επίσης στα πλαίσια της εφαρμογής της ανωτέρω Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ και της ΚΥΑ 13586/724/ΦΕΚΒ'384/28.3.2006 ολοκληρώθηκε η "Στρατηγική Χαρτογράφηση του Ο.Κ.Θ. στην Αττική Οδό & την ΔΠΛΥ" (έτος αναφοράς ΣΧΘ 2008). Η μελέτη αυτή[5] αποτελεί μία ολοκληρωμένη εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας και εξασφάλισε τη δόμηση του κατάλληλου υπολογιστικού περιβάλλοντος σύμφωνα με τις προβλέψεις του « Good Practice for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure»[6].

1. Το πρόγραμμα παρακολούθησης της Αττικής Οδού

1.1 Σύντομη Περιγραφή του Έργου

Η Αττική Οδός ένα πρωτοποριακό έργο που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της παραχώρησης είναι ένα από τα μεγαλύτερα συγχρηματοδοτούμενα περιαστικά οδικά έργα της Ευρώπης. Πρόκειται για ένα σύγχρονος αυτοκινητόδρομος μήκους 65 χλμ. με 3 λωρίδες κυκλοφορίας και μια λωρίδα έκτακτης ανάγκης ανά κατεύθυνση και αποτελεί τον περιφερειακό δακτύλιο της ευρύτερης μητροπολιτικής περιοχής της Αθήνας[7]. Ο αυτοκινητόδρομος της Αττικής Οδού αποτελεί τον συνδετικό κρίκο του οδικού άξονα ΠΑΘΕ (Πάτρα-Αθήνα-Θεσσαλονίκη-Εύζωνοι) αφού συνδέει την Εθνική Οδό Αθηνών-Λαμίας με την Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου, παρακάμπτοντας το κέντρο της Αθήνας, και αποτελείται από:

- την Ελεύθερη Λεωφόρο Ελευσίνας-Σταυρού-Σπάτων (Ε.Λ.Ε-Σ-Σ), μήκους περίπου 52 χλμ. Και
- την Δυτική Περιφερειακή Λεωφόρο Υμηττού (Δ.Π.Λ.Υ), μήκους περίπου 13 χλμ

Τα βασικά πλέον πρόσφατα (περίοδος 2008-2011), κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά του οδικού έργου δίνονται (σε επίπεδο εισόδων στο σύστημα) στον πίνακα στη συνέχεια:

Πίνακας 1.1 Κυκλοφοριακά χαρακτηριστικά Αττικής Οδού: 2008 -2011

Έτος	Σύνολο Ε.Λ.Ε-Σ-Σ & Δ.Π.Λ.Υ		Ε.Λ.Ε-Σ-Σ		Δ.Π.Λ.Υ	
	Σύνολο οχημάτων	Βαρέα Οχημ.	Σύνολο οχημάτων	Βαρέα Οχημ.	Σύνολο οχημάτων	Βαρέα Οχημ.
2008	300.987	5,08	236.994	5,80	63.993	2,39
2009	307.605	4,46	240.294	5,12	67.311	2,12
2010	281.329	4,29	222.016	4,92	59.313	1,93
2011	250.491	4,08	196.649	4,65	53.842	2,00

1.2 Το πρόγραμμα παρακολούθησης περιβαλλοντικού οδικού κυκλοφοριακού θορύβου της Αττικής Οδού

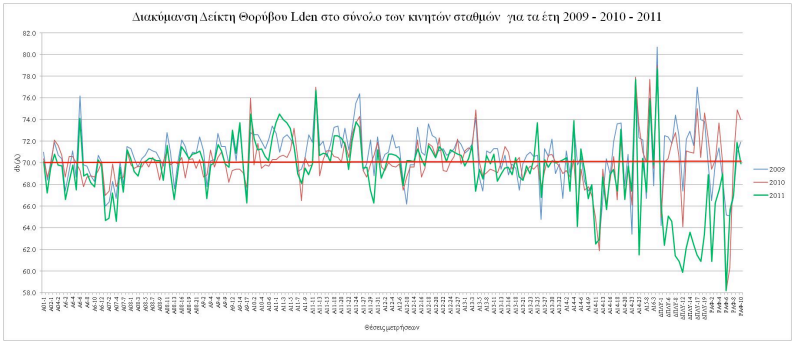
Η "Αττική Οδός Α.Ε." στα πλαίσια της ετήσιας διαχείρισης και καταπολέμησης του Περιβαλλοντικού Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου έχει ήδη εγκαταστήσει και λειτουργεί από το 2002 ένα πλήρες δίκτυο οκτώ (8) μόνιμων και διακοσίων δέκα (210) κινητών σταθμών 24ωρης παρακολούθησης του οδικού κυκλοφοριακού θορύβου, ενώ με βάση τα σχετικά αποτελέσματα έχει υλοποιηθεί ήδη ένα εκτεταμένο πρόγραμμα υλοποίησης περίπου 90.000 $μ^2$ αντιθορυβικών πετασμάτων. Το πρόγραμμα μετρήσεων στις ανωτέρω θέσεις (με έμφαση στις κινητές καταγραφές οι οποίες τροποποιούνται εν μέρει χωροταξικά -σε ετήσια βάση- προκειμένου να καλύψουν τυχόν ειδικές ανάγκες παρακολούθησης) περιλαμβάνει, ανά θέση, την καταγραφή των παρακάτω δεικτών :

- ποσοστομετρικοί δείκτες L_1, L_{10}, L_{50}, L_{95}, L_{99} και δείκτες L_{max} και L_{min},
- δείκτες L_{10}(18ωρ) & ενεργειακά ισοδύναμης μέσης ηχοστάθμης L_{Aeq}(08.00-20.00) στα πλαίσια της παλαιότερης ΥΑ 17252 που όριζε μέχρι πρόσφατα τους δείκτες και τα όρια του οδικού περιβαλλοντικού θορύβου,
- ενεργειακά ισοδύναμης μέσης ηχοστάθμης L_{Aeq}(24h) και,
- τους δείκτες L_{den}, & L_{night} όπως ορίζονται στην Οδηγία 2002/49/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Ιουνίου 2002 και που αποτελούν πλέον τους νέους δείκτες της Ελληνικής νομοθεσίας σύμφωνα με την νέα ΚΥΑ με αριθμ. οικ. 211773-ΦΕΚΒ-1367-27-04-2012

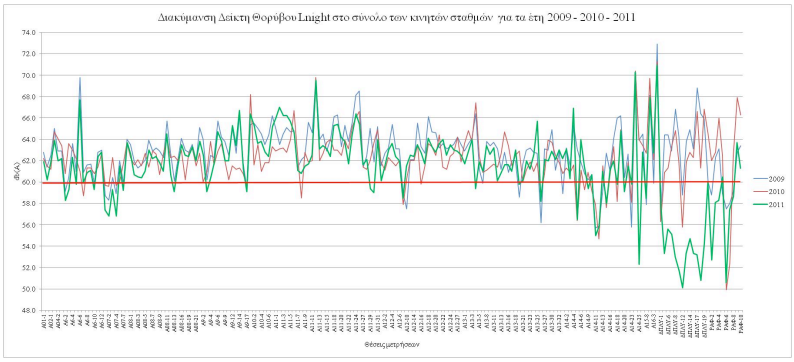
Η επιτυχής εκτέλεση του προγράμματος εξασφαλίζεται με την χρήση ειδικών αυτοκινούμενων σταθμών παρακολούθησης θορύβου κατάλληλα διαμορφωμένων - με εφαρμογή ύψους μέτρησης 4,0μ. - εξοπλισμένων με ειδικούς στατιστικούς

αναλυτές περιβαλλοντικού θορύβου και διάταξη μικροφώνου παντός καιρού σύμφωνα με την Οδηγία 2002/49/ΕΚ.

Για το σύνολο των θέσεων αυτών στα σχήματα 1.1 και 1.2 στη συνέχεια, δίνεται η διαχρονική διακύμανση των δεικτών θορύβου L_{den} & L_{night}, στο σύνολο των κινητών σταθμών, και με αναφορά στα πρόσφατα ανώτατα επιτρεπόμενα περιβαλλοντικά όρια των 70dB(A) & 67dB(A), αντίστοιχα. Στο πλαίσιο του προγράμματος παρακολούθησης και ιδιαίτερα σε ότι αφορά την πλέον πρόσφατη χρονική περίοδο, από το 2008 έως και το 2011, επιλέχθηκε ένα χαρακτηριστικό αντιπροσωπευτικό υποσύνολο 55 διακριτών γεωγραφικών θέσεων, κινητών σταθμών (ΜΕ & ΧΩΡΙΣ εφαρμογή αντιθορυβικού πετάσματος), στις οποίες αφ' ενός επικρατούν διαχρονικά κοινά χαρακτηριστικά αφ ετέρου διατίθενται αναλυτικές ακουστικές καταγραφές, για την ανωτέρω περίοδο καθώς και επιλύσεις του μοντέλου Στρατηγικής Χαρτογράφησης Θορύβου του 2008.



Σχήμα 1.1 Διακύμανση Δείκτη Θορύβου L_{den} στο σύνολο των κινητών σταθμών για τα έτη 2009 - 2010 – 2011. Όριο 70 dB(A)



Σχήμα 1.2 Διακύμανση Δείκτη Θορύβου L_{night} στο σύνολο των κινητών σταθμών για τα έτη 2009 - 2010 – 2011 – Όριο 60 dB(A)

2. Στρατηγική Χαρτογράφηση Θορύβου της Αττικής Οδού (2008)

Στο πλαίσιο της εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ και της ΚΥΑ 13586/724/ΦΕΚΒ'384/28.3.2006 ολοκληρώθηκε πρόσφατα η "Στρατηγική

Χαρτογράφηση του Ο.Κ.Θ. στην Αττική Οδό & την ΔΠΛΥ" (έτος αναφοράς ΣΧΘ 2008). Η Στρατηγική Χαρτογράφηση 2008[5] βασίσθηκε σε πραγματικά κυκλοφοριακά δεδομένα ώστε να διαμορφωθεί το σενάριο βάσης του ΣΧΘ 2008, με ψηφιακό, γεωγραφικό τρισδιάστατο μοντέλο (οδικό και κτιριακό) το οποίο δομήθηκε, σε σύστημα συντεταγμένων το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87), με πλήρη γεωγραφική βάση δεδομένων σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (G.I.S.), με την εισαγωγή και περιγραφικής πληροφορίας σε βάση δεδομένων και με ελάχιστη γεωγραφική ενότητα, το επίπεδο του κτιρίου. Η περιοχή μελέτης, αφορά ένα συνολικό μήκος οδού - σε γειτνίαση με αστικές περιοχές ανθρωπογενούς περιβάλλοντος - 6.9 περίπου χιλιομέτρων (όπου 9.2 χιλ. της ΔΠΛΥ), έκτασης 18.950 στρεμμάτων, σε ζώνη πλάτους ≥200 μέτρων περίπου εκατέρωθεν της οδού (συνολικό πλάτος ≥ 400 μέτρα). Επισημαίνεται ότι στο πλαίσιο της σχετικής μελέτης Σ.Χ.Θ. της Αττικής Οδού το οποίο αναπτύχθηκε με το λογισμικό CadnaA, αποδόθηκαν συνολικά 8.541 κτίρια με διάφορες χρήσεις γης[5],[8]. Στα σχήματα 2.1 και 2.2 στην συνέχεια δίνονται ενδεικτικά αποσπάσματα του ΣΧΘ για τους δείκτες θορύβου L_{den} & L_{night}, στην περιοχή του Α.Κ. Δουκίσσης Πλακεντίας.



Σχήμα 2.1 Απόσπασμα ΣΧΘ 2008-Δείκτης Lden

Σχήμα 2.2 Απόσπασμα ΣΧΘ 2008-Δείκτης Lnight

3. Στατιστική διερεύνηση

Με βάση την ανωτέρω Μελέτη Στρατηγικής Χαρτογράφησης του Οδικού Κυκλοφοριακού Θορύβου (Ο.Κ.Θ.) στην Αττική Οδό (ΣΧΘ 2008) και το αντίστοιχο πρόγραμμα παρακολούθησης την ίδια περίοδο, γίνεται στην συνέχεια, αναλυτική στατιστική διερεύνηση, προκειμένου να διαπιστωθεί ο "βαθμός συσχέτισης" των θεωρητικών αποτελεσμάτων του ακουστικού μοντέλου του ΣΧΘ 2008, των δεικτών L_{den}, & L_{night}, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων στο ανωτέρω δείγμα αντιπροσωπευτικών θέσεων, που μετρήθηκαν στα πλαίσια του αντίστοιχου ετήσιου προγράμματος παρακολούθησης της Αττικής Οδού για το 2008. Το πρόγραμμα εκπονήθηκε από το Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Ακουστικής Συγκοινωνιακών Έργων (ΕΠΑΣΕ), του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα πλαίσια του σχετικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών[9].

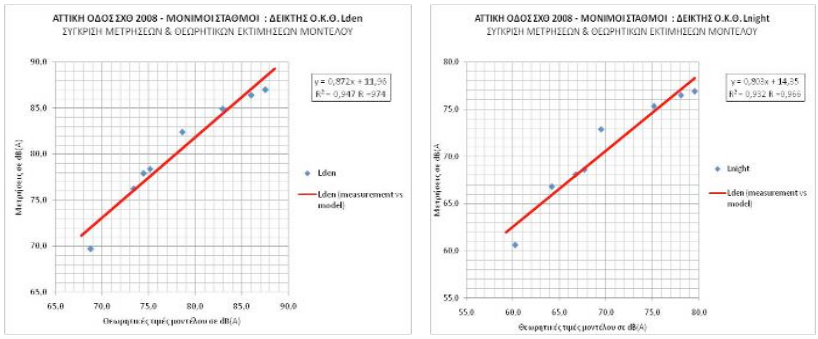
Πιο αναλυτικά και προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός συσχέτισης των θεωρητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου του ΣΧΘ της Αττικής Οδού (2008), με τα αποτελέσματα του προγράμματος καταγραφών, έγινε στατιστική διερεύνηση της

συσχέτισης των θεωρητικών προβλέψεων με αποτελέσματα των καταγραφών που εκπονήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος παρακολούθησης της Αττικής Οδού για την ίδια χρονική περίοδο στις επιλεχθείσες 55 διακριτές γεωγραφικές θέσεις και στους 8 μόνιμους σταθμούς παρακολούθησης θορύβου) για τους νέους θεσμοθετημένους δείκτες θορύβου L_{den} & L_{night}.

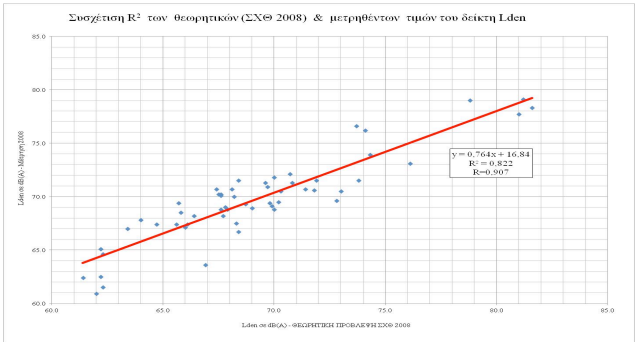
Στο πλαίσιο αυτό, εκτιμήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης R^2 και για τους μόνιμους σταθμούς του συστήματος παρακολούθησης, δεδομένου ότι η χωροθέτηση τους εξασφαλίζει πληρέστερη συσχέτιση με το μοντέλο λόγω ετήσιας συνεχούς καταγραφής, απουσίας εμποδίων και λοιπών αυξητικών παραμέτρων υπολογισμού.

Επισημαίνεται ότι οι θεωρητικές εκτιμήσεις από την επίλυση του μοντέλου στις ανωτέρω θέσεις έγιναν για τα κυκλοφοριακά δεδομένα της «ημέρας ακουστικής» καταγραφής σύμφωνα με τα στοιχεία που διαθέτει σε ημερήσια βάση η Αττική οδός. Τα σχετικά αποτελέσματα που δίνονται στα διαγράμματα των σχημάτων στη συνέχεια, υποδεικνύουν υψηλή συσχέτιση θεωρητικών και πραγματικών τιμών και για τους δύο δείκτες θορύβου που για τη γραμμική παλινδρόμηση ο δείκτης R^2 κυμαίνεται :

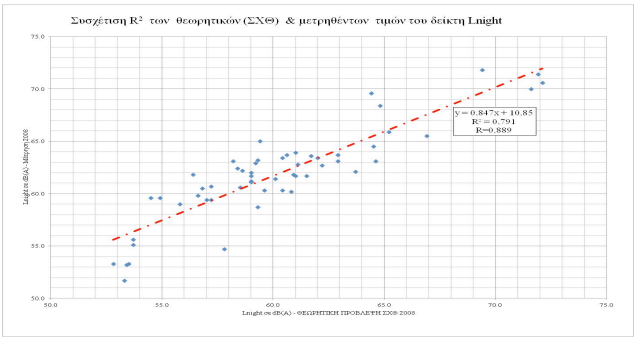
- για τους μόνιμους σταθμούς από 0,9 έως και 0,97[10] και
- για τους 55 κινητούς σταθμούς/θέσεις από 0,8 έως 0,82



Σχήμα 3.1 Σύγκριση θεωρητικής και μετρηθείσας στάθμης των δεικτών θορύβου L_{den} & L_{night} στο σύνολο των μόνιμων σταθμών παρακολούθησης θορύβου.

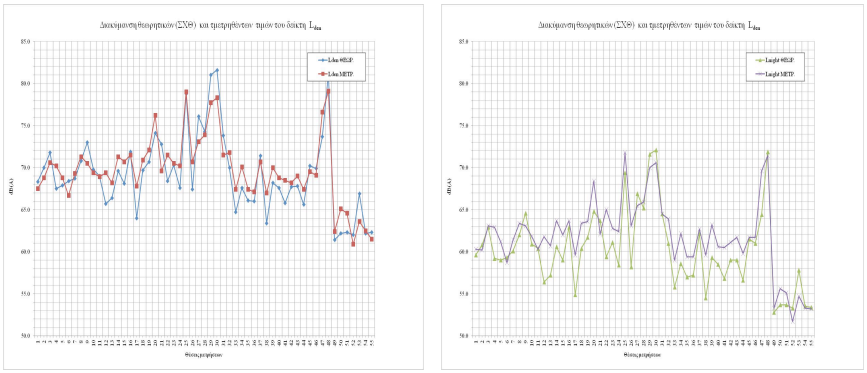


Σχήμα 3.2 Σύγκριση θεωρητικής και μετρηθείσας στάθμης του δείκτη θορύβου L_{den} στο σύνολο των κινητών θέσεων καταγραφής παρακολούθησης θορύβου.



Σχήμα 3.3 Σύγκριση θεωρητικής και μετρηθείσας στάθμης του δείκτη θορύβου L_{night} στο σύνολο των κινητών θέσεων καταγραφής παρακολούθησης θορύβου.

Στο Σχήμα 3.4 δίνεται η διακύμανση των θεωρητικών και προγραμματικών τιμών των δεικτών L_{den} & L_{night}. Επισημαίνεται ότι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των διαφορών των θεωρητικών και μετρηθέντων τιμών των δεικτών παρουσιάζουν αξιοσημείωτα μικρές τιμές που συνηγορούν επίσης στη μεγάλη συσχέτιση τους.



Σχήμα 3.4 Διαφορές θεωρητικών-μετρηθέντων τιμών των δεικτών θορύβου L_{den} & L_{night} στο σύνολο των κινητών θέσεων καταγραφής παρακολούθησης θορύβου.

Πίνακας 3.1 Μ.Ο. & Τυπικές αποκλίσεις των διαφορών θεωρητικών & μετρηθέντων τιμών των δεικτών θορύβου

Δείκτης Θορύβου	Διαφορά θεωρητών (ΣΧΘ 2008) & μετρηθέντων τιμών (πρόγραμμα 2008)	
	Μ.Ο.	Τυπική Απόκλιση
L_{den}	***-0.6***	***-1.7***
L_{night}	***2.0***	***2.1***

4. Συμπεράσματα

Η "Αττική Οδός Α.Ε." έχει οργανώσει ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό πρόγραμμα παρακολούθησης του περιβαλλοντικού θορύβου με ένα πρωτοποριακό δίκτυο οκτώ (8) μόνιμων και διακοσίων δέκα (210) κινητών σταθμών 24ωρης συνεχούς παρακολούθησης, ενώ παράλληλα κάλυψε πλήρως τις απαιτήσεις της ανωτέρω Οδηγίας. Με βάση τα αποτελέσματα ανωτέρω συνάγεται ότι η εφαρμογή της Γαλλικής Μεθοδολογίας «NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB)», (standard «XPS 31-133»), σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/49/ΕΚ, εξασφαλίζει ιδιαίτερα ικανοποιητική συσχέτιση με τις μετρηθείσες τιμές και αποτελεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο Στρατηγικής Χαρτογράφησης και αξιολόγησης του περιβαλλοντικού οδικού κυκλοφοριακού θορύβου στις Ελληνικές συνθήκες.

5. Αναφορές

[1] http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environmental-health/noise

[2] ΟΔΗΓΙΑ 2002/49/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 25ης Ιουνίου 2002, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L 189/12 EL (18.7.2002)

[3] Κ. Βογιατζής, Σ.Π. Χαϊκάλη, & Α.Τ ζίκα-Χατζοπούλου, *ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΤΟΠΙΟΥ-ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΘΟΡΥΒΟ* Εκδ. Παπαπωτηρίου, ISBN 960-718-256-1, (2009).

[4] ΚΥΑ αρ. οικ. 211773/ΦΕΚ Β 1367/ 27 Απριλίου 2012. "Καθορισμός των Δεικτών Αξιολόγησης και Ανωτάτων Επιτρεπομένων Ορίων Δεικτών Περιβαλλοντικού Θορύβου …….. και άλλες διατάξεις".

[5] Μελέτη Χαρτογράφησης Ο.Κ.Θ. & Εκπόνησης Σχεδίων Δράσης Αντιμετώπισης σχετικών προβλημάτων στην Αττική Οδό "ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ 2008 ΑΤΤΙΚΗΣ ΟΔΟΥ - ΔΕΙΚΤΕΣ L_{den} & L_{night}" ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ Α.Ε. - ΣΣΕ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Α.Ε., (2010)

[6] "Position Paper (Final Draft) Good Practice for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure", Version 2, 13th January (2006)

[7] http://www.aodos.gr

[8] Κ. Βογιατζής, *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ & ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ* Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, ISBN 978-960-266-299-1, (2010)

[9] Π. Αντωνίου & Ε. Βασιλείου, ΠΜΣ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ», Εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ και της Γαλλικής μεθόδου πρόβλεψης Οδικού κυκλοφοριακού Θορύβου «NMPB Routes 96» στο πρόγραμμα παρακολούθησης περιβαλλοντικού θορύβου της ΑΤΤΙΚΗΣ ΟΔΟΥ, Τμήματα: ΕΛΕΥΣΙΝΑ – ΑΚ ΚΗΦΙΣΙΑΣ & ΑΚ ΚΗΦΙΣΙΑΣ – ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ.

[10] K. Vogiatzis «STRATEGIC ENVIRONMENTAL NOISE MAPPING & ACTION PLANS IN ATHENS RING ROAD (ATIIKI ODOS) – GREECE», WSEAS TRANSACTIONS on ENVIRONMENT and DEVELOPMENT ISSN: 1790-5079, Issue **10**, Volume **7**, (October 2011)

Ηχομόνωση εναλλάκτη ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με νέα σύνθετα ηχομονωτικά και ταυτόχρονα ηχοαπορροφητικά υλικά

Ηλίας Κωστάζος
Πρόεδρος εταιριών Iselco Hellas ΕΠΕ – Ηχοπεριβαλλοντική ΤΕ
Σύμβουλος Ακουστικής, Dr. Ναυπηγός, Μηχανολόγος Μηχανικός,
Νικομηδείας 36, 12243 Χαΐδάρι
kostazos@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ηχοαπορροφητικών υλικών από πολυεστερικές ίνες όπως, η λεία τους επιφάνεια, η αυξημένη σταθερότητα σε μακρόχρονη καταπόνηση, η απόλυτα συμβατή με την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον χημική τους σύνθεση σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν απελευθερώνουν ίνες στην ατμόσφαιρα αλλά και η αποτροπή ανάπτυξης εντόμων, νοσογόνων μικροοργανισμών και βακτηριδίων, τα καθιστά απολύτως κατάλληλα για χρήση σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις κάθε είδους.

Τα καθιστούν επίσης ιδιαίτερα χρήσιμα για τη δημιουργία σύνθετων ηχομονωτικών ή/και αντικραδασμικών υλικών με εξαιρετική ηχοαπορροφητική και ταυτόχρονα ηχομονωτική συμπεριφορά.

Οι δυνατότητες των υλικών αυτών αξιοποιήθηκαν με τον καλύτερο τρόπο για την ηχομόνωση εναλλάκτη θερμότητας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου ¨Λ¨ της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Sound insulation of power generator' heat exchanger using new composite soundproofing and sound absorbing materials

ABSTRACT

The special characteristics of polyester fiber sound-absorbing materials such us the smooth surface, their mechanical stability even under intense mechanical stress, their chemical composition which is fully compatible with the human health and the environment combined with the fact that they do not release fibers into the air and at the same time they are preventing the growth of insects, disease-causing micro-organisms and bacteria, make these materials particularly appropriate for use in engineering applications of all kinds.

Their technical characteristics make them also particularly useful in creating composite sound insulating and/or anti-vibration materials with excellent sound absorptive and at the same time excellent sound insulating behavior.

These materials were utilized in the best possible way for the sound insulation of power generator's heat exchanger installed in the surrounding area of the building ¨L¨ of the Marine Engineering School of N.T.U.A..

1. Εισαγωγή

Τα νέα οικολογικά ηχοαπορροφητικά υλικά από πολυεστερικές ίνες παρουσιάζουν μια σειρά από ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία επιτρέπουν τη σχεδίαση και υλοποίηση κατασκευών για την αποτελεσματική ηχομόνωση πηγών θορύβου κάθε είδους καθώς βοηθούν και για τον έλεγχο της ακουστικής κλειστών χώρων με νέου τύπου κατασκευές, λειτουργικές και ταυτόχρονα μειωμένου κόστους.

Παρουσιάζουν υψηλή δομική σταθερότητα ακόμη και κάτω από έντονη και μακρόχρονη μηχανική καταπόνηση και είναι δυνατόν να διαμορφώνονται με απόλυτα λεία επιφάνεια. Η χημική τους σύνθεση ειναι απόλυτα συμβατή με την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη στη μάζα τους εντόμων, νοσογόνων μικροοργανισμών και βακτηριδίων ενώ χάρη στη σταθερότητα της δομής τους δεν απελευθερώνουν μικροσωματίδια στην ατμόσφαιρα όπως άλλα ινώδη υλικά. Παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή ηχοαπορροφητική ικανότητα, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, αλλά και υψηλή θερμική αντίσταση.

Οι ιδιότητες των ηχοαπορροφητικών υλικών από πολυεστερικές ίνες τα καθιστούν επίσης ιδιαίτερα χρήσιμα για τη δημιουργία σύνθετων ηχομονωτικών και αντικραδασμικών υλικών αποτελούμενων από στρώματα ηχοαπορροφητικών φύλλων πολυεστερικών ινών και συνθετικών μεμβρανών υψηλής πυκνότητας με εξαιρετική ηχοαπορροφητική και ταυτόχρονα ηχομονωτική συμπεριφορά.

Η αυξημένη ηχοαπορροφητική και ηχομονωτική τους ικανότητα, η λεία τους επιφάνεια, η σταθερότητα της δομής τους και η αντοχή τους σε μηχανικές καταπονήσεις αποτελεί επίσης ένα ισχυρό συγκριτικό πλεονέκτημα της χρήσης τους για την επένδυση κάθε είδους αεραγωγών και την κατασκευή ηχοπαγίδων όπου οι χαμηλές συχνότητες εμφανίζονται σε υψηλές στάθμες.

Οι παραπάνω δυνατότητες των υλικών αυτών αξιοποιήθηκαν με τον καλύτερο τρόπο για την ηχομόνωση εναλλάκτη θερμότητας ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους εγκατεστημένου στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου ¨Λ¨ της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

2. Δεδομένα

2.1. Περιγραφή.

Ο εναλλάκτης βρίσκεται εγκατεστημένος σε τμήμα του περιβάλλοντα χώρου του κτιρίου ¨Λ¨ της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π, το οποίο περιβάλλεται από κτίρια με αίθουσες εργαστήρια και γραφεία. Η λειτουργία του εναλλάκτη θερμότητας στο χώρο, είχε σαν αποτέλεσμα την εκπομπή υψηλής στάθμης θορύβου στον περιβάλλοντα χώρο, ο οποίος αυξάνονταν συμαντικά λόγω των ανακλάσεων στις όψεις των κτιρίων, με αποτέλεσμα την έντονη όχληση σε αίθουσες και γραφεία των γειτονικών κτιρίων.

Για την αντιμετώση του προβλήματος μας ζητήθηκε η κατασκευή ηχομονωτικού κλωβού από οπλισμένο σκυρόδεμα και η τοποθέτηση κατάλληλων ηχοπαγίδων για τον απρόσκοπτο αερισμό του εναλλάκτη χωρίς την ταυτόχρονη διαφυγή θορύβου.

2.2. Προδιαγραφές.

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κυρίου του έργου οι προδιαγραφές για το σχεδιασμό του ηχομονωτικού κλωβού και των ηχοπαγίδων ήταν οι ακόλουθες:

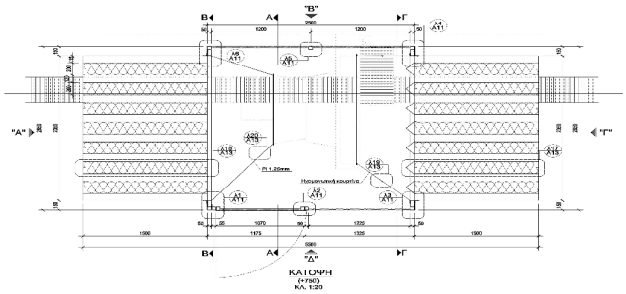
1. Ελάχιστη ηχομονωτική ικανότητα 25 dB(A)
2. Παροχή αέρα στον εναλλάκτη 58000 m3/h.
3. Μέγιστη πτώση πίεσης στις ηχοπαγίδες 150 Pa

3. Τεχνική Πρόταση

3.1. Κατασκευή ηχομονωτικού κλωβού στον ψύκτη του εναλλάκτη θερμότητας με δυνατότητα πλήρους αποσυναρμολόγησης

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, αντί της δαπανηρής και με πολλά προβλήματα στην κατασκευή αλλά και σε μελλοντικές τροποποιήσεις της εγκατάστασης κατασκευή του ηχομονωτικού κλωβού από οπλισμένο σκυρόδεμα, προτάθηκε η κατασκευή μεταλλικού ηχομονωτικού κλωβού συνολικού εμβαδού περίπου 22,00 m^2 και ύψους 2,50m. Ο μεταλλικός κλωβός θα είχε σκελετό από γαλβανισμένες κοιλοδοκούς και τοιχώματα σύνθετα, αποτελούμενα από φύλλο γαλβανισμένης λαμαρίνας πάχους 2,mm και μια στρώση σύνθετου ηχομονωτικού – ηχοαπορροφητικού υλικού FONOMAP 213 πάχους 32mm.

Σχήμα 3.1.1 Κάτοψη ηχομονωτικού κλωβού



Το FONOMAP 213 αποτελείται από μία στρώση ηχαπορροφητικού υλικού θερμοσυγκολλητών πολυεστερικών ινών πάχους 30mm και μία στρώση συνθετικού υλικού MAPFLEX από πλαστικοποιητές με βάση EPDM/EVA.

Εικόνα 3.1.2 FONOMAP 213

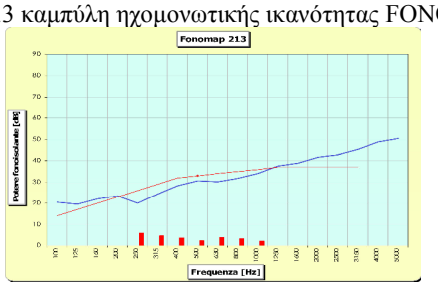


Για την εξασφάλιση της δυνατότητας συντήρησης του εναλλάκτη προβλεπόταν η κατασκευή μιας θύρας ίσης ηχομονωτικής ικανότητας με το

κέλυφος του κλωβού ενώ η οροφή του ηχομονωτικού κλωβού θα ήταν πλήρως αποσυναρμολογούμενη κατασκευασμένη όπως οι ηχοπαγίδες και τα τοιχώματα.

Ο παραπάνω τρόπος κατασκευής των σύνθετων αυτών τοιχωμάτων, με την πλήρη αποσύνδεση της εσωτερικής ηχομονωτικής στρώσης από την εξωτερική στρώση λαμαρίνας, παρέχει σημαντικά βελτιωμένη ηχομόνωση στο πεδίο των χαμηλών συχνοτήτων και βελτιώνει την απόσβεση δονήσεων των τοιχωμάτων του ηχομονωτικού κλωβού.

Πίνακας 3.1.3 καμπύλη ηχομονωτικής ικανότητας FONOMAP 213



Ταυτόχρονα, με την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του υλικού FONOMAP 213 γίνεται περιττή η κατασκευή εσωτερικών επενδύσεων από διάτρητη λαμαρίνα γεγονός που συμβάλλει στην απλούστευση της κατασκευής μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος της και αυξάνοντας την απόδοσή της.

3.2. Κατασκευή ηχοπαγίδων του ηχομονωτικού κλωβού.

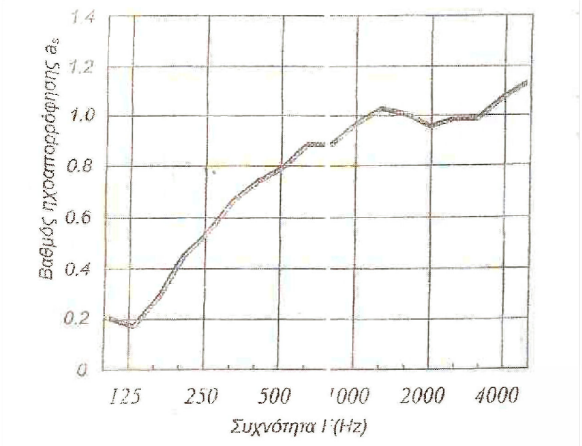
Προτάθηκε επίσης η κατασκευή δύο ηχοπαγίδων ορθογωνικής διατομής διαστάσεων:

α) 2,35m X 1,80m X 1,80m (Π x Υ x Μ) για την ηχοπαγίδα προσαγωγής αέρα και

β) 2,35m X 1,80m X 2,00m (Π x Υ x Μ) για την ηχοπαγίδα απαγωγής αέρα.

Προβλέπονταν να είναι κατασκευασμένες από φύλλα συμπαγούς γαλβανισμένης λαμαρίνας κατάλληλου πάχους, και εσωτερικά ηχοαπορροφητικά διαφράγματα αποτελούμενα από ηχοαπορροφητικό υλικό θερμοσυγκολλητών ινών πολυεστέρα IZITHERM 50/40 πάχους 50mm.

Πίνακας 3.1.4 Ηχοαπορροφητική ικανότητα IZITHERM πάχους 50mm



f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
a_s	0,22	0,19	0,30	0,46	0,55	0,67	0,74	0,79	0,88	0,88	0,96	1,02	1,00	0,95	0,98	0,98	1,06	1,12

4. Ακουστικές μετρήσεις

4.1 Όργανα Ηχομετρήσεων

Για τις ηχομετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

Ηχόμετρο τύπου Bruel & Kjaer type 2232, Class 1 (IEC 651), με S/N 1879300, Φασματικός αναλυτής Klark-Teknik type DN 60, με S/N 1544, Βαθμονομητής Bruel & Kjaer type 4230, με S/N 1511267.

Πριν, κατά την διάρκεια και μετά το τέλος των ηχομετρήσεων έγινε βαθμονόμηση του οργάνου μέτρησης με τη μέθοδο της εφαρμογής πρότυπης ηχητικής στάθμης (94dB στα 1000 Hz).

4.2 Συνθήκες Ηχομετρήσεων

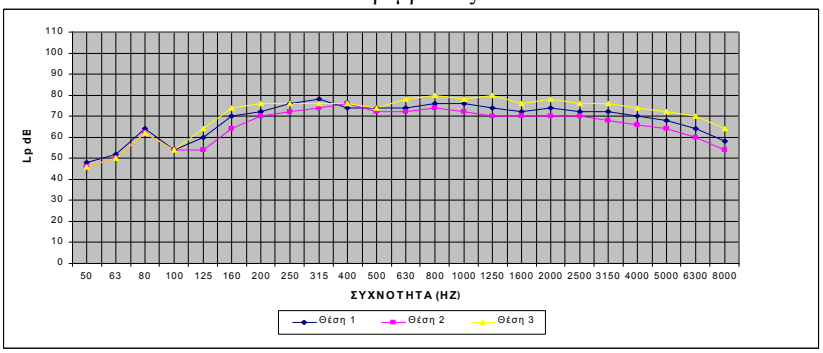
Οι συνθήκες περιβάλλοντος κατά την διαδικασία των μετρήσεων πριν την έναρξη των εργασιών κατασκευής του ηχομονωτικού κλωβού, όπως και με το πέρας αυτών, επιλέχτηκαν ώστε αν είναι κατά το δυνατόν όμοιες (άνεμος ίδιας κατεύθυνσης και έντασης, υγρασία και θερμοκρασία αντίστοιχα).

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην θέση 3 (4m από τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα απαγωγής αέρα) μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, καταγράφουν την ηχομονωτική ικανότητα της ηχοπαγίδας αφού η ηχομονωτική αξία του κλωβού εκτιμάται άνω των R_w 45dB(A), ενώ η απόσταση και η ηχομονωτική ικανότητα της ηχοπαγίδας προσαγωγής συντελούν ώστε να μην συμβάλλει στην αύξηση της στάθμης των μετρήσεων της πρώτης.

Θόρυβος βάθους: L_p: 35,0 – 38,5dB(A)

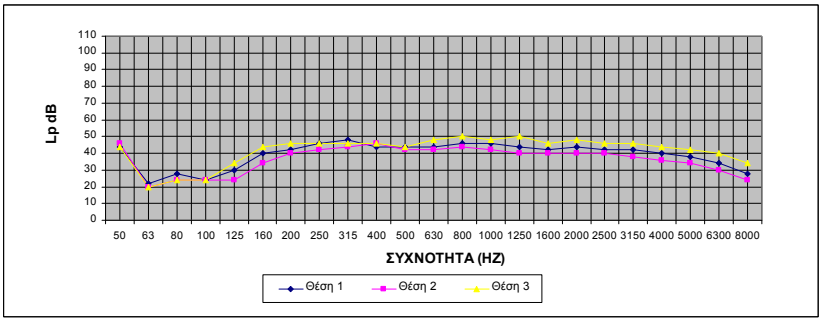
4.3 Διαγράμματα Ηχομετρήσεων

Διάγραμμα 4.3.1 Μετρήσεις στις θέσεις 1, 2 και 3 πριν τις παρεμβάσεις



Θέση 1: σε απόσταση 1,00m από τον εναλλάκτη προς το απέναντι κτίριο.
Θέση 2: σε απόσταση 3,00m από τον εναλλάκτη προς το απέναντι κτίριο.
Θέση 3: σε απόσταση 4,00m από τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα απαγωγής αέρα

Διάγραμμα 4.3.2 Μετρήσεις στις θέσεις 1, 2 και 3 μετά τις παρεμβάσεις



Θέση 1: σε απόσταση 1,00m από τον εναλλάκτη προς το απέναντι κτίριο.
Θέση 2: σε απόσταση 3,00m από τον εναλλάκτη προς το απέναντι κτίριο.
Θέση 3: σε απόσταση 4,00m από τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα απαγωγής αέρα

5. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των ηχομετρήσεων της Θέσης 3, μεταξύ 50 και 250Hz, γίνεται φανερό ότι η ηχομονωτική ικανότητα της ηχοπαγίδας με την χρήση στα διαφράγματα του ηχοαπορροφητικού υλικού από ίνες πολυεστέρα EDILFIBER, εμφανίζεται αυξημένη κατά 3~5dB(A), σε σχέση με ηχοπαγίδα ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών γνωστής εταιρίας κατασκευής και προμήθειας ηχοπαγίδων, της οποίας τα διαφράγματα είναι κατασκευασμένα με ηχοαπορροφητικό υλικό ορυκτών ινών.

Στις συχνότητες από 250Hz και άνω, δυστυχώς λόγω του θορύβου βάθους αλλά και της υψηλής ηχομονωτικής ικανότητας των ηχοπαγίδων σε αυτές τις συχνότητες, δεν ήταν δυνατή η τεκμηρίωση της ηχομονωτικής τους ικανότητας

με βάση τα αποτελέσματα των ηχομετρήσεων. Εκτιμούμε όμως με βάση το συντελεστή ηχοαπορρόφησης των υλικών από ίνες πολυεστέρα, ότι επιτυγχάνεται μια ελαφρά βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τις συμβατικού τύπου ηχοπαγίδες και στις υψηλές συχνότητες.

Πέρα όμως από τη βελτιωμένη ηχομονωτική απόδοσης της κατασκευής, στις σημερινές κρίσιμες συνθήκες από ενεργειακή άποψη για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, πρέπει να σημειώσουμε τη σημαντική μείωση της συνολικής ενσωματωμένης ενέργειας στην κατασκευή με τους παρακάτω τρόπους:

1. Χρήση μικρότερης ποσότητας υλικών αφού τα διαφράγματα δεν χρειάζονται επένδυση διάτρητης λαμαρίνας ή υαλουφάσματος ενώ το τοίχωμα του κλωβού εσωτερικά δε χρειάζεται επένδυση διάτρητης λαμαρίνας.
2. Τα ηχοαπορροφητικά από ίνες πολυεστέρα είναι λείας επιφάνειας υλικά, με αποτέλεσμα η στατική πίεση, λόγω της μειωμένης τυρβώδους ροής, να είναι μικρότερη με αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού συντελεστής απόδοσης n της εγκατάστασης.
3. Μειωμένες εργατοώρες και μείωση ενέργειας μεταφοράς προσωπικού.
4. Μειωμένη ποσότητα υλικών προς μεταφορά και
5. Ηχοαπορροφητικά υλικά μικρής ενσωματωμένης ενέργειας

Σχεδιασμός Θαλάσσιου Ακουστικού Παρατηρητηρίου

Μιχάλης Ταρουδάκης
Καθηγητής
Τμήμα Μαθηματικών,
Πανεπιστήμιο Κρήτης
και
Ινστιτούτο Υπολογιστικών
Μαθηματικών Ι.Τ.Ε
taroud@math.uoc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία περιγράφονται συνοπτικά τα τεχνολογικά δεδομένα που αφορούν ένα θαλάσσιο ακουστικό παρατηρητήριο. Τα τεχνολογικά δεδομένα συνδέονται με την θεωρία των αντίστροφων ακουστικών προβλημάτων τα οποία αναφέρονται επιγραμματικά. Σε ό,τι αφορά στον τύπο των παρατηρητηρίων, η περιγραφή περιορίζεται σε αυτά που σχετίζονται με την θαλάσσια ακουστική τομογραφία, ενώ γίνονται και αναφορές σε παρατηρητήρια που μελετούν και αξιοποιούν τον θόρυβο του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Design of an Ocean Acoustic Observatory

ABSTRACT

The paper deals with the design of an ocean acoustic observatory. The technological facts are linked to the theory of inverse problems in underwater acoustics which are briefly mentioned. The description of acoustical observatories is limited to cases related to ocean acoustic tomography and to ambient noise monitoring.

Εισαγωγή

Ο ήχος χρησιμοποιείται ευρύτατα στα θαλάσσια παρατηρητήρια αφ΄ ενός μεν ως φορέας μετάδοσης δεδομένων (όπως ακριβώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδουν τα δεδομένα στον αέρα) αλλά και ως μέσον ανάκτησης πληροφοριών για τα περιβαλλοντικά δεδομένα μιας θαλάσσιας περιοχής υπό επιτήρηση. Ο λόγος που ο ήχος χρησιμοποιείται τόσο πολύ στην θάλασσα, έχει να κάνει με το γεγονός ότι σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, στο νερό έχει την δυνατότητα μετάδοσης σε πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση. Από την άλλη μεριά βέβαια υφίσταται αλλοιώσεις λόγω του χαρακτήρα της ακουστικής διάδοσης στο νερό, γεγονός που επιβάλλει την συστηματική μελέτη των συνθηκών

διάδοσης και της υφής του ηχητικού πεδίου στη θάλασσα. Ωστόσο η δομή των αλλοιώσεων που υφίσταται το ακουστικό σήμα αποτελεί και την πηγή της πληροφορίας για το μέσον στο οποίο διαδόθηκε και συνεπώς την βασική αιτία για την χρήση του ήχου ως μέσου ανάκτησης περιβαλλοντικών δεδομένων.

1. Αντίστροφα Προβλήματα διάδοσης του ήχου.

Τα αντίστροφα προβλήματα στην υποβρύχια ακουστική έχουν πρόσφατα αποσπάσει την προσοχή των επιστημόνων που εργάζονται στην υποβρύχια τεχνολογία, λόγω της σχετικά υψηλής αποδοτικότητας των ακουστικών κυμάτων ως φορείς πληροφοριών σχετικά με τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές παραμέτρους στο θαλάσσιο περιβάλλον συμπεριλαμβανομένων των ακουστικών χαρακτηριστικών της ακουστικής πηγής απ΄ όπου προέρχονται αλλά και της δομής των αντικειμένων που βρίσκονται στο νερό ή είναι θαμμένα στον βυθό. Επίσης μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τον γεωλογικό χαρακτηρισμό των θαλάσσιων ιζημάτων. Η ανάκτηση των παραμέτρων αυτών με χρήση μετρήσεων του ακουστικού πεδίου είναι ο κύριος στόχος των αντίστροφων προβλημάτων στην υποβρύχια ακουστική. Κατά συνέπεια, τα αντίστροφα προβλήματα βρίσκονται στον πυρήνα των ακουστικών μεθόδων που εφαρμόζονται για τον έλεγχο του θαλάσσιου περιβάλλοντος και διατυπώνονται ανάλογα με την συγκεκριμένη τεχνολογία που υιοθετείται στην θαλάσσια παρατήρηση.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση που προτείνεται από τους Collins και Kuperman [1], τα αντίστροφα προβλήματα στην υποβρύχια ακουστική εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Τηλεπισκόπηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος και
- Εντοπισμός.

Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν τα προβλήματα για την εκτίμηση της δομής της υδάτινης στήλης (ακουστική τομογραφία) αλλά και των βασικών παραμέτρων του πυθμένα της θάλασσας, ενώ στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται προβλήματα αναγνώρισης και εντοπισμού της θέσης μιας ακουστικής πηγής. Και οι δύο κατηγορίες προβλημάτων συναντώνται στις εφαρμογές των ακουστικών παρατηρητηρίων.

Εννοιολογικά, η διατύπωση των αντίστροφων προβλημάτων είναι απλή [2]. Σχεδόν, όλα τα αντίστροφα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε στην υποβρύχια ακουστική είναι διακριτά (η διακριτοποιούνται κατάλληλα) με την έννοια ότι επιζητείται η ανάκτηση ενός διανύσματος στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τιμές παραμέτρων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

$$\mathbf{m} = [m_1, m_2, ..., m_n]^T , \tag{1.1}$$

από ένα σύνολο παρατηρήσεων που και αυτές ποσοτικοποιούνται μέσω ενός διανύσματος δεδομένων :

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, ..., d_N]^T . \tag{1.2}$$

Το διάνυσμα m ανακτάται κάνοντας χρήση μιας μη γραμμικής εν γένει διανυσματικής εξίσωσης της μορφής

$$\mathbf{f(m,d)} = 0 \tag{1.3}$$

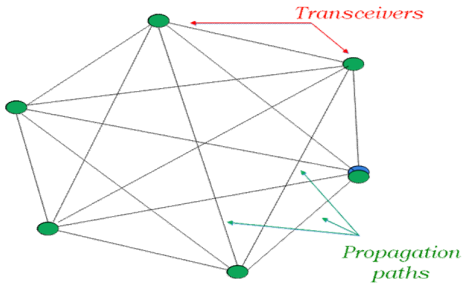
Η εξίσωση καθορίζεται με την κατάλληλη διατύπωση ενός προβλήματος κυματικής διάδοσης, ενώ η διανυσματική συνάρτηση f είναι εν γένει περίπλοκη και μη υποκείμενη σε γραμμικοποίηση. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα είναι μη γραμμικό και πολύ δύσκολο να λυθεί. Επί πλέον δε είναι μη καλώς τεθιμένο (ill-posed) με την έννοια της αδυναμίας απόδειξης ύπαρξης μοναδικής λύσης. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων βελτιστοποίησης που οδηγούν στην πλέον πιθανή λύση του προβλήματος. Δεν θα επεκταθούμε περισσότερο στις λεπτομέρειες των προβλημάτων και των λύσεων τους για τα οποία υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία. Αρκεί να αναφέρομε ότι σε ένα ακουστικό παρατηρητήριο αυτό που έχει σημασία είναι να συλλεγούν τα δεδομένα με τον πλέον πρόσφορο τρόπο, ώστε το αντίστροφο πρόβλημα που διατυπώνεται από την εξίσωση (1.3) να μπορεί να λυθεί αξιόπιστα. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην έννοια της θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας που καθορίζει εν πολλοίς την δομή και την λειτουργία μιας μεγάλης κατηγορίας θαλάσσιων παρατηρητηρίων που βασίζονται στην ενεργητική χρήση του ήχου.

2. Θαλάσσια ακουστική τομογραφία.

Η θαλάσσια τομογραφία εισήχθη από τον Munk και Wunsch το 1979 [3] μετά από την πιστοποίηση κατά την δεκαετία του '70 `ότι περίπου 99% της κινητικής ενέργειας της θαλάσσιας κυκλοφορίας συνδέονται με ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά μεσαίας κλίμακας, τα οποία είναι φαινόμενα που περιλαμβάνονται και μελετώνται σε μήκη μέχρι 100 χιλιομέτρων περίπου. Η παρακολούθηση των αλλαγών μεσαίας αλλά και μεγαλύτερης κλίμακας μπορεί συνεπώς να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την θαλάσσια δυναμική της γήινης σφαίρας και στην μελέτη των κλιματικών αλλαγών Έτσι γεννήθηκε η θαλάσσια ακουστική τομογραφία που είναι στην πραγματικότητα μια μεταφορά στην θάλασσα των διαγνωστικών τεχνικών της ιατρικής τομογραφίας.

Για να υλοποιηθεί η διάγνωση μέσω τομογραφίας θα πρέπει να καθορισθούν φέτες (τομές) στο περιβάλλον διάδοσης, εν προκειμένω στην θάλασσα, σε κάθε μία από τις οποίες διατυπώνεται και επιλύεται ένα αντίστροφο πρόβλημα κυματικής διάδοσης. Η σύζευξη των λύσεων που δίδονται σε κάθε τομή, μας δίνει την «εικόνα» μιας συγκεκριμένης περιοχής σε ό,τι αφορά στα προς ανάκτηση χαρακτηριστικά της.

Στην περίπτωση της θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας, οι κύριες πληροφορίες που ενδιαφέρουν τους επιστήμονες που ασχολούνται με την ακουστική ωκεανογραφία είναι η θερμοκρασία του νερού και η ταχύτητα των ρευμάτων. Άλλες παράμετροι του νερού, μετρώνται με τυπικές ωκεανογραφικές τεχνικές. Ωστόσο η θερμοκρασία και η ταχύτητα των ρευμάτων είναι τα κύρια δεδομένα σε μοντέλα κυκλοφορίας που καθορίζουν την δυναμική μιας θαλάσσιας έκτασης.



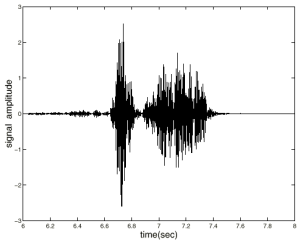
Σχήμα 2.1. Σχηματική διάταξη θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας

Στο Σχήμα 2.1 περιγράφεται μια διάταξη θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας σε οριζόντια όψη. Τα πράσινα οβάλ σημεία αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των στοιχείων εκπομπής/λήψης των ακουστικών σημάτων (transeivers) που μπορεί να είναι πομποί, δέκτες ή συνδυασμός τους, μεμονωμένοι ή σε κατακόρυφη συστοιχία (array). Τα σημεία ανά δύο καθορίζουν και τις κατακόρυφες τομές, στις οποίες ορίζεται ένα διδιάστατο πρόβλημα ακουστικής διάδοσης (ευθύ και αντίστροφο).

Οι ηχητικοί παλμοί που εκπέμπονται είναι χαμηλής έντασης ώστε να μην δημιουργούν προβλήματα στους θαλάσσιους έμβιους πληθυσμούς (κητώδη), ευρυζώνιοι (broadband) και σχετικά χαμηλής συχνότητας. Η ιδιότητα του θαλάσσιου κυματοδηγού να διασπείρει την ακουστική ενέργεια που παράγεται, ώστε αυτή να παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στην λήψη (πρβλ. Σχήμα 2.2 όπου εμφανίζεται ένα τυπικό σήμα ακουστικής τομογραφίας όπως λαμβάνεται στον δέκτη) επιτρέπει την επιλογή πολλών διαφορετικών χαρακτηριστικών ως μετρήσιμα μεγέθη **d** (εξίσωση 1.3) για τα προβλήματα αντιστροφής. Συμπερασματικά, η θαλάσσια ακουστική τομογραφία εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι μετρήσιμες ιδιότητες του ακουστικού πεδίου συσχετίζονται με τις προς ανάκτηση παραμέτρους του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Περισσότερες λεπτομέρειες για την επεξεργασία του σήματος και τις τεχνικές αντιστροφής ξεφεύγουν από τον σκοπό του παρόντος, αλλά μπορούν να ανακτηθούν από την βιβλιογραφία (π.χ. [4-8]).

Ένα σύστημα παρατήρησης που σχετίζεται με τις εφαρμογές θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας περιλαμβάνει αγκυρώσεις (moorings) στις οποίες προσδένονται οι πομποί και οι δέκτες καθώς και πρόσθετες ωκεανογραφικές συσκευές. Στην βέλτιστη περίπτωση ένα θαλάσσιο παρατηρητήριο ακουστικής τομογραφίας, περιλαμβάνει συστοιχίες πομποδεκτών όπως στο Σχήμα 2.3. Ωστόσο είναι δυνατόν να δημιουργηθούν θαλάσσια παρατηρητήρια ακουστικής τομογραφίας στα οποία, κάθε αγκύρωση περιλαμβάνει μία μόνο πηγή και ένα δέκτη. Σε ό,τι αφορά στην μετάδοση των καταγραφών σε σταθμούς της ξηράς, υπάρχουν βασικά δύο δυνατότητες :

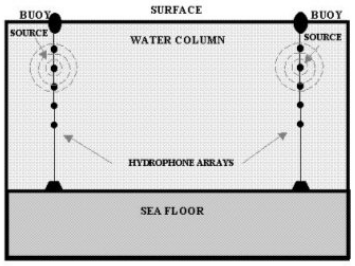
- Καλωδιακή ζεύξη με τον σταθμό της ξηράς.
- Ραδιοζεύξη με μετάδοση των καταγραφών από κεραία που τοποθετείται στον πλωτήρα της αγκύρωσης.



Σχήμα 2.2. Τυπική λήψη σήματος ακουστικής τομογραφίας

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά σήματος που χρησιμοποιούνται στην ακουστική τομογραφία.

Ένα υδρόφωνο	Χρόνος άφιξης ηχητικών ακτίνων [3,7].
	Χρόνος άφιξης ιδιομορφών [6].
	Στατιστικά χαρακτηριστικά σήματος (μετασχηματισμός κυματιδίων) [8].
	Καμπύλες διασποράς ιδιομορφών (μετασχηματισμός Fourier ή wavelet).
Συστοιχία υδροφώνων	Φάση ιδιομορφών [4,5].
	Ακουστικό πεδίο στο πεδίο συχνοτήτων (μετασχηματισμός Fourier) [2].



Σχήμα 2.3. Ένα βέλτιστο παρατηρητήριο ακουστικής τομογραφίας (ένα ζεύγος αγκυρώσεων)

3. Γενικά περί παθητικής ακρόασης

Η παθητική ακουστική παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορεί να δώσει επίσης σημαντικές πληροφορίες για ο θαλάσσιο περιβάλλον με κατάλληλη αξιοποίηση (μετά από επεξεργασία) του μετρούμενου ηχητικού πεδίου. Με την έννοια αυτή, τα τελευταία χρόνια, ο θόρυβος του θαλάσσιου περιβάλλοντος δεν θεωρείται αποκλειστικά ανεπιθύμητος, αλλά αξιοποιείται θετικά προς την

κατεύθυνση που αναφέραμε. Ο θόρυβος του θαλάσσιου περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί ως φυσικός ή ως ανθρωπογενής, ανάλογα με τις αιτίες παραγωγής του.

Ως φυσικές αιτίες παραγωγής θορύβου στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορούμε να θεωρήσουμε:

- τον κυματισμό
- την βροχή
- τους σεισμούς
- τους βιολογικούς θορύβους (από θαλάσσια θηλαστικά)
- το σπάσιμο των πάγων (στις αρκτικές περιοχές).

Ως ανθρωπογενείς αιτίες μπορούμε να θεωρήσουμε:

- την ναυσιπλοΐα,
- την δραστηριότητα σε θαλάσσιες εγκαταστάσεις.

Για να υλοποιηθεί με τον βέλτιστο τρόπο η παθητική ακουστική παρακολούθηση απαιτείται η ύπαρξη συστοιχίας υδροφώνων σε μία αγκύρωση (πλατφόρμα). Τα σήματα που καταγράφονται θα πρέπει να στέλλονται σε σταθμούς της ξηράς είτε μέσω καλωδίου είτε μέσω ραδιοζεύξης, όπως ακριβώς και στα συστήματα ακουστικής τομογραφίας που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Εκείνο που διαφέρει σημαντικά είναι η επεξεργασία των σημάτων καθώς στην περίπτωση της παθητικής ακρόασης, το ακουστικό πεδίο πρέπει να καταγράφεται συνεχώς και να αναλύεται ως προς τα συστατικά του χωρίς να είναι γνωστά τα δεδομένα κάποιας πηγής. Η ανάκτηση των περιβαλλοντικών δεδομένων βασίζεται συνήθως στην συσχέτιση των καταγραφών από τα διαφορετικά υδρόφωνα της συστοιχίας των υδροφώνων, καθώς είναι γνωστό σε μοντέλα ακουστικής διάδοσης ότι οι παράμετροι του περιβάλλοντος διάδοσης καθορίζουν την κατακόρυφη αλλά και την οριζόντια δομή του ηχητικού πεδίου. Έτσι είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί η ανακτώμενη κατευθυντότητα του θορύβου του θαλάσσιου περιβάλλοντος για την ανάκτηση κρίσιμων παραμέτρων της θάλασσας και του πυθμένα.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί η ιδιαίτερη σημασία της παθητικής ακρόασης στην μελέτη της συμπεριφοράς των θαλάσσιων θηλαστικών. Με κατάλληλες μεθόδους είναι δυνατή η ταυτοποίηση των θηλαστικών και η παρακολούθηση των κινήσεών τους που μπορεί να βοηθήσει αποτελεσματικά στην κατανόηση μεταξύ των άλλων και στην επίδραση του ανθρωπογενούς ήχου στην συμπεριφορά τους.

4. Τεχνολογικά δεδομένα

Συμπληρώνουμε την παρουσίαση με ορισμένα ζητήματα που αφορούν στις απαιτήσεις των ακουστικών θαλάσσιων παρατηρητηρίων από πλευράς τεχνολογικής υποστήριξης :

4.1 Βασικές μονάδες

Οι βασικές μονάδες ενός θαλάσσιου ακουστικού παρατηρητηρίου αποτελούνται εννοιολογικά από τα εξής μέρη :

- Εκπομπή, Λήψη και καταγραφή του σήματος
- Μετάδοση του σήματος στο σταθμό επεξεργασίας
- Επεξεργασία του ακουστικού σήματος

- Απεικόνιση της πληροφορίας και σύνδεση με μονάδα λήψης αποφάσεων

4.2 Λήψη και καταγραφή του σήματος

Στην περίπτωση ενεργητικών παρατηρητηρίων, η εκπομπή του σήματος γίνεται από πηγή χαμηλής σχετικά ισχύος και χαμηλής συχνότητας. Στα συνήθη τομογραφικά παρατηρητήρια οι ακουστικές πηγές εκπέμπουν σε συχνότητες μικρότερες από 1 KHz. Τα σήματα έχουν χαρακτηριστική διαμόρφωση (π.χ. τύπου chirp) ενώ το μέγεθος (και το κόστος) της πηγής είναι αντίστροφα ανάλογο με τη συχνότητα, με τις χαμηλότερες συχνότητες να απαιτούν μεγαλύτερες πηγές.

Η λήψη γίνεται σε υδρόφωνα κατάλληλης φασματικής απόκρισης, ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική λήψη στις χρήσιμες συχνότητες. Όταν τα υδρόφωνα αφορούν τομογραφικές εφαρμογές, δεν απαιτείται ευρύ φάσμα απόκρισης, αφού τα επιθυμητά σήματα έχουν χαμηλές συχνότητες. Όταν όμως τα υδρόφωνα αφορούν καταγραφές του θορύβου του θαλάσσιου περιβάλλοντος η φασματική τους απόκριση πρέπει να είναι σχετικά ευρεία ώστε να εξασφαλίζεται η λήψη σημάτων από όλες τις επιθυμητές συχνότητες, που στην περίπτωση των θαλάσσιων θηλαστικών μπορούν να φτάσουν και την υπερακουστική ζώνη (> 20 KHz). Σε κάθε περίπτωση απαιτείται συστηματική μελέτη της εφαρμογής πριν από την επιλογή των καταλλήλων υδροφώνων.

Η καταγραφή του σήματος γίνεται σε μονάδες αποθήκευσης όταν δεν απαιτείται η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο.

4.3 Μετάδοση του σήματος στον σταθμό επεξεργασίας

Στα παρατηρητήρια που λειτουργούν ως σταθμοί παρακολούθησης των μεταβολών σε πραγματικό χρόνο, είναι απαραίτητη η μετάδοση του καταγραφόμενου σήματος σε σταθμό επεξεργασίας που βρίσκεται συνήθως στην ξηρά, μπορεί όμως να βρίσκεται και σε ένα πλωτό μέσο, όταν το παρατηρητήρια χαρακτηρίζεται ως κινητό (mobile). Η μετάδοση γίνεται με καλώδιο (cabled observatories), η τηλεμετρικά με ραδιοζεύξη (autonomous observatories). Το πλεονέκτημα της καλωδιακής ζεύξης είναι η ενεργειακή επάρκεια του σταθμού από μονάδες της ξηράς. Στα αυτόνομα παρατηρητήρια, η ενέργεια πρέπει να εξασφαλίζεται από μονάδες που βρίσκονται στις αγκυρώσεις. Στα αυτόνομα παρατηρητήρια υπάρχει επί πλέον ο κίνδυνος της καταστροφής της μονάδας κεραίας που αναγκαστικά βρίσκεται στον πλωτήρα στην επιφάνεια της θάλασσας. Σε κάθε περίπτωση, μελετάται η κωδικοποίηση και κατάλληλη συμπίεση των προς μετάδοση δεδομένων, ώστε η μετάδοση να είναι η πλέον αποδοτική.

4.4 Επεξεργασία σήματος

Το σήμα που λαμβάνεται στον σταθμό υποστήριξης αφού αποκωδικοποιηθεί, υφίσταται την κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να ανακτηθούν οι παράμετροι παρατήρησης (observables **d**) που στη συνέχεια θα τροφοδοτήσουν τα μοντέλα αντιστροφής όπως αυτά έχουν περιγραφεί με αδρούς τρόπους στην αρχή της παρουσίασης, ώστε να προκύψουν οι προς ανάκτηση παράμετροι **m**. Τόσο η

επεξεργασία του σήματος όσο και τα μοντέλα αντιστροφής, προσαρμόζονται στις πραγματικές εφαρμογές που έχουν σχεδιασθεί για ένα συγκεκριμένο παρατηρητήριο και αποτελούν ανυπόστατο συστατικό της δομής του. Στη συνέχεια οι ανακτηθείσες παράμετροι τροφοδοτούν τα κατάλληλα ωκεανογραφικά μοντέλα που δίδουν πρόσθετα αποτελέσματα σε ό,τι αφορά στη δυναμική του θαλάσσιου περιβάλλοντος (data assimilation).

4.5 Απεικόνιση της πληροφορίας

Η ανακτηθείσα πληροφορία τόσο μετά την αντιστροφή του ακουστικού πεδίου όσο και μετά την αξιοποίηση του από τα μοντέλα κυκλοφορίας, θα πρέπει να απεικονισθεί με κατάλληλο τρόπο ώστε να δοθεί η δυνατότητα στις αρχές αλλά και εν γένει στους τελικούς χρήστες ενός θαλάσσιου παρατηρητηρίου να αξιοποιήσουν τα αποτελέσματα τόσο σε άμεσο χρόνο (περίπτωση π.χ. ρύπανσης μιας περιοχής) ή σε μελλοντικό χρόνο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Geographical Information Systems) τα οποία μπορούν να απεικονίσουν τα τελικά δεδομένα σε γεωγραφικούς χάρτες, ενσωματώνοντας στατικές και δυναμικές πληροφορίες με τρόπο άμεσα αξιοποιήσιμο από μη έμπειρους τελικούς χρήστες.

5. Ευχαριστίες

Η εργασία υποστηρίχτηκε από τα προγράμματα EMSO-HELLAS της Γ.Γ.Ε.Τ και ACMAC του Πανεπιστημίου Κρήτης.

6. Αναφορές

[1] M.D. Collins and W.A. Kuperman "Inverse problems in ocean acoustics" Inverse Problems 10, pp 1023-1040, (1994).

[2] M.I. Taroudakis "Inverse problems in underwater acoustics" in Proceedings of the 2nd EAA International Symposium on Hydroacoustics**,** edited by A Stepnowski et al. pp 281-290 (1999).

[3] W. Munk, P. Worcester and C. Wunsch *Ocean Acoustic Tomography,* Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

[4] E.C. Shang, "Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory" J.Acoust.Soc.Am. 85, pp 1531-1537 (1989).

[5] M.I. Taroudakis and J.S. Papadakis "Modal inversion schemes for ocean acoustic tomography" J. Comput. Acoust., 1, pp 395-421 (1993).

[6] M.I. Taroudakis "A comparison of modal-phase and modal-travel time approaches for ocean acoustic tomography" in *Proceedings of the 2nd European Conference on Underwater Acoustics*, edited by Leif Bjorno, pp 1057-1062 (1994).

[7] E.K. Skarsoulis, G.A. Athanassoulis and U.Send. "Ocean acoustic tomography based on peak arrivals" J.Acoust.Soc.Am. 100, pp 797-813 (1996).

[8] M.I. Taroudakis and C. Smaragdakis: "On the use of Genetic Algorithms and a statistical characterization of the acoustic signal for tomographic and bottom geoacoustic inversions" Acta Acustica united with Acustica Vol. 95, No 5, pp 814-822 (2009).

Τρισδιάστατη απεικόνιση ολικού πεδίου νανο-ακουστικών κυμάτων σε μεταλλικές και διηλεκτρικές επιφάνειες με τη χρήση παλμικών πηγών laser

Ι. Ορφανός[a,1,4], Β. Δημητρίου[b,2,5], Ε. Κασελούρης[c,1,5], Σ. Μπρέζας[d,1,5], Ε. Μπακαρέζος[e,1,5], Μ. Ταταράκης[f,3,5], Ν. Βάινος[g,4], Ν.Α. Παπαδογιάννης[h,1,5]

1. Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100 Ρέθυμνο
2. Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρωμανού 3, Χαλέπα, 73133 Χανιά
3. Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρωμανού 3, Χαλέπα, 73133 Χανιά
4. Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504 Ρίο, Πάτρα
5. Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Laser, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και το υπολογιστικό μοντέλο επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (ΕΑΚ) τα οποία παράγονται από πηγή παλμικού λέιζερ σε λεπτό μεταλλικό φιλμ τοποθετημένο σε υπόστρωμα fused silica. Το θεωρητικό μοντέλο είναι βασισμένο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM). Για την πειραματική μελέτη των ΕΑΚ αναπτύχτηκε διάταξη δυναμικής συμβολομετρίας με χρήση παλμικού λέιζερ. Η τεχνική αυτή δίνει τη δυνατότητα άμεσης (χρονικά και χωρικά) παρακολούθησης του πεδίου, που λαμβάνει χώρα η δημιουργία και η εξάπλωση των ΕΑΚ. Με την μέθοδο αυτή μελετώνται πειραματικά τα χαρακτηριστικά των ΕΑΚ και εξάγονται βασικές φυσικές ποσότητες, τα μεγέθη των οποίων είναι σε συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο. Περαιτέρω, η χρήση του μοντέλου παρέχει τη δυνατότητα μελέτης των ΕΑΚ σε διάφορες χρονικές στιγμές.

3D whole field representation of nano-acoustic waves in metallic and dielectric films using pulsed laser sources

ABSTRACT

In this paper, the surface acoustic waves (SAWs) generated by pulsed laser source in a thin metal film sputtered on a fussed silica substrate are studied. For the experimental study of the SAWs a dynamic interferometry setup is developed using

[a] yorphanos@staff.teicrete.gr
[b] dimvasi@chania.teicrete.gr
[c] v.kaselouris@chania.teicrete.gr
[d] brezas@staff.teicrete.gr
[e] bakarezos@staff.teicrete.gr
[f] m.tatarakis@chania.teicrete.gr
[g] vainos@upatras.gr
[h] npapadogiannis@staff.teicrete.gr

pulsed laser source. This technique allows direct (temporally and spatially) whole field monitoring where the generation and propagation of SAWs takes place. In parallel a computational model is developed based on the finite element method (FEM). By the help of the proposed method, the experimental results are studied and the characteristics of the basic physical quantities of SAWs are exported. The experimental results are in a good agreement with the theoretical ones extracted from the FEM model, giving the advantage of studying SAWs in various time scales.

Εισαγωγή

Οι οπτικές τεχνικές για τη γένεση, τη διάδοση και την αλληλεπίδραση των ελαστικών κυμάτων με στερεά υλικά είναι καλά ορισμένες και έχουν χρησιμοποιηθεί σε μη-καταστρεπτικούς ελέγχους χαρακτηρισμού των υλικών [1-4]. Όταν ένα στερεό υλικό ακτινοβοληθεί από παλμικό λέιζερ, η απορρόφηση της ακτινοβολίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά και κατά συνέπεια τη θερμική του διαστολή, οδηγώντας στην παραγωγή υπερήχων στο στερεό. Η δημιουργία της ταχύτατης και εντοπισμένης θερμικής διαστολής, αποδεσμεύει ενέργεια με την μορφή του διαδιδόμενου υπέρηχου σε όλες τις κατευθύνσεις ακτινικά του σημείου δημιουργίας [2, 4].

Τα παραγόμενα από λέιζερ ΕΑΚ σε συστήματα φιλμ-υποστρώματος, προσελκύουν το ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας μη-καταστρεπτικού προσδιορισμού των παραμέτρων του φιλμ, του υποστρώματος και των μεταξύ τους δεσμών. Η διάδοση των ΕΑΚ εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του φιλμ, όσο κι από αυτές του υποστρώματος, αναδεικνύοντας τα ΕΑΚ ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των μηχανικών και ελαστικών ιδιοτήτων τους.

Τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων από λέιζερ υπερήχων εξαρτώνται έντονα από τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, από τη θερμική ικανότητα διάχυσης, την οπτική διείσδυση, την δομή και σύσταση του υλικού αλλά και παραμέτρους της πηγής λέιζερ όπως η ενέργεια, η διάμετρος της εστίας και η διάρκεια του παλμού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται διάταξη δυναμικής ολογραφίας και πραγματοποιείται τρισδιάστατη απεικόνιση ολικού πεδίου. Με τον τρόπο αυτό μελετάται και αναλύεται η γέννηση και διάδοση των ΕΑΚ σε μεταλλικό φιλμ με υπόστρωμα fused silica.

Στην βιβλιογραφία, μεταξύ των θεωρητικών μελετών [5-8], η μελέτη παραγόμενων θερμοελαστικών υπερήχων, συνίσταται στην ανεύρεση αναλυτικών λύσεων και εξετάζονται ειδικές περιπτώσεις που μπορούν να έχουν αναλυτικές λύσεις. Στην παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιούνται αριθμητικές προσεγγιστικές μέθοδοι και συγκεκριμένα η προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Το μοντέλο FEM που αναπτύσσεται και προτείνεται είναι κατάλληλο για «μεγάλα» πολυπαραμετρικά προβλήματα καθώς προσομοιώνει θερμοελαστικά φαινόμενα και αποδίδει τις πληροφορίες για θερμοκρασιακές και ελαστομηχανικές μεταβολές κατά την αλληλεπίδραση λέιζερ-μετάλλου, αλλά και τις χρονο-εξαρτώμενες μετατοπίσεις [9, 10].

Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων δείχνει καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης παρέχοντας τη δυνατότητα περαιτέρω μελέτης των ΕΑΚ σε διάφορες χρονικές στιγμές καθώς και τη δυνατότητα προβλέψεων από το μοντέλο.

1. Περιγραφή του προβλήματος

Όταν ένα στερεό δείγμα ακτινοβολείται από ένα βραχύ παλμό λέιζερ, με ενέργεια μικρότερη από το όριο τήξης του στερεού, ένα ορισμένο ποσό της ενέργειας του φωτός ανακλάται και το εναπομείναν διεισδύει στο δείγμα. Η απορρόφηση της ενέργειας του λέιζερ οδηγεί σε ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας στον ακτινοβολημένο όγκο που με τη σειρά της προκαλεί ταχεία τοπική θερμική διαστολή.

Για διάρκεια παλμού λέιζερ της τάξης των μερικών ns, το νέφος ηλεκτρονίων είναι πάντα σε θερμική ισορροπία με το πλέγμα και η κοινή τους θερμοκρασία T, ακολουθεί την κλασσική εξίσωση θερμική αγωγής:

$$\dot{T} = \left(\frac{\kappa}{\rho c}\right)\nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} - \frac{T_0 \varepsilon}{\rho c}\nabla \dot{u} \tag{1}$$

όπου T η συνάρτηση μεταβατικής θερμοκρασίας, $\dot{T}$ η θερμοκρασιακή μεταβολή και T_0 η θερμοκρασία αναφοράς. k, ρ, c οι σταθερές για την θερμική αγωγιμότητα, την πυκνότητα και την ειδική θερμότητα αντίστοιχα, ενώ ε η θερμική ακουστική σταθερά σύζευξης. Q η πηγή θερμότητας που ορίζεται ως η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου ανά δευτερόλεπτο. Ο τελευταίος όρος στην εξίσωση περιγράφει την θερμότητα που παράγεται από μηχανικές ταλαντώσεις στο υλικό και u το διάνυσμα μετατόπισης. Η τιμή αυτού είναι αμελητέα σε σύγκριση με την θερμότητα που απορροφάται από την ενέργεια του λέιζερ, έτσι αυτός ο όρος μπορεί να αγνοηθεί, καταλήγοντας στην απλουστευμένη μορφή:

$$\dot{T} = \left(\frac{\kappa}{\rho c}\right)\nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} \tag{2}$$

Η εντοπισμένη θερμική διαστολή δημιουργεί κρουστικό πεδίο πίεσης γεννώντας υπερηχητικά κύματα που διαδίδονται στο υλικό. Για ένα στερεό, η ελαστική διάδοση του κύματος που προκύπτει από την θερμική διαστολή, λόγω της αύξησης του πεδίου της θερμοκρασίας εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\rho \ddot{u} = \mu \nabla^2 u + (\lambda + u)\nabla\left(\nabla u\right) - \varepsilon \nabla T \tag{3}$$

λ, μ είναι οι σταθερές Lamé.

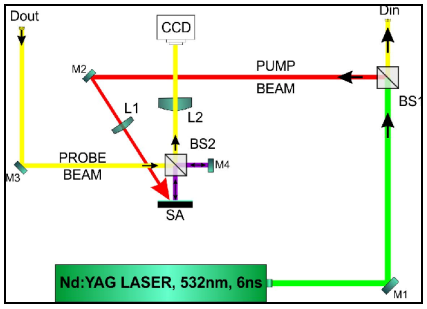
2. Πειραματική τεχνική

Για την πειραματική μελέτη των ΕΑΚ, χρησιμοποιείται παλμική πηγή λέιζερ που ακτινοβολεί σε φιλμ Al πάχους 200nm, αποτιθέμενο σε υπόστρωμα 1mm fused silica. Η τεχνική δυναμικής συμβολομετρίας απεικόνισης πεδίου που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2.1*.

Οι παλμοί που χρησιμοποιούνται για την γένεση των ΕΑΚ - pump pulses παράγονται από πηγή λέιζερ Q-switched Nd:YAG διπλασιασμένης συχνότητας λ=532nm, με διάρκεια παλμού 6ns (FWHM) και τυπική ενέργεια ~50μJ ανά παλμό. Η τεχνική περιλαμβάνει συμβολόμετρο Michelson για την τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος (παλμοί ανίχνευσης), το οποίο χρησιμοποιεί τους ίδιους παλμούς με την διέγερση και εισάγεται με μεταβλητή οπτική καθυστέρηση Δt, μεταξύ των παλμών διέγερσης και ανίχνευσης.

Το φως του παλμού ανίχνευσης που ανακλάται από την επιφάνεια του δείγματος συλλέγεται με τη βοήθεια φακών και κατευθύνεται για να καταγραφεί από κάμερα CCD (αισθητήρας 2452×2054 τετραγωνικά pixels ακμής 3.45μm). Συμβολογράμματα καταγράφονται πριν και μετά τους παλμούς διέγερσης όπως

επίσης και για διαφορετικές οπτικές καθυστερήσεις κατά την διάδοση των ΕΑΚ, απεικονίζοντας την συμπεριφορά της επιφάνειας του δείγματος.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για την γέννηση και την καταγραφή των ΕΑΚ: M-Καθρέπτες, BS-Διαχωριστές Δέσμης, L-φακοί, SA-Δείγμα, Din-Είσοδος της μεταβλητής οπτικής καθυστέρησης, Dout-Έξοδος της μεταβλητής οπτικής καθυστέρησης, CCD-Κάμερα.

Για την εξαγωγή της πληροφορίας του εύρους των ΕΑΚ, εφαρμόζεται δισδιάστατος χωρικός μετασχηματισμός Fourier - 2D FFT στα συμβολογράμματα, από τον οποίο προκύπτουν τρεις διακριτές κορυφές στην κεντρική συχνότητα - DC και στις $\pm f_0$, με f_0 τη φέρουσα συχνότητα των κροσσών συμβολής. Οι κορυφές DC και $-f_0$ αποκόπτονται με την βοήθεια φίλτρου και μετέπειτα εφαρμόζεται αντίστροφος μετασχηματισμός 2D FFT. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει εικόνα που περιέχει την πληροφορία της φάσης, φ(x,y), του κάθε εικονοστοιχείου σε αναδιπλωμένη μορφή και εύρος -π έως +π. Η φάση ξεδιπλώνεται και μετατρέπεται σε συνάρτηση κάθετων στην επιφάνεια μετατοπίσεων d(x,y), με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$d = \frac{\varphi\lambda}{4\pi} \tag{4}$$

όπου λ το μήκος κύματος της πηγής λέιζερ.

Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή, εξετάζεται χωρική περιοχή 800μm×600μm της επιφάνειας του δείγματος. Η τεχνική επιτρέπει χωρική διακριτική ικανοτητα της τάξης μm πάνω στην επιφάνεια και μερικών μόνο nm σε διεύθυνση κάθετη προς αυτήν.

3. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

3.1. Μαθηματική μοντελοποίηση

Η κλασσική εξίσωση της θερμικής αγωγιμότητας για πεπερασμένα στοιχεία με το πίνακα θερμοχωρητικότητας [C] και το πίνακα αγωγιμότητας [K] μπορεί να εκφραστεί μέσω διανυσμάτων βασιζόμενη στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων:

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{Q\} \tag{5}$$

{Q} είναι το διάνυσμα πηγής θερμότητας, {T} είναι το διάνυσμα θερμοκρασίας, {Ṫ} είναι το διάνυσμα ρυθμού μεταβολής θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση διάδοσης του κύματος, αγνοώντας την απόσβεση, η κυρίαρχη εξίσωση πεπερασμένων στοιχείων είναι:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [S]\{U\} = \{F\} \tag{6}$$

[M] είναι ο πίνακας μάζας, [S] ο πίνακας δυσκαμψίας, {U} το διάνυσμα μετατόπισης, {Ü} το διάνυσμα επιτάχυνσης, {F} το διάνυσμα δύναμης.

Για τη θερμοελαστικότητα, το διάνυσμα εξωτερικής δύναμης για ένα στοιχείο είναι:

$$\{F\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} \, dV \tag{7}$$

{ε0} είναι το διάνυσμα θερμικής παραμόρφωσης, $[B]^T$ ο μεταθετικός πίνακας του παράγωγου των συναρτήσεων μορφής, [D] ο πίνακας υλικού.

Η πηγή παραγωγής laser Q-switched Nd:YAG, που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις ήταν παλμική, διπλασιαζόμενης συχνότητας λ = 532nm, με χρονική και χωρική κατανομή που περιγράφεται από τις συναρτήσεις F(t) and S(r), αντίστοιχα:

$$F(t) = e^{-2.77\left(t/t_0\right)^2}, \quad S(r) = e^{-\left(r/r_0\right)^2} \tag{8}$$

t_0 η Full Width Half Maximum (FWHM) διάρκεια παλμού του laser, r_0 η ακτίνα της δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος. Η πηγή θερμότητας Q εκφράζεται ως:

$$Q(r,z,t) = I_0(1-R)F(t)S(r)ae^{-az} \tag{9}$$

I_0 η ενέργεια του laser (ενέργεια παλμού ανά μονάδα επιφάνειας ανά δευτερόλεπτο), R η οπτική ανακλαστικότητα του δείγματος, α ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης.

3.2. Παράμετροι προσομοίωσης

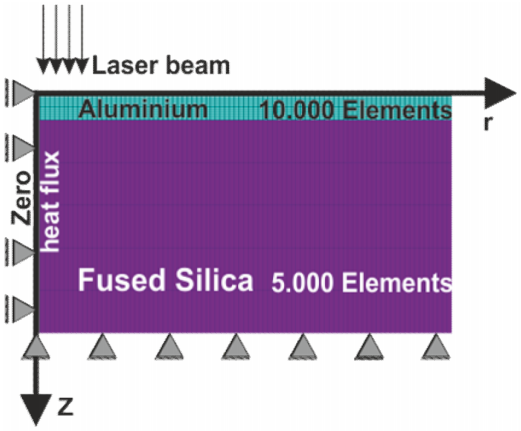
Για τις προσομοιώσεις θεωρείται μεταλλικό φιλμ πάχους 0.2μm Al σε υπόστρωμα fused silica πάχους 1mm. Οι ιδιότητες των υλικών παρατίθενται στον Πίνακα 1. Η ενέργεια του laser είναι 50μJ με διάρκεια παλμού t_0 6ns και η ακτίνα r_0 της δέσμης 12.5μm, όπως και στις πειραματικές μετρήσεις.

Πίνακας 1: Ιδιότητες υλικών

	Αλουμίνιο	Fused Silica
Πυκνότητα (g/μm^3)	$2700\text{x}10^{-15}$	$2200\ \text{x}10^{-15}$
Ειδική θερμότητα (fJ/g ^{0}C)	$897\text{x}10^{12}$	$740\text{x}10^{12}$
Θερμική αγωγιμότητα (fW/μm ^{0}C)	$318\text{x}10^{9}$	$1.38\text{x}10^{9}$
Συντελεστής θερμικής διαστολής (1/^{0}C)	$23\text{x}10^{-6}$	$5.5\text{x}10^{-7}$
Μέτρο ελαστικότητας Young (kPa)	$70\text{x}10^{6}$	$73\text{x}10^{6}$
Λόγος Poisson	0.35	0.17

Δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται όπως παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.1*. Η προσομοίωση εκτελέστηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση συζευγμένων πεδίων - Coupled-Field Analysis, με οκτακομβικά 2D πεπερασμένα στοιχεία, συζευγμένου θερμο-ελαστικού πεδίου και μεταβατικό-δυναμικό transient τύπο ανάλυσης. Συνάρτηση παραγωγής θερμότητας, που δίδεται

στην Εξίσωση (10), εφαρμόστηκε στο άνω τμήμα του φιλμ και αρχική θερμοκρασία θεωρήθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η επίδραση της διάδοσης θερμότητας και της θερμικής ακτινοβολίας αγνοήθηκαν λόγω της διάρκειας του εξαιρετικά μικρού παλμού. Για τη βέλτιστη προσέγγιση των παραγόμενων υπερήχων (υψίσυχνα κύματα) στο λεπτό φιλμ, στην πολύ μικρή σε σχέση με το δείγμα θερμικά επηρεαζόμενη περιοχή, κατασκευάστηκε πυκνό και λεπτό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (fine mesh). Παράλληλα επιλέχθηκε επαρκές χρονικό βήμα για την ομαλότερη επιβολή της φόρτισης. Η διάρκεια επίλυσης των 80ns υλοποιήθηκε σε 100 επιμέρους χρονικά βήματα.



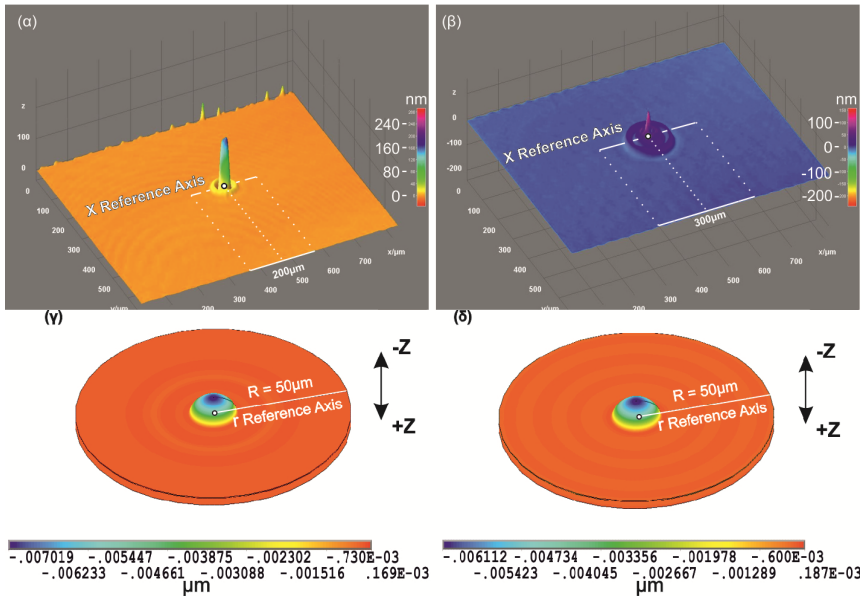
Σχήμα 3.1: Περιγραφή μοντέλου FEM

4. Αποτελέσματα

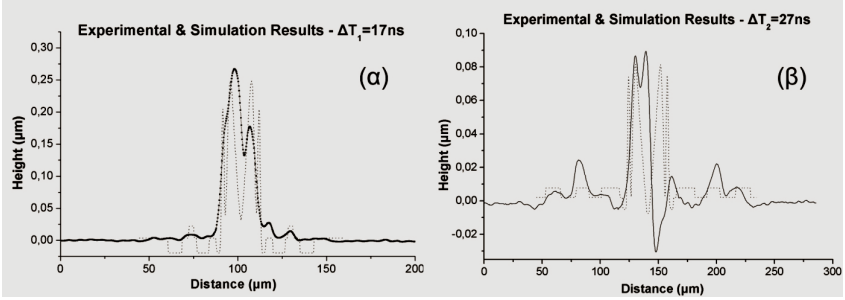
Στο *Σχήμα 4.1* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τεχνικής δυναμικής συμβολομετρίας σε δυο διαφορετικές χρονικές υστερήσεις Δt_1=17ns (α) και Δt_2=27ns (β) και της προσομοίωσης στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, (γ) και (δ).

Από τα αποτελέσματα της συμβολομετρικής απεικόνισης μετά την διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 2, εξάγονται οι τιμές των μετατοπίσεων της επιφάνειας στον κάθετο προς αυτή άξονα κατά την διεύθυνση του άξονα αναφοράς X και δημιουργούνται οι γραφικές παραστάσεις μετατοπίσεων. Οι κόμβοι του μοντέλου FEM που βρίσκονται στην επιφάνεια του φιλμ κατά την διεύθυνση του άξονα αναφοράς r συλλέχθηκαν και καταγράφηκε η μετατόπισή τους στις ίδιες χρονικές υστερήσεις. Στο *Σχήμα 4.2* παρατίθενται οι πειραματικές σε υπέρθεση με τις θεωρητικές μετατοπίσεις στις ίδιες χρονικές στιγμές και στην ίδια διεύθυνση.

Η υπέρθεση των αποτελεσμάτων δείχνει την καλή συμφωνία ανάμεσα στην πειραματική και τη θεωρητική μέθοδο. Σύμφωνα με το *Σχήμα 4.2* (α), τη χρονική στιγμή Δt_1=17ns, υπέρηχος εμφανίζεται σε απόσταση 37μm περίπου από την θέση γένεσης, με επιφανειακή ταχύτητα περίπου 2176m/sec. Στο *Σχήμα 4.2* (β), τη χρονική στιγμή Δt2=27ns, υπέρηχος εμφανίζεται σε απόσταση 73 μm περίπου από την θέση γένεσης, με επιφανειακή ταχύτητα περίπου 2700m/sec.



Σχήμα 4.1 Αντιπαράθεση πειραματικών (α,β) και θεωρητικών (γ,δ) αποτελεσμάτων σε δυο διαφορετικές χρονικές υστερήσεις Δt_1=17ns (α,γ) και Δt_2=27ns (β,δ).



Σχήμα 4.2 Υπέρθεση πειραματικών (συνεχής καμπύλη) και θεωρητικών (διακεκομμένη καμπύλη) των αποτελεσμάτων για (α) Δt_1=17ns και (β) Δt_2=27ns.

5. Συμπεράσματα

Αναπτύχθηκε μέθοδος για τη μελέτη των δημιουργούμενων από λέιζερ ΕΑΚ σε μεταλλικά φιλμ, αποτελούμενη από τεχνική δυναμικής συμβολομετρικής απεικόνισης και θεωρητικό μοντέλο FEM. Με τη βοήθεια αυτής επιτυγχάνεται η μη-καταστρεπτική αξιολόγηση υλικών καθώς ο προσδιορισμός των βασικών φυσικών ποσοτήτων που τα χαρακτηρίζουν είναι κρίσιμης σημασίας για τις νανο-ηλεκτρονικές και νανο-φωτονικές συσκευές. Η προτεινόμενη μέθοδος αποτελεί μη καταστρεπτικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό λεπτών μεταλλικών φιλμ και συγκεκριμένα για τα θερμοελαστικά και οπτικά τους χαρακτηριστικά. Έτσι επιτυγχάνεται η άμεση και δυναμική αξιολόγηση των προαναφερθέντων παραμέτρων στο συνολικό πεδίο, σε αντίθεση με υπάρχουσες μεθόδους που

βασίζονται σε σημειακή ταχυμετρία και συμβολομετρία Doppler, αποφεύγοντας την εκτεταμένη, χρονοβόρα και με περιορισμούς επαναληψιμότητας, σάρωση της επιφάνειας του δείγματος.

Ευχαριστίες

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση", Πράξη Αρχιμήδης ΙΙΙ και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους (Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς 2007-2013).

Η παρούσα έρευνα του κ. Ιωάννη Ορφανού έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



6. Αναφορές

[1] Blackshire, J.L. and Sathish, S., «Near-field ultrasonic scattering from surface-breaking cracks» Applied Physics Letters **80**, pp 3442-3444 (2002)

[2] Dewhurst, R.J., Edwards, C., Mckie, A.D.W. and Palmer, S.B., «Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser-generated ultrasound» Applied Physics Letters **51**, pp 1066–1068 (1987)

[3] Green, R.E., «Non-contact ultrasonic techniques» Ultrasonics **42**, pp 9-16 (2004)

[4] Scruby, C.E. and Drain, L.E. *Laser ultrasonics techniques and application* New York: Adam Hilger (1990)

[5] Kolomenskii, A.A., R.J., Szabadi, M. and Hess, P., «Laser diagnostics of C60 and C70 film by broadband surface acoustic wave spectroscopy» Applied Physics Letters **80**, pp 3442–3444 (2002)

[6] Dubois, M., Enguehard, F., Bertrand, L., Choquet, M. and Monchalin, J.P., «Modeling of laser thermoelastic generation in an orthotropic medium» Applied Physics Letters **64**, pp 554-556 (1994)

[7] Coulette, R., Lafond, E., Nadal M.H., Gondard, C., Lepoutre, F. and Petillon, O., «Laser-generated ultrasound applied to two-layered materials characterization: semi-analytical model and experimental validation» Ultrasonics **36**, pp 239–243 (1998)

[8] Murray, T.W., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J.D., «Laser generation of ultrasound in films and coatings» Applied Physics Letters **74**, pp 3561–3563 (1999)

[9] Xu, B.Q., Shen, Z.H., Lu, J., Ni, X.W. and Zhang, S.Y., «Numerical simulation of laser induced transient temperature field in film-substrate system by finite element method» Int. J. of Heat and Mass Transfer **46**, pp 4963–4968 (2003)

[10] Xu, B.Q., Shen, Z.H., Ni, X.W.,Wang, J., Guan, J. and Lu, J., «Thermal and mechanical finite element modeling of laser-generated ultrasound in coating–substrate system» Optics and Laser Technology **38**, pp 138–145 (2006)

Μελέτη του συχνοτικού εύρους απορρόφησης σε συστοιχία συντονιστών

Σπύρος Πολυχρονόπουλος
Υπ. Διδάκτωρ /
Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανολόγων &
Αεροναυπηγών
spyweirdos@upatras.gr

Δημήτρης Σκαρλάτος
Αν. Καθηγητής /
Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Μηχανολόγων &
Αεροναυπηγών
skarlat@mech.upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος,
Καθηγητής /
Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών &
Υπολογιστών
mourjop@wcl.ee.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συντονιστές Helmholtz λειτουργούν ως απορροφητές κι ανάλογα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά απορροφούν την ακουστική ενέργεια γύρω από μια κεντρική συχνότητα, τη συχνότητα συντονισμού τους (f_0). Κύριο χαρακτηριστικό των συντονιστών είναι ότι το συχνοτικό εύρος (bandwidth) αυτής της απορρόφησης είναι αρκετά στενό. Για να μελετηθεί το φαινόμενο αλλά και να διερευνηθούν πιθανοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να μεταβληθεί η περιοχή απορρόφησης, εξομοιώθηκε, σε περιβάλλον matlab, συστοιχία συντονιστών Helmholtz. Τα αποτελέσματα προσανατόλισαν την εντατικότερη μελέτη μιας συστοιχίας με δύο τύπους συντονιστών διαφορετικής γεωμετρίας. Οι δύο αυτοί διαφορετικοί τύποι συντονιστών εξασφαλίζουν δύο διαφορετικές συχνότητες συντονισμού της. Εάν τώρα οι εν λόγω συχνότητες βρίσκονται σχετικά κοντά τότε η συστοιχία λειτουργεί ως απορροφητής με μεγαλύτερο εύρος απορρόφησης και με κεντρική συχνότητα απορρόφησης μια τρίτη συχνότητα ανάμεσα από τις δύο προηγούμενες.

The bandwidth attenuation on series of resonators

ABSTRACT

Helmholtz resonators function as absorbers, and specifically, depending on their geometric characteristics, absorb the acoustic energy around the central frequency, that is the resonation frequency (f_0). The basic characteristic of the resonators is that the bandwidth of this absorption is quite narrow. In order the phenomenon to be studied but, simultaneously, to investigate possible ways through which the absorption area can change, a matlab simulation on a panel of Helmholtz resonators was utilized. The results oriented the intensive study of the panel of two, different geometrically, types of resonators. These two different types of resonators ensure two different resonant frequencies. Providing that these frequencies are quite close, the panel functions as absorber with a wider absorption bandwidth and, respectively, with a third frequency between the other two, being the central absorption frequency.

Εισαγωγή

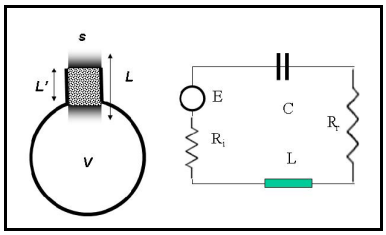
Ο ακουστικός έλεγχος, σε κλειστούς χώρους, με τη χρήση συντονιστών έχει δυο βασικά πλεονεκτήματα. Αρχικά είναι ο βέλτιστος τρόπος για απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων χωρίς να επηρεάζονται οι υψηλότερες κι επίσης έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν την κεντρική συχνότητα απορρόφησης ανάλογα με τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαμορφώνεται και το ζωνικό εύρος της ηχομείωσης (bandwidth). Όμως για να έχει ένας συντονιστής μεγάλο συχνοτικό εύρος απορρόφησης πρέπει να έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά που συχνά καθιστούν δύσκολη την κατασκευή του.

Στην παρούσα εργασία, για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, έχει γίνει μελέτη μιας συστοιχίας δύο διαφορετικού τύπου συντονιστών που όμως έχουν παραπλήσιες συχνότητες συντονισμού. Έχει λοιπόν εξομοιωθεί ένα τέτοιο πάνελ, με τη μέθοδο signal processing σε περιβάλλον matlab [1], κι έχει μελετηθεί τρόπος ώστε το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης να είναι σχετικά μεγάλο.

1. Γενικά χαρακτηριστικά απλού συντονιστή Helmholtz

1.1. Ηλεκτρικό ισοδύναμο

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συντονιστή Helmholtz είναι η απορρόφηση και η επανεκπομπή του ήχου στη συχνότητα συντονισμού του. Η λειτουργία ενός συντονιστή μπορεί να παρασταθεί με το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα RLC. Από το σχήμα φαίνεται η απορρόφηση, η οποία περιγράφεται από την εσωτερική αντίσταση Ri, και η εκπομπή του από την αντίσταση ακτινοβολίας Rr (σχήμα 1.1.1.).



Σχήμα 1.1.1: Ισοδύναμο κύκλωμα του συντονιστή Helmholtz

Η εσωτερική αντίσταση περιγράφει την ηχητική ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα. Για τα ρευστά, οι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας περιλαμβάνουν την θερμική αγωγή, την απώλεια λόγω ιξώδους και τη μοριακή ισοκατανομή της ενέργειας. Οι πρώτες θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Όταν οι συντονιστές βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους αλληλεπιδρούν. Γενικά η εσωτερική αντίσταση για απλό συντονιστή σε επιφάνεια απείρων διαστάσεων και συντονιστές σε δισδιάστατη διάταξη δίνεται από τις σχέσεις [2,3]:

$$R_i = \frac{2\pi\rho c}{\lambda^2} \quad , \quad R_i = \frac{\rho c}{\sigma} \tag{1.1.1.}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, c η ταχύτητα του ήχου, λ το μήκος κύματος της απορροφόμενης συχνότητας, σ η επιφάνεια του τοίχου ανά συντονιστή. Η αντίσταση ακτινοβολίας για συντονιστή με κυλινδρικό λαιμό είναι:

$$R_r = \frac{l}{rs}\sqrt{2\rho\eta\omega} \tag{1.1.2.}$$

1.2. Βασικές λειτουργίες και εξισώσεις

Κύριο χαρακτηριστικό της απορρόφησης είναι η μεγάλη αλλά στενή ζώνη συχνοτήτων απορρόφησης στη συχνότητα συντονισμού του. Η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωμετρία του. Ένας απλός τύπος που με σχετικά καλή ακρίβεια περιγράφει την συχνότητα συντονισμού είναι [4]:

$$f_0 = \frac{c}{2}\sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (1.2.3.)$$

όπου S (m^2) η επιφάνεια του στομίου, L' (m) το μήκος του λαιμού και L (m) το μήκος με τη διόρθωση των άκρων L=L'+1.7a, a (m) η ακτίνα της επιφάνειας του στομίου και V (m^3)ο όγκος του συντονιστή.

Για δισδιάστατη κατανομή συντονιστών ο παραπάνω τύπος μπορεί να γραφεί:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{\Phi}{d(l+\delta)}} \quad (1.2.4.)$$

όπου Φ=S/A είναι η διάτρηση της επιφάνειας (για πάνελ συντονιστών), σε απόσταση d από έναν σταθερό τοίχο. Ο παράγοντας ποιότητας Q δίνεται από την σχέση [5]:

$$Q = 2\sqrt{V(\frac{L}{S})^3} \quad (1.2.5.)$$

2. Περιγραφή του ψηφιακού μοντέλου

2.1. Ισοδύναμο απλού συντονιστή Helmholtz στο πεδίο του χρόνου.

Με βάση την απλή αναδρομική εξίσωση [6]:

$$y_t=x_t+a_t y_{t-1} \quad (2.1.6.)$$

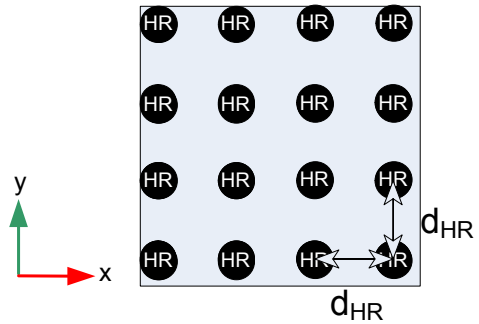
πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον matlab η εξομοίωση ενός συντονιστή Helmholtz. Οι παράμετροι των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφηκαν με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του HR. Η εξίσωση (2.1.6.) πιο αναλυτικά και σε διακριτό χρόνο, από συνεχές, πεδίο χρόνου δίνεται σαν:

$$y(k)= 2R\cos(m)y(k-1)-R^2\, y(k-2)+(1-R^2)\sin(m)p(k) \quad (2.1.7.)$$

όπου: k δείγμα (sample), $m = \arccos(\cos 5\ )\frac{2R}{1+R^2}\frac{2f_0}{F_s}$, $R = 1-\frac{\pi B}{F_s}$, $B = \frac{f_0}{Q}$ (συχνοτικό εύρος), F_s ρυθμός δειγματοληψίας (sample rate) και τέλος ο όρος $(1-R^2)\sin(m)$ συμβολίζεται και ως A_0 και εκφράζει τη μείωση πίεσης εισόδου. Έτσι τελικά το y περιγράφει την χρονικά εξαρτημένη ακουστική πίεση εξόδου ενός συντονιστή Helmholtz με γεωμετρικά χαρακτηριστικά, S (επιφάνεια στομίου), L (μήκος λαιμού), V (όγκος σώματος), και πίεση εισόδου p.

2.2. Ισοδύναμο συστοιχίας συντονιστών Helmholtz στο πεδίο του χρόνου.

Σε ίσες αποστάσεις d_{HR} στο επίπεδο (x,y) προγραμματίστηκε συστοιχία φίλτρων (εξίσωση 2.1.7.) δημιουργώντας έτσι την εξομοίωση της συστοιχίας Helmholtz συντονιστών, με HR^2 πλήθος όμοιων συντονιστών (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) οι οποίοι καταλαμβάνουν επιφάνεια:
$S=(d_{HR}\ HR)^2(10)$



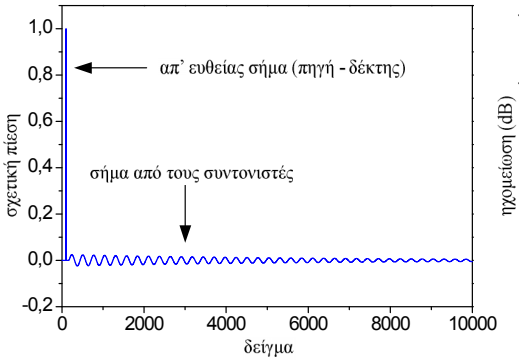
Σχήμα 2.2.2. Κάτοψη συστοιχίας όμοιων συντωνιστών Helmholtz 4x4

Για την εξομοίωση σημειακή παντοκατευθυντική πηγή βρίσκεται στο σημείο με καρτεσιανές συντεταγμένες (x_s,y_s,z_s) καθώς και ο δέκτης στο σημείο με συντεταγμένες (x_r,y_r,z_r). Η πηγή εκπέμπει ιδανικό κρουστικό σήμα το οποίο διανύει κάποια απόσταση για να φθάσει στον κάθε συντονιστή. Υπολογίζεται λοιπόν η ηχομείωση λόγω της συγκεκριμένης απόστασης (πηγής - συντονιστών), δηλαδή η πίεση p εισόδου του κάθε συντονιστή (εξίσωση 2.1.7.). Έπειτα ο κάθε συντονιστής λειτουργεί σα μια νέα παντοκατευθυντική πηγή που επανεκπέμπει την προσπίπτουσα ακουστική πίεση p, με μειωμένη όμως ενέργεια στη συχνότητα συντονισμού του κάθε HR, ώστε τελικά ακολούθως με την νέα ηχομείωση, λόγω της απόστασης συντονιστή με τον δέκτη, να φθάσει το σήμα από κάθε συντονιστή στο δέκτη και να γίνει η άθροισή τους στο πεδίο του χρόνου. Για να μελετηθεί καλύτερα η λειτουργία των συντονιστών δεν έγινε εξομοίωση πάνελ αλλά συστοιχία συντονιστών, διότι στην περίπτωση του πάνελ, στο δέκτη θα έφτανε και το σήμα από την ανάκλαση στην επίπεδη επιφάνεια του πάνελ, το οποίο θα αλλοίωνε το καθαρό σήμα από τους συντονιστές. Έτσι στην πηγή φθάνει το απ' ευθείας σήμα από την πηγή στο δέκτη και έπειτα τα σήματα από τους συντονιστές.

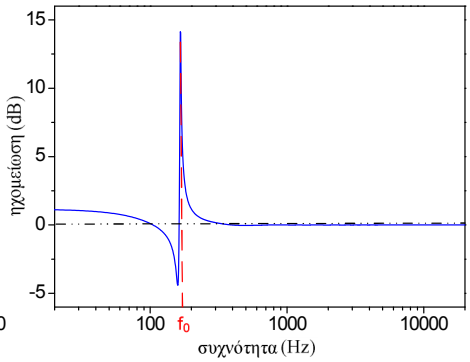
3. Αποτελέσματα εξομοιώσεων

3.1. Αποτελέσματα μοντέλου με όμοιους συντονιστές

Στα επόμενα σχήμα απεικονίζονται η πίεση που φθάνει στο δέκτη, κανονικοποιημένη από -1 έως +1, σε συνάρτηση με τα δείγματά, από 0 έως 10000 με ρυθμό δειγματοληψίας 44100 (γραφική 3.1.1α) και ο μετασχηματισμός Fourier αυτής (γραφική 3.1.1β). Η συστοιχία αποτελείται από 100 όμοιους συντονιστές (10×10) με γεωμετρικά χαρακτηριστικά: L= 0,05m, S= 0,00283m^2, V=0,0031m^3 και συχνότητα συντονισμού f_0= 165Hz. Η πηγή και ο δέκτης βρίσκονται στο κέντρο της συστοιχίας σε ύψος 0,25m και 1m αντίστοιχα.



Γραφική 3.1.1α.Κρουστική απόκριση συστοιχίας συντονιστών Helmholtz (10x10) με ένα τύπο συντονιστών.



Γραφική 3.1.1β. Συχνοτική απόκριση

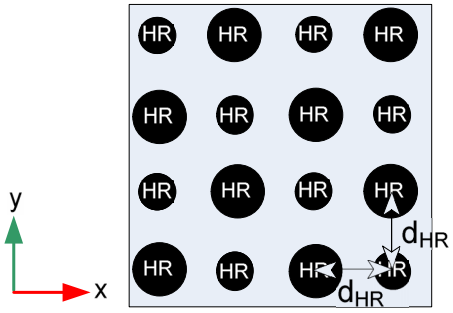
Στη γραφική 3.1.1α., που απεικονίζονται τα πρώτα 10000 δείγματα σχετικής πίεσης που φθάνουν στην πηγή, είναι εύκολα παρατηρήσιμο το απ' ευθείας σήμα από την πηγή καθώς και η άθροιση των υπολοίπων 100 σημάτων από τους συντονιστές στη θέση της πηγής.

Για να μελετηθεί το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, από τη πίεση στο πεδίο του χρόνου (γραφική 3.1.1α.) με μετασχηματισμό Fourier περνάμε στο πεδίο της συχνότητας. Η γραφική 3.1.1β απεικονίζει την ηχομείωση της εν λόγω συστοιχίας. Το χαρακτηριστικό των συντονιστών Helmholtz, να ενισχύουν το σήμα, λίγο πριν τη συχνότητα συντονισμού (157Hz), είναι ευδιάκριτο στη γραφική 3.1.1β. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας. Στη συχνότητα συντονισμού λοιπόν η ηχομείωση είναι της τάξης των 13,5dB, για το μοντέλο του παραδείγματος, με αναμενόμενο το αρκετά στενό συχνοτικό εύρος γύρω από αυτή. Ο συντονιστής θεωρητικά επιδρά μόνο στη συχνότητα συντονισμού ενώ τις υπόλοιπες τις αφήνει ανεπηρέαστες.

3.2. Αποτελέσματα μοντέλου με διαφορετικού τύπου συντονιστές

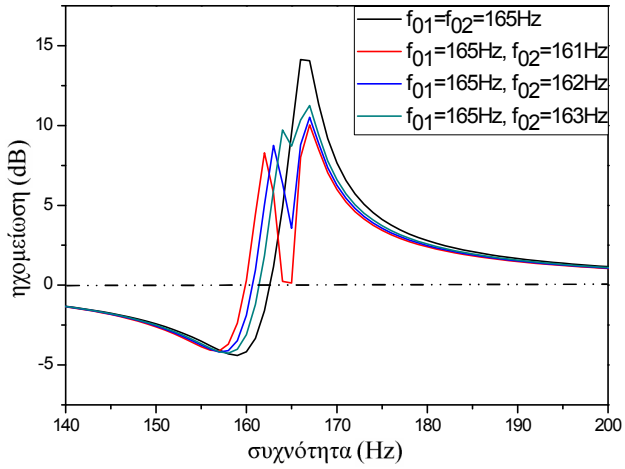
Για να επιτευχθεί το ζητούμενο της εργασίας, να μεγαλώσει το συχνοτικό εύρος της απορρόφησης, μελετήθηκε συστοιχία με δύο διαφορετικού τύπου συντονιστές. Οι μισοί συντονιστές διατήρησαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παραγράφου 3.1 ενώ στους υπόλοιπους μεταβλήθηκε ελαφρώς η

επιφάνεια στομίου τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.3., αλλάζοντας έτσι τη συχνότητα συντονισμού τους (f_0). Το υπόλοιπο σύστημα παρέμεινε ως είχε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.2.3. Κάτοψη συστοιχίας δύο διαφορετικών τύπων συντονιστών Helmholtz 4x4

Για να μελετηθεί η επίδραση δύο τύπων συντονιστών όσον αφορά το συχνοτικό εύρος απορρόφησης, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις εξομοιώσεις. Στην πρώτη όλοι οι συντονιστές είχαν την ίδια επιφάνεια στομίου S= 0,00283m^2 κι έτσι η συχνότητα συντονισμού της συστοιχίας είναι ίδια με εκείνη της προηγούμενης παραγράφου (μαύρη γραμμή στη γραφική 3.2.2.). Στην δεύτερη εξομοίωση η επιφάνεια των μισών συντονιστών παρέμεινε S_1= 0,00283m^2 των υπόλοιπων όμως μεταβλήθηκε S_2= 0,00264m^2. Έτσι η συστοιχία έχει δύο συχνότητες συντονισμού f_{01}=165Hz και f_{02}=161Hz και η συχνοτική της απόκριση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (κόκκινη γραμμή της γραφικής 3.2.2.). Ομοίως οι επόμενες εξομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με σταθερή επιφάνεια του στομίου των μισών συντονιστών ενώ οι υπόλοιποι με S_2=0,00269m^2, άρα f_{02}=162Hz στην τρίτη (μπλε γραμμή της γραφικής 3.2.2.) και με S_2=0,00273m^2, άρα f_{02}=163Hz στην τέταρτη (μπλε γραμμή της γραφικής 3.2.2) εξομοίωση.



Γραφική 3.2.2. Συχνοτική απόκριση τεσσάρων μοντέλων συστοιχίας συντονιστών (10x10) Helmholtz με δύο διαφορετικούς τύπους συντονιστών.

Όπως λοιπόν φαίνεται στην γραφική 3.2.2. εάν η διαφορά των δύο συχνοτήτων συντονισμού της συστοιχίας είναι μεγάλη (4Hz στη $2^η$ εξομοίωση, κόκκινη γραμμή γραφικής 3.2.2.) στις ενδιάμεσες τιμές η απορρόφηση μηδενίζεται, λόγω του φαινομένου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έτσι ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση δεν επιτυγχάνεται ο σκοπός της εργασίας (μεγάλωμα συχνοτικού εύρους απορρόφησης) και ουσιαστικά η συστοιχία συμπεριφέρεται ως συσκευή ηχοαπορρόφησης δύο ξεχωριστών συχνοτήτων (f_{01}=165Hz και f_{02}=161Hz), με μικρότερη απορρόφηση από εκείνη των όμοιων συντονιστών. Στις άλλες δύο εξομοιώσεις παρόλο που η απορρόφηση παραμένει, όπως ήταν αναμενόμενο, στις ίδιες περίπου τιμές το συχνοτικό εύρος απορρόφησης αυξάνει 4Hz περίπου, σε σχέση με την πρώτη εξομοίωση (μαύρη γραμμή γραφικής 3.2.2.). Εδώ παρόλο που μειώνεται η απορρόφηση ανάμεσα στις δύο συχνότητες συντονισμού f_{01} και f_{02}, δε φθάνει σε μηδενικές τιμές. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί πως οι δύο τελευταίες συστοιχίες μπορούν να λειτουργήσουν ως συστοιχίες συντονιστών Helmholtz με μεγαλύτερο συχνοτικό εύρος απορρόφησης.

4. Συμπεράσματα

Στις συστοιχίες συντονιστών Helmholtz είναι δυνατό να μεγαλώσει το συχνοτικό εύρος απορρόφησης, με δύο διαφορετικού τύπου συντονιστές που όμως δεν πρέπει να απέχουν πολύ οι συχνότητες συντονισμού τους. Για παράδειγμα στην παρούσα εργασία, σε συστοιχία 100 συντονιστών, η μέγιστη διαφορά των συχνοτήτων συντονισμού, για την επίτευξη του εν λόγω σκοπού, είναι τα 3Hz και η αύξηση του συχνοτικού εύρους απορρόφησης είναι της τάξης των 4Hz. Το παρόν πρόβλημα οφείλετε στην ιδιότητα των συντονιστών να ενισχύουν το σήμα πριν τη συχνότητα συντονισμού τους.

Επίσης η αύξηση του συχνοτικού εύρους απορρόφησης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής της απορρόφησης, όπου στην παρούσα εργασία είναι της τάξης των 5dB.

5.Αναφορές

[1] MATLAB 2011, The MathWorks Inc., Natick, MA (2011)

[2] Trevor J.Cox and Peter D'Antonio, "Acoustic Absorbers and Diffusers" Second Edition, *book from Taylor & Francis Group (*2009)

[3] G.R.Bigg, "The three dimensional cavity resonator", Journal of Sound and Vibration, Vol. 85 (1982) 85-103

[4] K.U. Ingard, "On the theory and design of acoustic resonators", *Journal of the Acoustical Society of America* **25**, 1037-1067 (1953).

[5] E.Kinsler, R.Frey, B.Coppens and V.Sanders "Fundamentals Of Acoustics" third edition (1982).

[6] Ken Steiglitz "A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music" (1996)

Identification of Similarities between the Turkish Makam Scales and the Cypriot Folk Music

Andreas Neocleous
University of Groningen
neocleous.andreas@gmail.com

Maria Panteli
University of Cyprus
m.x.panteli@gmail.com

Nicolai Petkov
University of Groningen
n.petkov@rug.nl

Christos N. Schizas
University of Cyprus
schizas@ucy.ac.cy

ABSTRACT

In western music, the separation of an octave into notes is done by dividing its frequency range into 12 equal intervals in a logarithmic scale. The boundaries of these intervals are the semi-tones. In non-western scales and more specifically in makam scales, the octave is separated into 53 equal distances. The aim of this work is mainly to explore whether there is similarity between Cypriot folk songs and Turkish folk songs in terms of tonality. We used pitch histograms for identifying the most common frequencies played in each song we have tested. Pitch histograms were created for 20 Cypriot folk songs, 53 Turkish songs and 53 western songs. Correlation coefficients distance based technique has been used for measuring the closest distance between the Cypriot pitch histograms and the Turkish and Western histograms. The database used for our investigations showed that 80% of the comparisons between Cypriot and Turkish histograms had more than 50% similarity.

Αναγνώριση Ομοιότητας μεταξύ Τούρκικων Μακαμ και Κυπριακής παραδοσιακής μουσικής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην Δυτική μουσική, ο διαχωρισμός της οκτάβας σε νότες γίνεται με τη διαίρεση του συχνοτικού της εύρους σε 12 ίσες συχνοτικές αποστάσεις σε λογαριθμική κλίμακα. Τα όρια αυτών των διαστημάτων ονομάζονται ημιτόνια. Σε μη-δυτικές μουσικές, και συγκεκριμένα στην Τούρκικη μουσική, η οκτάβα διαχωρίζεται σε 53 ίσες συχνοτικές αποστάσεις. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνήσει το ενδεχόμενο ομοιότητας μεταξύ της Κυπριακής παραδοσιακής μουσικής και της Τούρκικης μουσικής όσον αφορά την τονικότητα. Χρησιμοποιήθηκαν ιστογράμματα τονικού ύψους για την αναγνώριση των συχνοτήτων που εμφανίστηκαν τις περισσότερες φορές σε ένα κομμάτι. Ιστογράμματα τονικού ύψους δημιουργήθηκαν για 20 Κυπριακά παραδοσιακά τραγούδια, 53 Τούρκικα και 53 Δυτικά τραγούδια. Χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης για τον υπολογισμό της κοντινότερης απόστασης μεταξύ των Κυπριακών τραγουδιών και των Δυτικών/Τουρκικών τραγουδιών. Η μελέτη αυτή της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε έδειξε ότι το 80% των συγκρίσεων μεταξύ Κυπριακών και Τούρκικων τραγουδιών είχαν μεγαλύτερη απο 50% ομοιότητα.

Introduction

Computational folk music analysis received a lot of attention during the last years, particularly in the area of music information retrieval. One of the most interesting aims of the research in computational ethnomusicology is to understand the structure of the music in terms of low-level and high-level characteristics. Indeed, appropriate mathematical formulations and techniques for modeling and comparisons can be applied to large databases of folk music [1]. Music information retrieval techniques can be applied in order to extract useful information regarding the rhythm, melodies, timbre and other musical aspects. It is possible to build models of the structure and the patterns of the music and explore possible similarities or dissimilarities between different music.

Our goal is to explore whether there is a presence of Turkish musical aspects in Cypriot folk music, particularly the relation of the frequency distances within the most common tones that have been played in a song. The main difference between the western music and the Turkish music is the relation between the frequency distances of the tones within an octave. In western music, an octave is separated into 12 logarithmically equal distances called "semitones" while in the Turkish music, according to Arel theory, an octave is divided in 53 equal partitions with a whole tone representing 9 such partitions, also known as the "Holdrian comma". Further discussion on the different makam theories can be found in [2]. It is pointed though that the Turkish 53 distances are not well established, since in different areas of Turkey different systems are used for the separation of an octave.

The present work is focused on the Cypriot flute called "pithkiavli". This is compared to the Turkish "ney" [3] as well as to western wood instruments such as flute, saxophone, bassoon and oboe. A database of 126 monophonic songs was used. The 20 songs were Cypriot folk songs performed by Cypriot folk musician Andreas Gristakkos. The 17 Cypriot songs were recorded specifically for the purposes of this research using professional audio equipment. The remaining of the 106 songs were consisted by 53 western songs and solo improvisations as well as 53 Turkish Makams.

A frame based algorithm [4] that estimates the fundamental frequency of a tone for each audio time window was applied to the songs and a vector with fundamental frequency estimations was created. Pitch histograms were computed from each fundamental frequency vector and each Cypriot song was compared with each one of the western and Turkish songs. Correlation coefficients distance measure was computed between the Cypriot histograms and the western and Turkish histograms creating 2120 comparisons. The range between 0 and 1 was used for the similarity measure, and a similarity number above 0.5 was considered as "similar", while a similarity number below 0.5 was consider "dissimilar". A drawback of this work is that we used only one similarity measure technique and the results are not compared with other distance measure techniques in order to confirm the observations. Another drawback is the relatively small database.

The results show that 55% of the comparisons between the Cypriot songs and the western songs were considered "similar" while the number of comparisons between the Cypriot songs and the Turkish songs that were considered "similar" was the 80%

of the overall 1060 comparisons. Furthermore, 15.6% of the comparisons of Cypriot – Turkish songs was consider "very similar" since the output from the similarity measure was above 0.7. The respective percentage for the comparisons Cypriot – western was only 2.4%.

1. Data

The dataset was consisted by a collection of 120 monophonic songs. 20 songs were Cypriot folk songs, 53 songs were Turkish "makams" and 53 songs were western monophonic songs and solo improvisations. 17 Cypriot folk songs were digitally recorded with professional audio equipment, as expressed by a Cypriot folk musician using his self-made flutes called "pithkiavli". A shotgun microphone and a large diaphragm condenser microphone with cardioid polar diagram were used. The signals from each microphone were recorded in to separate channels.

The 53 makam songs were consisted by six makams with 9 Hicaz, 9 Huseiny, 7 Huzzam, 8 Nihavend, 12 Saba, and 8 Ussak. The 53 western songs were consisted by songs and solo improvisations with flute, bassoon, clarinet, oboe and saxophone. The songs that were played with flute were 4 movements from partita for solo flute by Bach, 7 pieces for solo flute by Leigh Landy, 12 fantasias for solo flute by Telemann, the song "Syrinx" of Debussy, the song "Soliloquy for Solo Flute Op. 44" by Lowell Liebermann, the song "Image for solo flute" by Bozza, the song "Danse de la chevre" by Arthur Honegger, the song "Tango Etude" by Piazzolla, the song Daphnis et Chloe by Ravel and nine solo improvisations played with flute.

In our library we used also 3 monophonic bassoon solos, 3 pieces for solo clarinet from Stravinsky, two monophonic oboe solos, and seven monophonic saxophone solos. All the Turkish music and all the western songs were extracted from original audio cd's, while the western monophonic solos were downloaded from youtube.

2. Methodology

Frame-based segmentation was applied to 126 digitally stored monophonic songs and the Yin pitch extraction algorithm [4] has been applied in each frame. For our investigations, a segment of the first 120 seconds of each song was examined and 126 vectors with fundamental frequency estimations, one for each song were created. In a second stage, pitch histograms were created and each Cypriot histogram was compared with all the western and Turkish histograms creating in total 2120 comparisons. Correlation coefficients as distance measures were found between the histograms of the Cypriot folk songs and the histograms of the Turkish folk songs as well as the histograms of the Cypriot folk songs and the histograms of the western songs.

2.1 Pitch histogram computation

One of the major features for tonal and scale similarity between monophonic songs is the pitch histogram of each song [5]. The peaks of a pitch histogram shows the most frequent notes played in a song.

In the analysis of the western music, a pitch histogram is consisted by a vector with length of 12 bins. The 12 bins of the pitch histogram represent the 12 notes of the western music theory. Each fundamental frequency estimation is rounded in to the closest frequency that belongs to a western note and it is stored into respective bin of the histogram. This is considered to be the pitch class histogram of a song. The distance between two histograms of different songs could be a measure of similarity or dissimilarity of the tonality of the two respective songs.

The above approach can be applied only in western music where there is a strong correlation between consecutive tones. In non-western music and particularly in Turkish music, according to Arel theory [6], the octave is separated in to 53 logarithmically equal distances thus in Turkish music the frequencies of several tones have different values than the frequencies of the notes in western music theory. To overcome the limitation of the histograms that has length of 12 bins, Gedik A. and Bozkurt B., in [7], they propose that the length of the histogram should have higher dimension in order to capture all possible frequencies of the tones that belong in the Turkish makam music.

2.2 Logarithm pitch histogram computation

It is well known that the frequency distance between semitones has an exponential relation. More specifically, equation 2.1 shows the relation of the frequencies between two notes in western music where f_0 is the frequency of the first note and f is the frequency of the second note. n is the distance in semitones between two notes.

$$f = f_0 x 2^{\frac{n}{12}} \tag{2.1}$$

The equation 2.1 of a distance of 12 semitones from any note (a distance of an octave) will become $f = f_0 x 2^{\frac{12}{12}}$ thus the frequency of the second note (an octave higher) will be the double of the frequency of the first note. The exponential function in figure 2.1 shows the derivative of the frequencies between 100 western consecutive notes. The linear function shows the derivative of the logarithm of the frequencies of the same 100 notes.

In this work, similar approach was used with the work proposed in [7] for computing the pitch histograms of the songs. A higher dimensional vector for storing the distribution of the pitch estimations of a song was used. The range of the frequencies 20 Hz – 20 KHz is mapped in to a vector of length 6000 bins. A higher and a lower possible frequency estimation of 100 Hz and 2000 Hz respectively were set as threshold to the fundamental frequency estimator assuming that the musical instruments and the songs we choose to analyze will not overcome the fundamental frequency of 2000 Hz. After the limitation of the lower and the higher possible fundamental frequency estimation, the length of the pitch histogram vector was reduced to 2602 Bins.

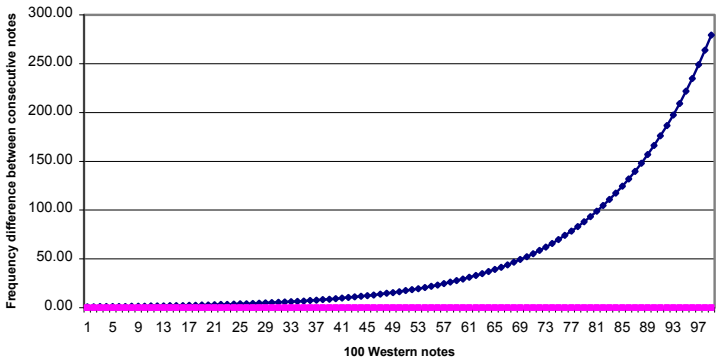


Figure 2.1 The derivative of the frequencies of the notes in the western music theory (exponential) and the derivative of the logarithm of the frequencies of the notes in the Western music theory (linear) for 100 notes.

2.3 Pitch histograms alignment to the highest similarity bin

An evaluation of a system that identifies similarities and dissimilarities in tonality between two songs, should consider two histograms on whether they are "very similar" if the two histograms are initially extracted from the same song or melody, played in different octaves. In order to achieve this, the second pitch histogram must be shifted to the bin that has the highest similarity with the first pitch histogram. The histograms in this case have to be in the logarithm space in order to keep equal frequency distances between tones while shifting the histogram.

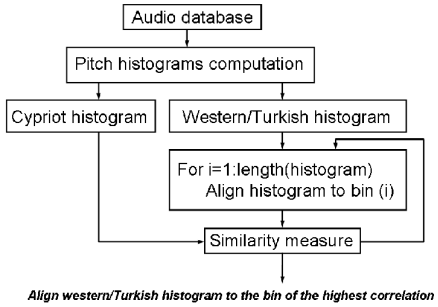


Figure 2.2 Diagram of the procedure used for applying the similarity measure between pitch histograms

A systematic calculation of the distance between two histograms is applied for all the possible correlations of the two histograms by shifting the histogram to be compared from bin one to the last bin. Figure 2.2 shows a diagram of the procedure followed for the similarity measure between two Cypriot and Western/Turkish

histograms. After the calculation of the similarity measure between two histograms when the second histogram is shifted to the last bin, the western / Turkish histogram is shifted to the bin of the highest correlation and the value of the similarity measure in this bin is considered to be the degree of similarity.

3. Results

Tables 3.1 and 3.2 show the distribution of the distance measure values for the 1060 comparisons between the Cypriot and western songs and the 1060 comparisons between the Cypriot and Turkish songs respectively. The distribution of the dissimilarity is printed in the left half of the tables while the distribution of the similarity is shown on the right half of the tables. The output range of the correlation coefficients was 0 – 1. This range was separated in-to 10 steps and a distribution of the distance measure outputs of each comparison was created. The range of each step is shown in the first column of Tables 3.1 and 3.2, while in the second column is the distribution is shown. The third column shows the percentage between the population of each cell in the distribution column and the overall population of the comparisons.

Table 3.1 The distribution of the distance measure values for the 1060 comparisons between the Cypriot and western songs. The range of each step is shown in the first column, while in the second column depicts the distribution. The third column shows the percentage between the population of each cell in the distribution column and the overall population of the comparisons.

Comparison of Cypriot and western songs									
Dissimilarity					**Similarity**				
Range	**Distribution**	**Percentage**			**Range**	**Distribution**	**Percentage**		
0.5	0	0.0%	44,4%	9,3%	0.55	228	21.5%	55,6%	
0.1	0	0.0%			0.6	171	16.1%		
0.15	0	0.0%			0.65	130	12.3%		
0.2	0	0.0%			0.7	32	3.0%		
0.25	0	0.0%			0.75	22	2.1%		2,6%
0.3	1	0.1%			0.8	6	0.6%		
0.35	32	3.0%			0.85	0	0.0%		
0.4	66	6.2%			0.9	0	0.0%		
0.45	149	14.1%			0.95	0	0.0%		
0.5	223	21.0%			1	0	0.0%		

Table 3.2 The distribution of the distance measure values for all the 1060 comparisons between the Cypriot and Turkish songs.

Comparison of Cypriot and Turkish songs									
Dissimilarity					Similarity				
Range	Distribution	Percentage			Range	Distribution	Percentage		
0.5	0	0.0%	19,5%	2,3%	0.55	143	13.5%	80,5%	
0.1	0	0.0%			0.6	176	16.6%		
0.15	0	0.0%			0.65	195	18.4%		
0.2	0	0.0%			0.7	174	16.4%		
0.25	0	0.0%			0.75	92	8.7%		15,6%
0.3	1	0.1%			0.8	53	5.0%		
0.35	3	0.3%			0.85	17	1,6%		
0.4	20	1.9%			0.9	3	0,3%		
0.45	71	6.7%			0.95	0	0.0%		
0.5	112	10.6%			1	0	0.0%		

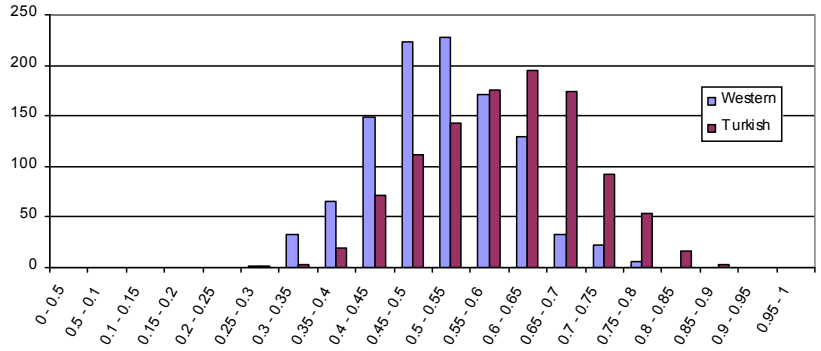


Figure 3.1 The distribution of the output from the distance measure between the Cypriot songs and the western songs showed in (light) blue and the distribution of the output from the distance measure between the Cypriot songs and the Turkish songs showed in (dark) purple.

In Table 3.1 it is shown that in 55% of the comparisons between the Cypriot songs and the western songs a value above 0.5 exists. This indicates that the two were considered "similar". In the comparisons, the distance values above 0.7 were considered "very similar". Similarly, "very dissimilar" were considered when the distance was below 0.3. It is seen that "very similar" was considered for only 2.6% of the Cypriot – western comparisons, while 9.3% was considered "very dissimilar"

As can be seen from Table 3.2, the first observation is that in the "similarity area", there are 80% of the comparisons Cypriot – Turkish while the respective percentage

of the comparisons Cypriot – western is 55%. One additional observation is that the percentage of the output from the similarity measure of Cypriot and Turkish songs is 15.6% while the respective percentage for the similarity of Cypriot and western songs that was above 0.7, is only 2.4%. Furthermore, the comparisons of the Cypriot and western songs that was below 0.4 is the 9.4% of the overall comparisons while the respective percentage for the comparisons of the Cypriot and Turkish songs is 2.3%. In figure 3.1 the distribution of the distance measure of the Cypriot – western comparison (in light blue) and the distribution of the Cypriot – Turkish comparison (in dark purple) is plotted.

4. Conclusions / Future work

In this work, 20 Cypriot folk music histograms were compared to 53 western and 53 Turkish songs. The correlation coefficients distance measure technique was applied between the Cypriot histograms and the western/Turkish histograms. From the results, we observed that the hypothesis that Cypriot folk music shares similarities with Turkish music was partially confirmed. We only explored the potential of similarities regarding tonality. As future work, more distance measure techniques will be added to our algorithms and we will choose a bigger database in order to create a more reliable database. Computational intelligence approaches will be also applied.

5. Acknowledgments

This work is supported by the research grant
Ανθρωπιστικες/Ανθρω/0311(BE)/19 funder by the Cyprus Research Promotion Foundation.

6. References

[1] W. Chai and B. Vercoe, “Folk music classification using Hidden Markov Models”, Proc. of International Conference on Artificial Intelligence, (2001).

[2] Yarman, O. A Comparative Evaluation of Pitch Notations in Turkish Makam Music: Abjad Scale & 24-Tone Pythagorean Tuning – 53 Equal Division of the Octave as a Common Grid. Journal of Interdisciplinary Music Studies, ***1*(2)**, 43-61. (2007).

[3] http://compmusic.upf.edu/node/55

[4] De Cheveigné, A., and Kawahara, H. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. The Journal of the Acoustical Society of America, **111(4)**, 1917. (2002).

[5] G. Tzanetakis, A. Ermolinskyi, and P. Cook, “Pitch Histograms in Audio and Symbolic Music Information Retrieval,” *Journal of New Music Research*, vol. 32, no. 2, pp. 143–152, 2002.

[6] Arel, H.S, Tu¨rk Musikisi Nazariyatı Dersleri, (1930).

[7] Gedik A. and Bozkurt B., Pitch-frequency histogram-based music information retrieval for Turkish music” Signal processing, **90**, 1049-1063 (2010).

Μελέτη και υλοποίηση του κριτηρίου ενόχλησης από ηχώ, σε κλειστούς χώρους

Γαβριήλ Καμάρης
Φοιτητής /Ομάδα ακουστικής και τεχνολογίας ήχου
Τμήμα Ηλ.Μηχ. Πανεπιστημίου Πατρών
gpkamaris @ gmail.com

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής /Ομάδα ακουστικής και τεχνολογίας ήχου
Τμήμα Ηλ.Μηχ. Πανεπιστημίου Πατρών
mourjop @ upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται το κριτήριο ενόχλησης από ηχώ που προτάθηκε από τους Dietsch & Kraak. Για τις απαιτήσεις της μελέτης αναπτύχθηκε αλγόριθμος υλοποίησης του κριτηρίου σε Matlab . Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του κριτηρίου σε μετρήσεις και προσομοιώσεις για συγκεκριμένο κλειστό ακουστικό χώρο. Στο δεύτερο γίνεται μια πρώτη μελέτη για την επέκταση του κριτηρίου σε αμφιωτικές μετρήσεις.

Study and implementation of echo disturbance criterion in closed rooms

ABSTRACT

In this paper, the echo disturbance criterion proposed by Dietsch and Kraak is studied. An implementation algorithm in Matlab has been developed. This algorithm is then used for analysis and comparison of measured and simulated room impulse responces. At the second part, a first study for the validity of the criterion when is used on binaural measurements is studied.

Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η ακουστική ποιότητα ενός κλειστού χώρου μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά από την παρουσία συγκεκριμένων ανακλάσεων που μπορεί να γίνουν αντιληπτές στους ακροατές σαν διακριτή ηχώ. Στην εργασία παρουσιάζεται μια υλοποίηση και μελέτη του κριτηρίου ενόχλησης από ηχώ που πρότειναν οι Dietsch & Kraak για την μελέτη της ακουστικής ποιότητας κλειστού χώρου. Η αίθουσα πάνω στην οποία πραγματοποιείται η μελέτη είναι η κεντρική αίθουσα του Συνεδριακού Κέντρου του Πανεπιστημίου Πατρών [1]. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει προσομοιώσεις στον υπολογιστή με τη χρήση του λογισμικού CATT

- Acoustic [2] . Επίσης έχουν παρθεί μετρήσεις στο χώρο με παντοκατευθυντική και αμφιωτική διάταξη μικροφώνων.
Αρχικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του κριτηρίου για κρουστικές που προέκυψαν από προσομοίωση και για κρουστικές που μετρήθηκαν επί τόπου. Έπειτα συγκρίνονται τα αποτελέσματα του κριτηρίου για τις μετρήσεις με παντοκατευθυντική και με αμφιωτική διάταξη δεκτών. Σκοπός είναι να εξαχθούν κάποια αρχικά συμπεράσματα για την ισχύ και τη συμπεριφορά του κριτηρίου σε αμφιωτικές μετρήσεις και σήματα και να προταθούν μέθοδοι επεξεργασίας που θα μπορούσαν να γίνουν σε τέτοιου είδους μετρήσεις ώστε να παρθούν τα αξιόπιστα αποτελέσματα.

1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη ενός αντικειμενικού κριτηρίου για την ηχώ ήταν οι Bolt & Doak το 1950 [3]. Μελέτησαν το φαινόμενο του Haas [4] για σήμα ομιλίας. Με υποκειμενικά τεστ σε ένα δωμάτιο με $RT = 0.8s$, υπολόγισαν τα όρια $10, 50, 90\%$ ενόχλησης από ηχώ. Τα όρια που υπολόγισαν δεν είναι κοινά εφαρμόσιμα σε όλα τα δωμάτια και επίσης δεν έλαβαν υπόψιν τους τί αποτέλεσμα θα προκαλούσε μία ομάδα ανακλάσεων μικρότερου πλάτους.

Ο δείκτης Echograd (echo coefficient) του Niese [5] διατυπώθηκε κυρίως για την καταληπτότητα ομιλίας, παρά για την ενόχληση από δυνατές, διακριτές ανακλάσεις. Σημαντικό είναι ότι ο δείκτης Echograd προκύπτει από την σύγκριση με την « ιδανική κρουστική ». Σημειωτέον ότι το κριτήριο αυτό δεν έχει διατυπωθεί για σήματα μουσικής.

Το 1977 ο Schmidt [6] πρότεινε ένα κριτήριο για ομιλία και μουσική. Χρησιμοποίησε έναν δείκτη που ονόμασε « απόλυτη ονομαστική αδράνεια του αυτιού » $E_{\tau M}(t)$. Ο Schmidt ολοκλήρωσε για $\tau = 5ms$ με το τετράγωνο της κρουστικής απόκρισης του χώρου και σύγκρινε με αυτό όπως φαίνεται στον τύπο (1).

$$\Delta L = 10 \log \frac{10 E_{\tau 5}}{E_{\tau M}} dB \tag{1}$$

Προτάθηκαν διαφορετικές σταθερές χρόνου τM για μουσική και ομιλία. Γενικά είναι αποδεκτό ότι μία ηχώ αναγνωρίζεται αν το $\Delta L \geq 3dB$ και η ανάκλαση φτάνει $50ms$ μετά τον απευθείας ήχο. Όλα τα αποτελέσματα επαληθεύθηκαν με υποκειμενικά τεστ σε συνθετικό ακουστικό χώρο.

Το κριτήριο που πρότεινε ο Yamamoto [7] είναι παρόμοιο με αυτό του Schmidt. Ο Yamamoto δούλεψε με σήματα $10ms$ σε τρεις οκτάβες ($f_M = 0.5, 1$ και $2kHz$) και βασίστηκε σε υποκειμενικά τεστ. Συμπέρανε λοιπόν ότι το χρονικό όριο στο οποίο γίνεται αντιληπτή η ηχώ εξαρτάται και από τη συχνότητα. Υπολόγισε $45ms$ για $f_M = 0.5kHz$, $35ms$ για $f_M = 1kHz$ και $25ms$ για $f_M = 2kHz$. Έτσι, πρότεινε να συγκρίνεται η κρουστική απόκριση του δωματίου με μία νέα ειδική καμπύλη. Τα όρια που υπολόγισε είναι, για $0.5kHz$, $3 \ldots 4dB$, για $1kHz$, $2 \ldots 3dB$ και για $2kHz$, $1.5 \ldots 2.5dB$. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα αυτά ισχύουν μόνο για ήχους διάρκειας $10ms$ (τόση είναι η διάρκεια που θεωρεί ο Yamamoto για τον συντομότερο αντιληπτό ήχο). Δεν έχει εξεταστεί αν το κριτήριο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί για πραγματικά σήματα ομιλίας και

μουσικής.

2 Το κριτήριο των Dietsch & Kraak

Το 1986, οι Dietsch & Kraak [8] πρότειναν ένα αντικειμενικό κριτήριο για τον προσδιορισμό ενοχλητικών ανακλάσεων σε έναν ακουστικό χώρο. Για τον προσδιορισμό των διαφόρων παραμέτρων διεξήγαγαν υποκειμενικά πειράματα. Δημιούργησαν με χρήση ηχείων έναν συνθετικό ακουστικό χώρο σε ανηχωικό δωμάτιο και σε αυτόν αναπαρήγαγαν ηχητικά δείγματα μουσικής και ομιλίας. Τα βασικά τους συμπεράσματα ήταν ότι κάτω από ένα χρονικό όριο, λόγου απευθείας προς ανακλώμενο ήχο, είναι αδύνατον κάποια ανάκλαση να εκληφθεί ως ενοχλητική. Αν ξεπεραστεί αυτό το χρονικό όριο, το απαραίτητο πλάτος της ανάκλασης που θα εκληφθεί ως ενοχλητική, μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος. Αυτό σημαίνει ότι τα δύο φυσικά μεγέθη (πλάτος και χρόνος άφιξης) είναι αντιστρόφως ανάλογα. Το συμπέρασμα αυτό εκφράζεται μαθηματικά με την ισότητα

$$|p_V|^n t_V = const. \tag{2}$$

όπου ο εκθέτης n πρέπει να καθοριστεί.

Μέχρι τότε το μόνο γνωστό αντικειμενικό κριτήριο για την ακουστική χώρων, που συνδύαζε τα δύο φυσικά μεγέθη (πλάτος και χρόνος άφιξης) ήταν το χρονικό κέντρο βάρους της κρουστικής απόκρισης του δωματίου t_s το οποίο πρότειναν οι Kürer και Cremer :

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t|f(t)|\,dt}{\int_0^\infty |f(t)|\,dt} \tag{3}$$

σαν $f(t)$ προτάθηκε από τον Kürer η $p^2(t)$, όπου $p(t)$ η συνάρτηση πίεσης της κρουστικής απόκρισης του δωματίου. Έτσι, τελικά προκύπτει ο ορισμός:

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t|p(t)|^n\,dt}{\int_0^\infty |p(t)|^n\,dt} \tag{4}$$

Για να εξαχθεί το t_s για κάποια συγκεκριμένη ανάκλαση αρκεί να αλλάξει το άνω όριο ολοκλήρωσης και να μπει στη θέση του μία μεταβλητή. Έτσι λαμβάνουμε την Συνάρτηση Δόμησης του Χρονικού Κέντρου Βάρους (Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit):

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau t|p(t)|^n\,dt}{\int_0^\tau |p(t)|^n\,dt} \tag{5}$$

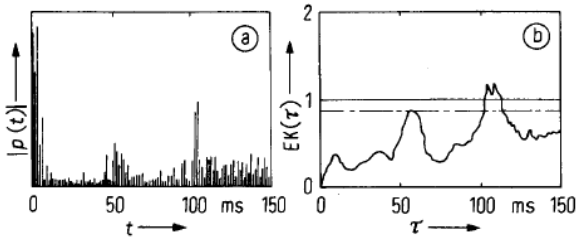
Η απεικόνιση του κριτηρίου για χρονική διάρκεια τ τελικά δίνεται από τον τύπο:

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_S(\tau)}{\Delta \tau_E} \tag{6}$$

Τέλος, θα πρέπει τα μέγιστα της καμπύλης αυτής ($\frac{\Delta t_s}{\Delta \tau}$) να συγκριθούν με κάποια κρίσιμα όρια τα οποία ορίζουν οι συγγραφείς για την αντίληψη της ηχούς.

Με την πειραματική διαδικασία στον συνθετικό ακουστικό χώρο υπολογιστήκαν όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την αριθμητική υλοποίηση και εφαρμογή του κριτηρίου. Οι τιμές του συντελεστή n, για μουσική ορίστηκε σαν $n = 1$ και για ομιλία σαν $n = 2/3$. Οι τιμές $\Delta\tau_E$, για μουσική $\Delta\tau_E = 14ms$ και για ομιλία $\Delta\tau_E = 9ms$. Τα ελάχιστα χρονικά διαστήματα που πρέπει να απέχουν δύο ανακλάσεις για να είναι αντιληπτές ως ξεχωριστές υπολογίστηκαν, σαν $\Delta t_{min} = 80ms$ για τη μουσική και $\Delta t_{min} = 50ms$ για την ομιλία. Τέλος, υπολογίστηκαν οι τιμές των ορίων, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα (2.1). Τα όρια έχουν τη μορφή $EK_{grN\%}$ όπου το N% είναι το ποσοστό των ακροατών που θα εκλάβουν την ανάκλαση ως ενοχλητική.

Εφαρμογή σε πραγματικό χώρο έγινε στις αίθουσες του Deutsche Theater Berlin και της Kammerspielen Berlin όπου είχαν εκφραστεί παράπονα για ενοχλητική ηχώ κατά την ομιλία. Παράδειγμα εφαρμογής του κριτηρίου στην αίθουσα του Kammerspielen Berlin φαίνεται στο Σχήμα (2.1). Στο Σχήμα (2.1a), όπου φαίνεται η μετρημένη κρουστική απόκριση του χώρου, διακρίνεται μία περιοχή στα $50 - 55ms$, με ανακλάσεις οι οποίες μόλις που «ενοχλούν» το 10% του ακροατηρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα (2.1b), στην περιοχή γύρω στα $100ms$ υπάρχει μία ισχυρή ανάκλαση, η οποία προκαλεί υπέρβαση και του ορίου 50% και απέχει περίπου $50ms$ από τις προηγούμενες και έτσι θα ακουστεί σαν ξεχωριστή.



Σχήμα 2.1 *Εφαρμογή του κριτηρίου για την ομιλία στο Kammerspielen Berlin : (a) Ηχόγραμμα του χώρου, (b) Ανάπτυξη του κριτηρίου* $EK(\tau)$*.(—)*$EK_{50\%}$*, (— - —)* $EK_{10\%}$*.*

	Μουσική	Ομιλία
$EK_{10\%}$	1,5	0,9
$EK_{50\%}$	1,8	1,0

Πίνακας 2.1 *Τα όρια που ορίστηκαν για το κριτήριο από τους Dietsch & Kraak*

3 Μετρήσεις Προσομοιώσεις

Για της ανάγκες της παρούσας δημοσίευσης πάρθηκαν μετρήσεις κρουστικών α-

ποκρίσεων στην κεντρική αίθουσα του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου του Πανεπιστημίου Πατρών [1]. Σαν σήμα διέγερσης χρησιμοποιήθηκε ένα λογαριθμικό sine-sweep και δέκτες ήταν ένα παντοκατευθυντικό μικρόφωνο και η κούκλα KEMAR [9] με αμφιωτική διάταξη μικροφώνων. Ειδικά για την αμφιωτική διάταξη μικροφώνων πάρθηκαν μετρήσεις και για γωνίες $\pm 45^o$. Από το λογισμικό Fuzzmeasure εξήχθησαν οι κρουστικές που καταγράφηκαν για τις δυο διαφορετικές διατάξεις που προαναφέρθηκαν. Επίσης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της ακουστικής της αίθουσας στο λογισμικό CATT-Acoustic [2] έκδοση 9.0b πάνω στο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί για την αίθουσα. Από την εξομοίωση εξήχθησαν παντοκατευθυντικές και αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις του χώρου σε μορφή .wav, $44.100kHz, 16bit$.

4 Αλγόριθμος υλοποίησης

Για την παρούσα εργασία, το κριτήριο των Dietsch & Kraak υλοποιήθηκε με αλγόριθμο στο περιβάλλον Matlab. Στον αλγόριθμο αρχικά καθορίζονται οι παράμετροι των εξισώσεων και εισάγεται η κρουστική του χώρου που μπορεί να έχει προκύψει είτε από μέτρηση είτε από προσομοίωση του χώρου σε υπολογιστή.Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στο Σχήμα (4.2) δύο διανύσματα περιέχουν τις τιμές αριθμητή και παρονομαστή για να σχηματιστεί το κλάσμα του τύπου (5). Έπειτα υπολογίζεται το $\Delta t_s(\tau)$ με το αντίστοιχο βήμα για μουσική και ομιλία. Η διαίρεση με $\Delta\tau_E$ μας δίνει την καμπύλη εκτίμησης του κριτηρίου.

5 Αποτελέσματα

5.1 Παντοκατευθυντικές Μετρήσεις και προσομοιώσεις

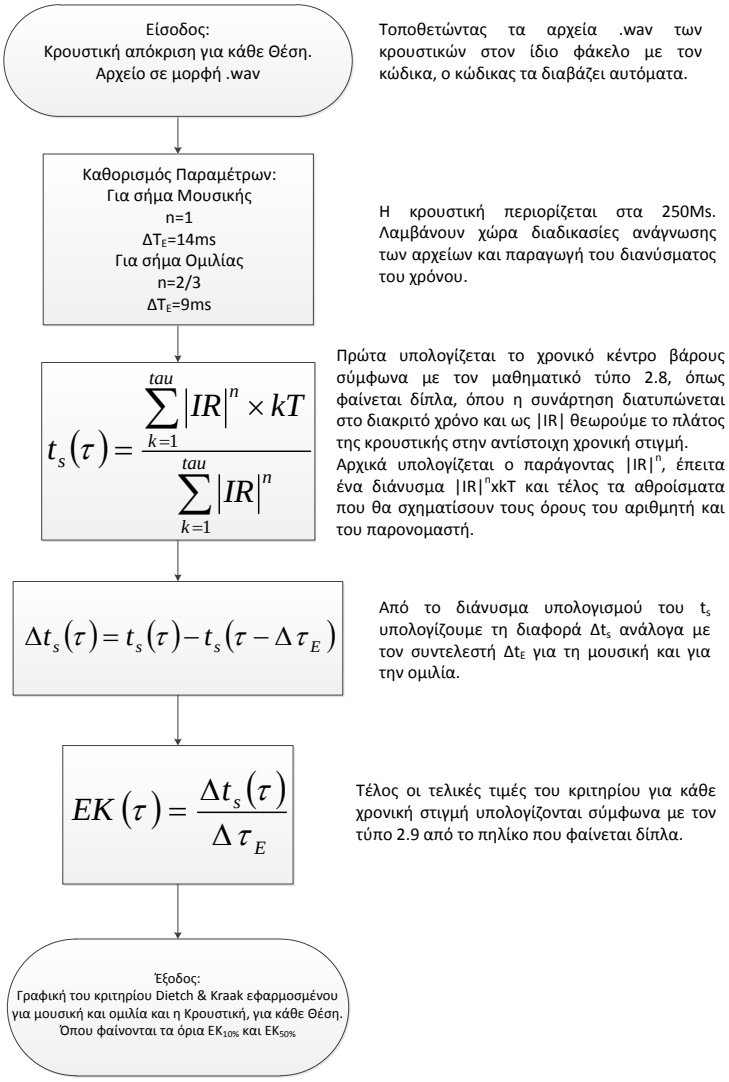
Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε κρουστικές αποκρίσεις που μετρήθηκαν στην κεντρική αίθουσα του Συνεδριακού και Πολιτιστικού Κέντρου του Πανεπιστημίου Πατρών [1] και σε κρουστικές που εξήχθησαν από το μοντέλο της ίδιας αίθουσας στο λογισμικό CATT - Acoustic [2]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις μετρήσεις και τις προσομοιώσεις για διάφορες θέσεις στο χώρο. Η θέση Δ16 είναι μία μπροστινή θέση στη μέση της σειράς. Η θέση Z7 είναι μία πλαϊνή θέση και τέλος η θέση της κονσόλας (FOH) βρίσκεται στο κέντρο της πλατείας.

Θέση Δ16

Για τη θέση Δ16, μπροστά από τη σκηνή, από την κρουστική που εξάχθηκε από την προσομοίωση (Σχήμα 5.3a), παρατηρείται ότι η ισχυρή ανάκλαση στα $40ms$ προκαλεί έντονη αύξηση στην καμπύλη πρόβλεψης του κριτηρίου. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει πρόβλημα ενόχλησης σε αυτή τη θέση, όπως δείχνει και η μέτρηση (Σχήμα 5.3b), αφού η ανάκλαση αυτή έρχεται πολύ νωρίς. Στο λογισμικό προσομοίωσης δίνεται η δυνατότητα να εντοπιστεί η επιφάνεια από όπου προέρχεται η ανάκλαση. Αυτή φαίνεται να είναι οι διαχύτες στην οροφή της σκηνής.

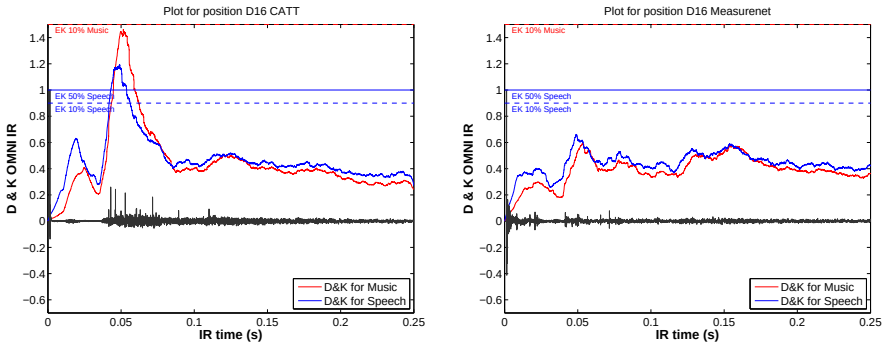
Θέση Z7

Στη Θέση Z7 υπάρχουν ισχυρές ανακλάσεις από τις πλευρικές επιφάνειες των τοίχων (Σχήμα 5.4a). Ωστόσο ούτε αυτές δεν δημιουργούν πρόβλημα ενόχλησης



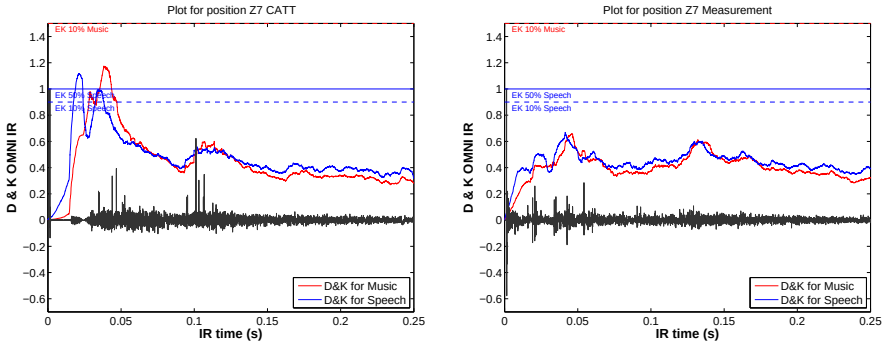
Σχήμα 4.2 *Το διάγραμμα ροής του υλοποιημένου αλγορίθμου*

αφού έρχονται κατά ομάδες και έτσι εξομαλύνεται η εντύπωση της ισχυρής διακριτής ανάκλασης που θα προκαλέσει ενόχληση. Η μέτρηση αντιθέτως, έχει δείξει ισχυρές ανακλάσεις μέχρι τα $50ms$ οι οποίες δεν δημιουργούν κάποιο πρόβλημα (Σχήμα 5.4b).



(a) (b)

Σχήμα 5.3 *(a) Προσομοίωση (b) Μέτρηση για τη Θέση Δ16*



(a) (b)

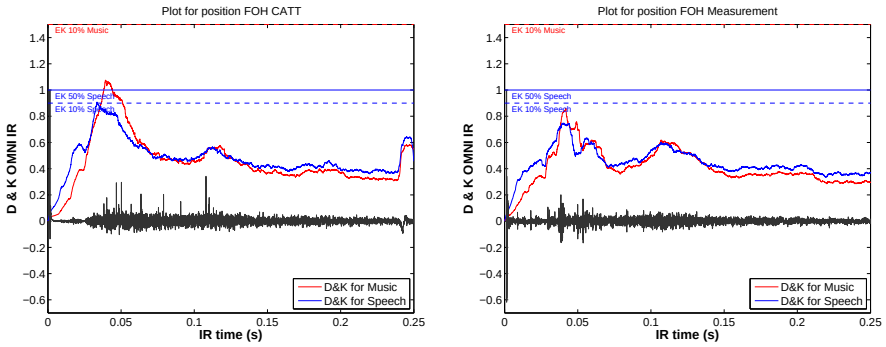
Σχήμα 5.4 *(a) Προσομοίωση (b) μέτρηση για τη Θέση Z7*

Θέση Κονσόλας (FOH)

Στη θέση της κονσόλας, στο κέντρο της πλατείας, παρατηρείται οριακή προσέγγιση στο όριο $EK_{10\%}$ speech από την κρουστική που προέκυψε από την εξομοίωση στο λογισμικό CATT - Acoustic [1] , (Σχήμα 5.5a). Η αντίστοιχη μέτρηση (Σχήμα 5.5b) δε δείχνει κάποιο πρόβλημα. Στα $50ms$ μετά την άφιξη του απευθείας ήχου, συμβαίνει υπέρβαση του κατώτατου ορίου του κριτηρίου. Επειδή ο χρόνος άφιξης της ανάκλασης είναι πολύ μικρός (μικρότερος από το όριο $80ms$), η ανάκλαση δεν θα είναι ενοχλητική. Παρατηρείται επίσης ότι η εξομοίωση έχει συγκεντρωμένη περισσότερη ενέργεια στις διακριτές ανακλάσεις σε σχέση με την μέτρηση.

5.2 Αμφιωτικές Μετρήσεις

Στις αμφιωτικές μετρήσεις εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι επεξεργασίας της κρουστικής απόκρισης ώστε να είμαστε σε θέση να εφαρμόσουμε το κριτήριο. Στην



(a) (b)

Σχήμα 5.5 *(a) Προσομοίωση (b) μέτρηση για την θέση της Κονσόλας*

πρώτη περίπτωση υπολογίστηκε η μέση τιμή της κρουστικής από τα δυο αυτιά και στην δεύτερη περίπτωση εφαρμόστηκε το κριτήριο σε κάθε αυτί χωριστά και ως καμπύλη του κριτηρίου θεωρήθηκε, για τη συγκεκριμένη θέση, αυτή με την «χειρότερη» απόδοση στο κριτήριο (υψηλότερες τιμές).
Παρατηρείται λοιπόν ότι η μέση τιμή σε πολύ λίγες περιπτώσεις εμφανίζει λίγο υψηλότερη στάθμη. Αυτό όπως φαίνεται οφείλεται στην μεγαλύτερη στάθμη που εμφανίζουν οι ανακλάσεις στις κρουστικές. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα (5.6) όπου στο (a) παρουσιάζεται η μέτρηση για παντοκατευθυντικό μικρόφωνο και στο (b) η αντίστοιχη εφαρμογή του κριτηρίου στη μέση τιμή των κρουστικών αποκρίσεων για το αριστερό και το δεξί αυτί.
Στην περίπτωση όπου ως καμπύλη του κριτηρίου θεωρείται η καμπύλη του αυτιού με το «χειρότερο» δείκτη, παρατηρείται (Σχήμα 5.7) ότι οι καμπύλες του κριτηρίου διαφέρουν αισθητά. Οι καμπύλη που προκύπτει από τις αμφιωτικές μετρήσεις εμφανίζει πάντα υψηλότερη στάθμη. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο πλάτος των ανακλάσεων στις κρουστικές αποκρίσεις.

6 Συμπεράσματα

Από την μελέτη τόσο των παντοκατευθυντικών, όσο και των αμφιωτικών μετρήσεων με βάση το κριτήριο Dietsch & Kraak , προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα. Γενικά, ο χώρος που μελετήθηκε με βάση τις παντοκατευθυντικές μετρήσεις ή εξομοιώσεις, δεν παρουσίασε στοιχεία που να δικαιολογούν την ενόχληση των ακροατών από ανακλάσεις. Γενικά, οι εξομοιώσεις παρουσίασαν αυξημένες τιμές του κριτηρίου σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις. Επιπλέον, οι τιμές του κριτηρίου εμφανίστηκαν αυξημένες σε όλες τις περιπτώσεις για αμφιωτικές μετρήσεις στις οποίες κάποια ανάκλαση προέρχεται από τη διεύθυνση που συμπίπτει με την διεύθυνση πρόσπτωσης της ανάκλασης. Μία σύγκριση της μέγιστης τιμής του κριτηρίου για κάθε διαφορετική θέση και για κάθε διαφορετική θεώρηση για την κρουστική απόκριση του δωματίου παρουσιάζεται στο Σχήμα (6.8), όπου στο (a) απεικονίζεται το κριτήριο εφαρμοσμένο για σήμα μουσικής ενώ στο (b) για σήμα

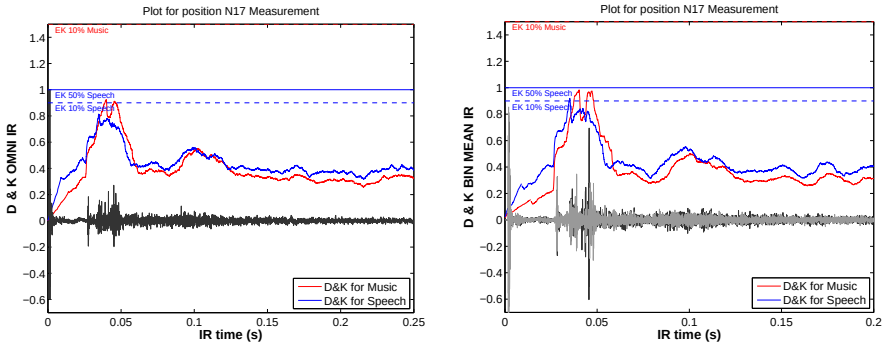
ομιλίας. Παρατηρείται και εδώ ότι οι θέσεις στη μέση κάθε σειράς παρουσιάζουν υψηλές τιμές και ότι αυτές παρουσιάζονται για αμφιωτικές μετρήσεις. Οι θέσεις που βρίσκονται κοντά σε επίπεδα που ανακλούν τον ήχο έχουν έντονες ανακλάσεις από τα πλάγια οι οποίες στις αμφιωτικές μετρήσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλάτος με αποτέλεσμα να ανεβαίνουν οι τιμές εκτίμησης του κριτηρίου και σε πολλές περιπτώσεις να ξεπερνιούνται τα όρια. Οι θέσεις στο κέντρο δέχονται ισχυρές ανακλάσεις από τα κοντινότερα επίπεδα, που είναι αυτά του θεωρείου ενώ, οι ανακλάσεις από τα υπόλοιπα επίπεδα απλά ενισχύονται από τις αμφιωτικές μετρήσεις. Γενικά, επειδή οι ανακλάσεις προέρχονται από επίπεδα που βρίσκονται εκτός του άξονα πηγής - δέκτη και πάνω στον άξονα που παρουσιάζει ευαισθησία η αμφιωτική διάταξη και άρα η συμπεριφορά της ακοής του ανθρώπου, οι τιμές που δίνει το κριτήριο για τις αμφιωτικές μετρήσεις πρέπει να εξεταστεί και να μελετηθεί με προσοχή στο μέλλον.
Ένα τέτοιο μελλοντικό υποκειμενικό τεστ θα ελέγξει αν το πρόβλημα που αναδεικνύει μία αμφιωτική μέτρηση επηρεάζει ή δεν επηρεάζει τελικά τα όρια που έχουν ορίσει οι Dietsch & Kraak για το 10% και 50% του ενόχλησης του ακροατηρίου, με τις παντοκατευθυντικές μετρήσεις κρουστικής απόκρισης χώρου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα (5.7) όπου όπως φαίνεται στο (a) η θέση δεν παρουσιάζει πρόβλημα ενώ στις αμφιωτικές μετρήσεις ((b),(c),(d)) το πρόβλημα φαίνεται έντονο.

7 Αναφορές

[1] http://www.confer.upatras.gr/

[2] http://www.catt.se/

[3] Bolt, R.H. and Doak, P.E. «A Tentative criterion for the short-trerm tran-



(a) (b)

Σχήμα 5.6 *(a) Το Κριτήριο για παντοκατευθυντική μέτρηση κρουστικής απόκρισης (b) Το κριτήριο με μέση τιμή κρουστικών από αμφιωτική μέτρηση κρουστικής απόκρισης*

sient responce of auditoriums.» J. of Acoustics Society of America,τόμος 22, (1950)

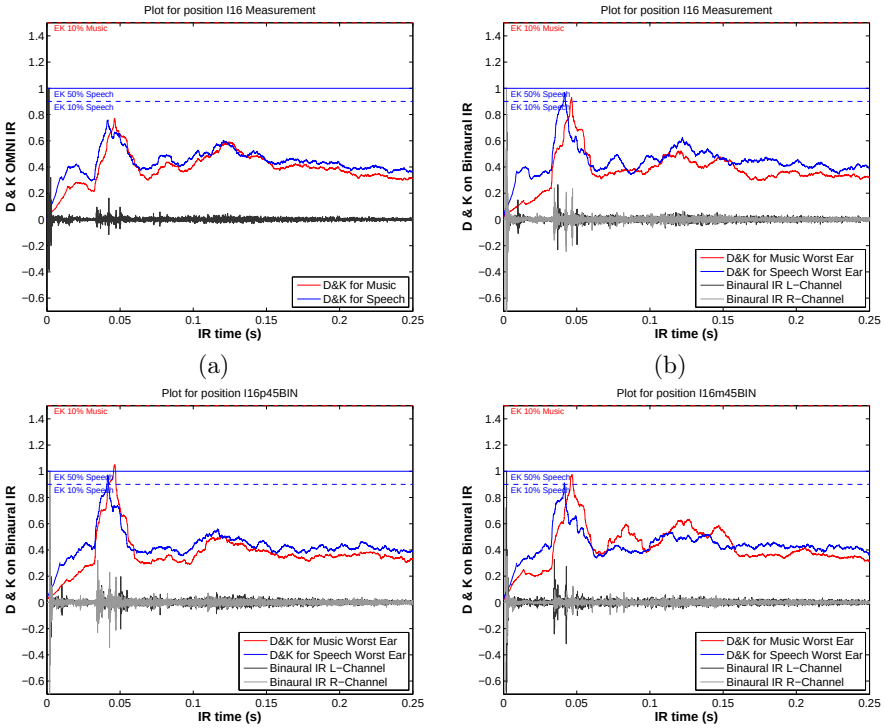
[4] Haas, H. «Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Höramkeit von Sprache.» Acoustica,τόμος 1, (1950)

[5] Niese, H. «Vorslag für Definition und Messung der Deutlichkeit nach objektiven Grundlagen.» Z. Hochfrequenztechnik Elektroak.,τόμος 65, (1965)

[6] Schmidt, W., H. «Rechnergestützte Auswertung von Impulsschalltestmessungen.» Techische Universität Dresden, Forschungsbericht,τόμος 6/77, (1977)

[7] Yamamoto, T. «The Predictible limit of the echo due to multiplex reflections. » J. Acoust. Soc. Jap.,τόμος 27, (1971)

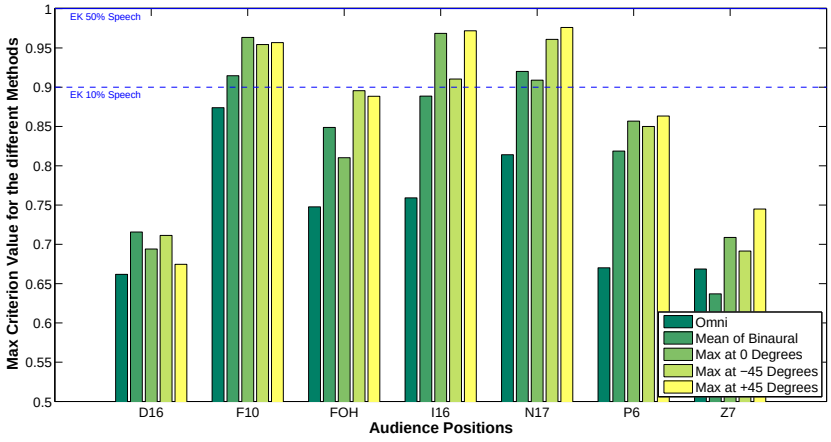
[8] L. Dietsch und W. Kraak «Ein Objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen » Acustica,τόμος 60,



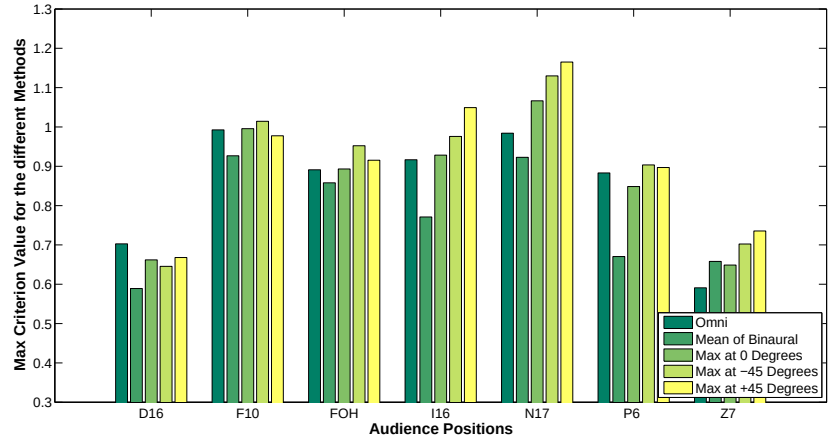
Σχήμα 5.7 *Το Κριτήριο (a) για παντοκατευθυντική μέτρηση κρουστικής απόκρισης,(b) με βάση το χειρότερο αυτί για γωνία* 0^o*, για γωνία (c)* -45^o*, για γωνία (d)* $+45^o$

(1986)

[9] http://www.gras.dk/00012/00330/



(a)



(b)

Σχήμα 6.8 *Οι μέγιστες τιμές του κριτηρίου στις διάφορες θέσεις (a) για ομιλία (b) για μουσική*

Ανάλυση Ηχητικών Σημάτων και Συναρτήσεων Μεταφοράς Χώρων σε Συνθήκες Αντήχησης με Όρους Εντροπίας και Πληροφορίας

Στέλιος Ποτηράκης
Επ. Καθηγητής, Τμ. Ηλεκτρονικής,
ΤΕΙ Πειραιά / Θηβών 250 Αιγάλεω
spoti@teipir.gr

Νικόλας-Αλέξανδρος Τάτλας
Καθ. Εφαρμογών, Τμ. Ηλεκτρονικής,
ΤΕΙ Πειραιά / Θηβών 250 Αιγάλεω
ntatlas@teipir.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τη μελέτη ηχητικών σημάτων και της μεταβολής τους σε συνθήκες αντήχησης με όρους εντροπίας και πληροφορίας. Αρχικά μελετάται το κατά πόσον οι συνθήκες αντήχησης ενός χώρου είναι δυνατό να οδηγήσουν σε μετρήσιμες διαφορές της εντροπίας και του περιεχομένου πληροφορίας τόσο της κρουστικής απόκρισης χώρου, όσο και ηχητικών σημάτων που αναπαράγονται εντός του χώρου. Στη συνέχεια ερευνάται το κατά πόσον θα μπορούσαν να αποτυπωθούν σε μεταβολές εντροπίας / πληροφορίας οι αλλαγές στην απόσταση πηγής-δέκτη εντός χώρου συγκεκριμένης αντηχητικής συμπεριφοράς. Για τη μελέτη αυτή δημιουργήθηκαν μια σειρά από τεχνητές κρουστικές αποκρίσεις χώρων με διαφορετικές διαστάσεις και χρόνους αντήχησης, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και κρουστικές αποκρίσεις πραγματικών χώρων. Η ανάλυση έγινε στο πεδίο των συχνοτήτων, υπολογίζοντας την εκτατική (extensive) εντροπία (Shannon-Boltzmann-Gibbs), τη μη-εκτατική εντροπία (non-extensive) Tsallis και την πληροφορία Fisher των αντίστοιχων φασματικών κατανομών πλάτους.

Analysis of Sound Signals and Room Transfer Functions in Terms of Entropy and Information

ABSTRACT

The present work deals with the study of audio signals and their variation under reverberant conditions in terms of entropy and information. First, it is examined whether the reverberation conditions of a room is possible to lead to measurable changes of the entropy and the information content of the room impulse response, as well as of the audio signals reproduced within the room. Then, it is investigated whether the changes of the source-receiver distance is possible to be traceable by corresponding changes of the entropy / information content for a room of specific reverberation characteristics. A number of artificial room impulse responses, of different dimensions and reverberation times, were developed, while impulse responses of real rooms were also used. The analysis was performed in the frequency domain, calculating the extensive (Shannon-Boltzmann-Gibbs) entropy, the nonextensive (Tsallis) entropy, as well as Fisher information of the corresponding spectral magnitude distributions.

Εισαγωγή

Η μελέτη στατιστικών χαρακτηριστικών των συναρτήσεων μεταφοράς χώρων έχει εισαχθεί από το 1954 [1] και εξελισσόμενη αποτελεί σήμερα τυποποιημένη διαδικασία για την ανάλυση και την απλοποίηση των κρουστικών αποκρίσεων. Τα στατιστικά αυτά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά εφαρμογών, όπως για την αυτοματοποιημένη εξαγωγή ακουστικών παραμέτρων, για το σχεδιασμό αντιστρόφων φίλτρων και τη μείωση αντήχησης, τη μοντελοποίηση και προσομοίωση ακουστικής χώρων κ.α.

Πρόσφατα οι τεχνικές αυτές έχουν επεκταθεί με τη χρήση στατιστικών μέτρων όπως η κύρτωση, η συμμετρία, η μέση τιμή και η απόκλιση με στόχο την διάκριση ακουστικών παραμέτρων αλλά και συνθηκών ηχογράφησης (π.χ., [2,3]). Στην παρούσα εργασία η μελέτη αυτή επεκτείνεται με τη χρήση μέτρων εντροπίας και πληροφορίας, και συγκεκριμένα με την χρήση της εντροπίας Shannon, της εντροπίας Tsallis και της πληροφορία Fisher.

Στην εργασία ακολουθείται η παρακάτω δομή: Στην Ενότητα 1 παρουσιάζονται τα μέτρα εντροπίας και πληροφορίας που εισάγονται. Στη δεύτερη Ενότητα παρατίθεται η μεθοδολογία ανάλυσης των κρουστικών αποκρίσεων και σημάτων φωνής, ενώ στην τρίτη Ενότητα αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, για διαφορετικούς χώρους και μεταβλητές αποστάσεις πηγής-δέκτη. Στην τελευταία Ενότητα συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

1. Μέτρα εντροπίας και πληροφορίας

Στην ενότητα αυτή παρέχονται βασικές γνώσεις υπόβαθρου και κάποιες μαθηματικές σχέσεις που αφορούν την κλασσική εκτατική (extensive) εντροπία, γνωστή ως εντροπία Shannon(ή Shannon-Boltzmann-Gibbs), τη μη-εκτατική (non-extensive) εντροπία Tsallis και την πληροφορία Fisher.

1.1 Εντροπία Shannon

Η εντροπία Shannon εισήχθηκε σε μια προσπάθεια να θεμελιωθεί μια μαθηματική θεωρία των τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μετάδοσης της πληροφορίας. Ο ίδιος ο Shannon τόνισε ότι «η σημαντική διάσταση του θέματος είναι ότι το μήνυμα κάθε φορά είναι ένα επιλεγμένο από ένα σύνολο πιθανών μηνυμάτων» [4], στρέφοντας την προσοχή προς τη μελέτη της κατανομής πιθανότητας που σχετίζεται με μια πηγή συμβόλων. Έστω ένα σύνολο από n πιθανά γεγονότα των οποίων οι πιθανότητες εμφάνισης είναι p_i, $(i = 1,2,...,n)$. Το πληροφοριακό περιεχόμενο της συγκεκριμένης κανονικοποιημένης κατανομής πιθανότητας δίνεται από το πληροφοριακό μέτρο Shannon ως [4]:

$$H_{sh} = -K\sum_{i=1}^{n} p_i \log\left(p_i\right), \tag{1.1}$$

όπου K, είναι μια θετική σταθερή (η οποία ανάγεται μόνο σε μια επιλογή μονάδας μέτρησης, παρόλο που συνήθως τίθεται ίση με 1). Η H_{sh} προωθήθηκε από τον

Shannon ως μέτρο πληροφορίας, επιλογής και αβεβαιότητας και αναγνωρίζεται ως μια μορφή εντροπίας.

Η αύξηση του πληροφοριακού περιεχομένου (της τάξεως, της οργάνωσης) αντιστοιχεί σε μείωση της εντροπίας Shannon. Η εντροπία Shannon θεωρείται βασικό εργαλείο για την περιγραφή της πληροφοριακής συμπεριφοράς και της πολυπλοκότητας σε φυσικά, οικονομικά, βιολογικά, τηλεπικοινωνιακά κ.α. συστήματα.

1.2 Πληροφορία Fisher

Η πληροφορία Fisher παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για τη διερεύνηση πολύπλοκων και μη-στάσιμων σημάτων [5-8, και οι εκεί αναφορές]. Έχει χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο του βαθμού αταξίας ενός συστήματος ή φαινομένου. Συμπεριφέρεται αντίστροφα από την εντροπία, δηλαδή, αυξημένη τάξη χαρακτηρίζεται από μειωμένη εντροπία και αντιστρόφως από αυξημένη πληροφορία Fisher. Έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διάφορων φυσικών και όχι μόνο διεργασιών, αποκαλύπτοντας την ικανότητά της να περιγράψει την πολυπλοκότητα του συστήματος, π.χ., [9,10], ενώ προτείνεται η χρήση της για τον εντοπισμό αξιόπιστων πρόδρομων σημάτων κρίσιμων γεγονότων [6-8, και οι εκεί αναφορές].

Στην περίπτωση μιας διακριτά μετρημένης μεταβλητής $s_k = s(t_k)$, όπου $t_k = kT$, $k = 1,2,...,K$, και T η περίοδος δειγματοληψίας, είναι δυνατό να οριστεί ένα σύνολο από N ασύνδετα, αλλά διπλανά (bins) που να καλύπτουν όλο το φάσμα των τιμών που παρατηρήθηκαν μεταξύ των ελάχιστων και μέγιστων τιμών της χρονοσειράς $\{s_k\}$, συμβολιζόμενα ως $\{x_n\}$, $n = 1,2,...,N$. Η αντίστοιχη πιθανότητα ένα δείγμα της χρονοσειράς να ανήκει στο $n-$στό διάστημα μπορεί να συμβολιστεί ως $p(x_n)$. Τότε, η πληροφορία Fisher στη διακριτή της μορφή μπορεί να εκφραστεί [5] ως:

$$I_x = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\left[p(x_{n+1}) - p(x_n)\right]^2}{p(x_n)}. \tag{1.2}$$

Η διακριτή κατανομή πιθανότητας $p(x_n)$ αντιστοιχεί στις συγκεκριμένες τιμές της άγνωστης υποκείμενης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας στις κεντρικές τιμές των διαστημάτων $\{x_n\}$, τα οποία δεν είναι απαραίτητα ίσου μήκους.

1.3 Εντροπία Tsallis

Ενδιαφέρουσες συμπεριφορές είναι δυνατό να δημιουργηθούν από μεγάλου βεληνεκούς χωρικές αλληλεπιδράσεις ή μεγάλου βεληνεκούς φαινόμενα μνήμης. Ανάμεσά τους μια από τις πιο ενδιαφέρουσες αναδύεται από συστήματα που είναι μη-εκτατικά (μη-προσθετικά). Τα συστήματα αυτά μοιράζονται μια πολύ διακριτική ιδιότητα: παραβιάζουν τη στατιστική Boltzmann-Gibbs (B-G), τη γέφυρα προς τη θερμοδυναμική ισορροπία. Εμπνευσμένος από πολυμορφοκλασματικες (multifractals) έννοιες ο Tsallis [11-14] πρότεινε μια γενίκευση της στατιστικής μηχανικής B-G. Εισήγαγε μια εντροπική έκφραση που χαρακτηρίζεται από ένα δείκτη q ο οποίος οδηγεί σε μια μη-εκτατική στατιστική,

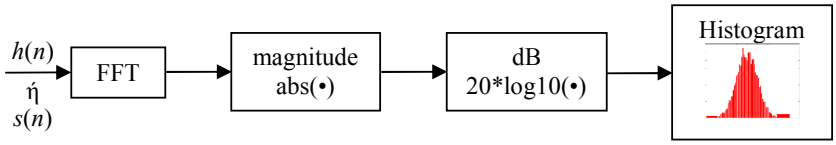
$$S_q = k\frac{1}{q-1}\left(1-\sum_{i=1}^{w} p_i^q\right), \tag{1.3}$$

όπου p_i είναι οι πιθανότητες που συσχετίζονται με τις μικροσκοπικές διατάξεις, w είναι ο συνολικός τους αριθμός, q είναι ένας πραγματικός αριθμός, και k είναι η σταθερή Boltzmann. Η τιμή του q είναι ένα μέτρο της μη-εκτατικότητας του συστήματος. Σημειώνεται ότι το $q=1$ αντιστοιχεί στην κλασσική εκτατική στατιστική B-G.

Χαμηλότερες τιμές S_q χαρακτηρίζουν σήματα με χαμηλότερη πολυπλοκότητα (δηλαδή, μεγαλύτερη οργάνωση, μεγαλύτερη πληροφορία).

2. Στατιστική συναρτήσεων μεταφοράς χώρων και ηχητικών σημάτων

Προκειμένου να αναλυθεί μια συνάρτηση μεταφοράς χώρου και να μελετηθούν ηχητικά σήματα σε συνθήκες αντήχησης με όρους εντροπίας και πληροφορίας είναι απαραίτητο να ληφθεί δείγμα της στατιστικής τους. Η στατιστική και στις δυο περιπτώσεις αφορούσε τις κατανομές των τιμών του μέτρου στο πεδίο της συχνότητας σε dB, αφού πρώτα η κρουστική απόκριση $h(n)$ ή το σήμα $s(n)$, αντίστοιχα, περνούσε την επεξεργασία που περιγράφει το Σχήμα 2.1, ακολουθώντας τη μέθοδο που περιγράφεται στην [2]. Σημειώνεται ότι ως σήμα χρησιμοποιήθηκε πρότυπη ανηχωική φωνή [15] όπως αυτή αναπαράγεται σε καθέναν από τους μελετώμενους χώρους και αποστάσεις πηγής-δέκτη, εκτελώντας την πράξη της συνέλιξης μεταξύ του σήματος πρότυπης ανηχωικής φωνής και της κρουστικής απόκρισης καθενός από τους συγκεκριμένους χώρους.

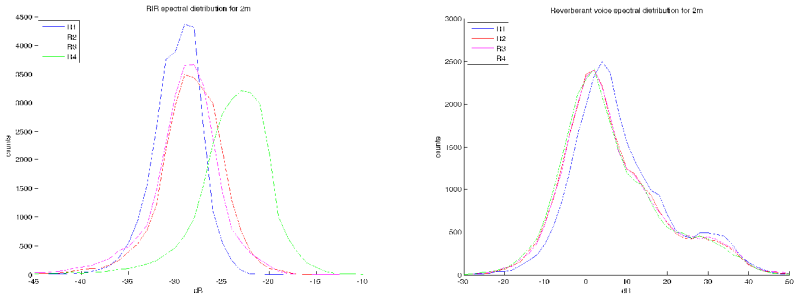


Σχήμα 2.1 Επεξεργασία της κρουστικής απόκρισης ή του σήματος για την εξαγωγή της στατιστικής τους στο πεδίο της συχνότητας.

3. Ανάλυση αποτελεσμάτων

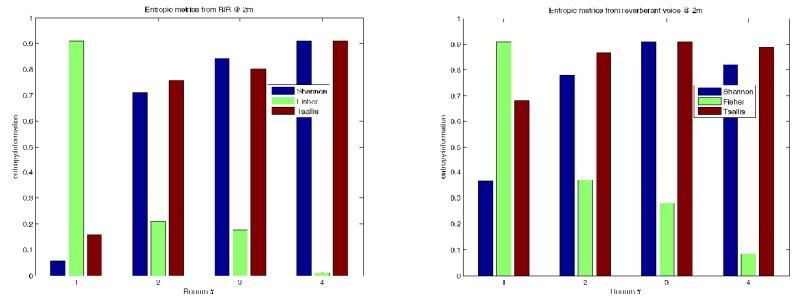
Αρχικά, διερευνήθηκε η δυνατότητα αποτύπωσης των συνθηκών αντήχησης ενός χώρου σε μετρήσιμες διαφορές της εντροπίας και του περιεχομένου πληροφορίας, τόσο της κρουστικής απόκρισης χώρου, όσο και ηχητικών σημάτων που αναπαράγονται εντός του χώρου. Για το σκοπό αυτό αναλύθηκαν οι μετρήσεις κρουστικής απόκρισης χώρου από τρείς αίθουσες διαφορετικών διαστάσεων και ακουστικών χαρακτηριστικών (R1, R2, R3 και R4) για σταθερή απόσταση πηγής-δεκτη στα 2m. Η στατιστική των αιθουσών αυτών αποτυπώνεται στα Σχήματα 3.1.α 3.1.β, μετά από την ανάλυση της συνάρτησης μεταφοράς των χώρων και του

φασματικού περιεχομένου πρότυπης φωνής όπως αναπαράγεται εντός τους, αντίστοιχα.



(α) (β)

Σχήμα 3.2 Κατανομές των τιμών (α) του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς και (β) του φασματικού περιεχομένου φωνής για τέσσερεις αίθουσες διαφορετικών διαστάσεων και ακουστικών χαρακτηριστικών.



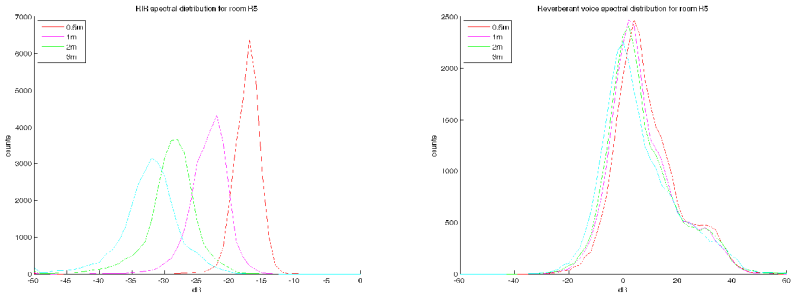
(α) (β)

Σχήμα 3.2 Κανονικοποιημένες τιμές των μέτρων εντροπίας και πληροφορίας (α) για τις συναρτήσεις μεταφοράς των χώρων και (β) για το φασματικό περιεχόμενο αντηχητικής φωνής, όπως αναπαράγεται στους χώρους των οποίων η στατιστική περιγράφεται από το Σχήμα 3. 1.

Οι κανονικοποιημένες τιμές των μέτρων πολυπλοκότητας που μελετούμε, όπως αυτά εφαρμοστήκαν στις συναρτήσεις μεταφοράς των χώρων, δείχνουν ότι τα μέτρα αυτά είναι σε θέση να ξεχωρίσουν επιτυχώς τα διαφορετικά ακουστικά χαρακτηριστικά των αιθουσών, ενώ διατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις η αναμενόμενη αντίστροφη συμπεριφορά εντροπίας-πληροφορίας (εκεί που αυξάνεται σχετικά η πληροφορία Fisher, παρατηρείται σχετική μείωση των εντροπιών Shannon και Tsallis), όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 3.2. Αντιθέτως, η ανάλυση της πρότυπης φωνής όπως αναπαράγεται σε καθέναν από τους συγκεκριμένους χώρους, στην περίπτωση του χώρου R4 φάνηκε να μην ακολουθεί τη συγκεκριμένη αντίστροφη συμπεριφορά (ενώ η πληροφορία Fisher του χώρου R4 μειώνεται σε

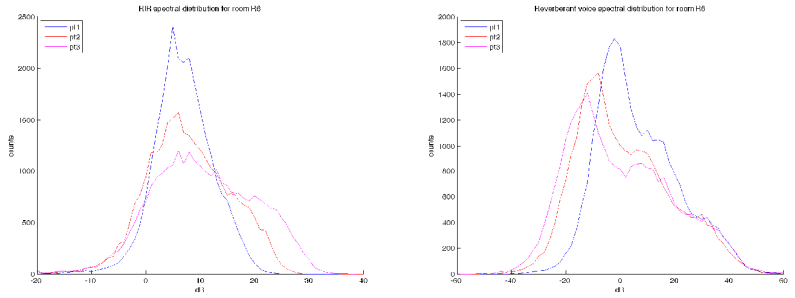
σχέση με το χώρο R3, οι εντροπίες Shannon και Tsallis αυξάνονται), θέτοντας ένα πρώτο προβληματισμό ως προς την αξιοποιησιμότητα της φωνής ως σήμα ανίχνευσης διαφορών στην ακουστική αιθουσών με χρήση των μελετώμενων μέτρων πολυπλοκότητας.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε το κατά πόσον θα μπορούσαν να αποτυπωθούν σε μεταβολές εντροπίας / πληροφορίας οι αλλαγές στην απόσταση πηγής-δέκτη εντός χώρου συγκεκριμένης αντηχητικής συμπεριφοράς. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν δυο αίθουσες R5 και R6, των οποίων τα στατιστικά χαρακτηριστικά για τις διαφορετικές αποστάσεις πηγής-δέκτη φαίνονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4, αντίστοιχα.



(α) *(β)*

Σχήμα 3.3 Κατανομές των τιμών (α) του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς και (β) του φασματικού περιεχομένου φωνής για τέσσερεις αποστάσεις πηγής-δέκτη εντός του χώρου R5.

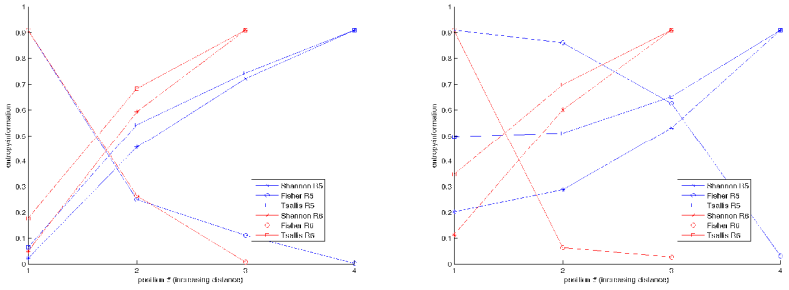


(α) (β)

Σχήμα 3.4 Κατανομές των τιμών (α) του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς και (β) του φασματικού περιεχομένου φωνής για τέσσερεις αποστάσεις πηγής-δέκτη εντός του χώρου R6.

Η ανάλυση απέδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.5, απ' όπου είναι φανερό ότι, γενικά, όσο αυξάνεται η απόσταση πηγής-δέκτη και συνεπώς το αντηχητικό πεδίο επηρεάζει περισσότερο την ακουστική η εντροπία αυξάνεται, ενώ η πληροφορία μειώνεται, σηματοδοτώντας αύξηση της πολυπλοκότητας, όπως είναι

αναμενόμενο, μιας και η τυχαιότητα αυξάνει καθώς η επίδραση του απ' ευθείας πεδίου υποβαθμίζεται. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι παρ' ότι στην περίπτωση της ανάλυσης της κρουστικής απόκρισης φαίνεται να υπάρχει μια αρκετά συνεπής συμπεριφορά των μέτρων πολυπλοκότητας, ασθενώς εξαρτώμενη από το είδος του χώρου, στην περίπτωση της ανάλυσης των σημάτων αντηχητικής φωνής παρατηρούμε μεγαλύτερη εξάρτηση από το χώρο, με μεγαλύτερη απόκλιση στην περίπτωση της πληροφορίας Fisher. Αυτό ίσως είναι ακόμη μια ένδειξη για την αμφισβήτηση της αξιοποιησιμότητας της φωνής ως σήμα ανίχνευσης της απόστασης πηγής-δέκτη με χρήση των μελετώμενων μέτρων πολυπλοκότητας.



(α) (β)

Σχήμα 3.5 Κανονικοποιημένες τιμές των μέτρων πολυπλοκότητας όπως υπολογίστηκαν για τις διαφορετικές αποστάσεις πηγής-δέκτη εντός των χώρων R5 και R6 (α) μετά από επεξεργασία των αντίστοιχων κρουστικών αποκρίσεων και (β) μετά από επεξεργασία των αντίστοιχων σημάτων αντηχητικής φωνής.

Συμπεράσματα

Κατ' αρχήν φαίνεται τα μέτρα πολυπλοκότητας που βασίζονται στη μέτρηση της εντροπίας και πληροφορίας να καταφέρνουν ικανοποιητικά να διακρίνουν αίθουσες διαφορετικών χαρακτηριστικών αντήχησης, καθώς και την αλλαγή της απόστασης πηγής-δέκτη εντός μιας αίθουσας. Ειδικά όταν το σήμα που αναλύεται είναι η κρουστική απόκριση χώρου τα αποτελέσματα εμφανίζουν απόλυτη συνέπεια και συμβαδίζουν με τη φυσικά αναμενόμενη εικόνα. Στην περίπτωση της ανάλυσης αντηχητικού σήματος φωνής εντοπίζονται κάποιες ενδείξεις ότι η χρήση του ίσως να οδηγεί σε προβλήματα. Η αιτιολόγηση όμως δεν μπορεί να ειναι μονοσήμαντη, δεδομένου ότι τα ηχητικά σήματα αποτελούν προϊον συνέλιξης και όχι πραγματικής εγγραφής στους υπό μελέτη χώρους. Προς την κατεύθυνση αυτή θα πρέπει πέρα από την χρήση ηχογραφημένων σημάτων στο μέλλον να δοκιμαστούν και άλλα ηχητικά σήματα (διαφορετικά είδη μουσικής, διαφορετικά είδη μουσικών οργάνων, κ.α.) για την αξιοποιησιμότητά τους ως σήματα ανίχνευσης της ακουστικής μιας αίθουσας ή/και της απόστασης πηγής-δέκτη με όρους εντροπίας και πληροφορίας.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς επιθυμούν να εκφράσουν τις ευχαριστίες τους προς την κα Ελευθερία Γεωργαντή υπ. Δρ. Ηλ. Μηχ, τον κ. Ηλία Κοκκίνη Δρ. Ηλ.Μηχ και τον κ. Αλέξανδρο Τσιλφίδη, Δρ. Ηλ. Μηχ για την παραχώρηση μέρους των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν και τις εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαν μαζί τους σχετικά με το θέμα της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

[1] M. Schroeder "Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms" J. Aud. Eng. Soc. **35**(5), pp. 299–306 (1954, 1987 – eng. translation).

[2] E. Georganti, T. Zarouchas, and J. Mourjopoulos "Reverberation Analysis via Response and Signal Statistics", in *Proceedings of the 128th AES Convention*, London, UK, Paper No:8034 (2010).

[3] E. K. Kokkinis, A. Tsilfidis, E. Georganti and J. Mourjopoulos "Joint noise and reverberation suppression for speech applications" *Proceedings of the 130th AES Convention*, London, UK (2011).

[4] C. E. Shannon "A Mathematical theory of communication" Bell System Technical J. **27**, pp 379-423, pp 623-656 (1948).

[5] M. T. Martin, F. Pennini, A. Plastino "Fisher's information and the analysis of complex signals" Phys. Lett. A **256**, pp 173-180 (1999).

[6] S. M. Potirakis, G. Minadakis, C. Nomicos, and K. Eftaxias "A multidisciplinary analysis for traces of the last state of earthquake generation in preseismic electromagnetic emissions" Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **11**, pp 2859–2879 (2011)

[7] S.M. Potirakis, G. Minadakis, and K. Eftaxias "Analysis of electromagnetic pre-seismic emissions using Fisher information and Tsallis entropy" Physica A **391**, 300-306 (2012).

[8] S.M. Potirakis, G. Minadakis, K. Eftaxias "Relation between seismicity and pre-earthquake electromagnetic emissions in terms of energy, information and entropy content", Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **12**, pp 1179–1183 (2012).

[9] M. Balasco, V. Lapenna, M. Lovallo, G. Romano, A. Siniscalchi, and L Telesca "Fisher information measure analysis of Earth's apparent resistivity" Int. J. Nonlinear Sci. **5**, pp 230–236 (2008).

[10] L. Telesca, M. Lovallo, and R. Carniel "Time-dependent Fisher Information Measure of volcanic tremor before the 5 April 2003 paroxysm at Stromboli volcano" J. Volcan. Geoth. Res. **195**, pp 78–82 (2010).

[11] C. Tsallis "Possible generalization of Boltzmann_Gibbs statistics" J. Stat. Phys. **52**, pp 479-487 (1988).

[12] C. Tsallis "Generalized entropy-based criterion for consistent testing" Phys. Rev. E **58**, pp 1442-1445 (1998).

[13] C. Tsallis *Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics: Approaching a Complex Word,* Springer, New York (2009).

[14] S. Abe, and Y. Okamoto (Eds.) *Nonextensive Statistical Mechanics and its Applications,* Springer-Verlag, Heidelberg (2001).

[15] ITU-T-REC-P.501 "Test signals for use in telephonometry", Geneva: International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (2009).

Τεχνικές Ταξινόμησης Ηχητικών Συμβάντων σε Ραδιοφωνικές Μεταδόσεις και η Αξιοποίηση της Στερεοφωνικής Πληροφορίας

Ρ. Γ. Κωτσάκης
Υποψ. Διδάκτορας
rkotsakis@gmail.com

Γ. Μ. Καλλίρης
Επίκουρος Καθηγητής
gkal@jour.auth.gr

Χ. Α. Δημούλας
Λέκτορας
babis@eng.auth.gr

Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε.
Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε.
Αριστοτέλειο Πανεπ. Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις πιο σημαντικές ιδιαιτερότητες του ηχητικού σήματος είναι η ενδεχόμενη χρήση δυο καναλιών (stereo) κατά τη ραδιοφωνική μετάδοσή του, προσφέροντας νέες προοπτικές στην σημασιολογική ανάλυση και κατηγοριοποίησή του. Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται να υλοποιηθεί ένα μοντέλο κατηγοριοποίησης που θα εφαρμόζει τεχνικές κατάτμησης και διαχωρισμού του σήματος που προκύπτει κατά την αφαίρεση των σημάτων των δυο καναλιών, ώστε να εξορυχθούν και να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά του διαφορικού σήματος. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύγκριση με μοντέλα που αξιοποιούν τη διαφορά των χαρακτηριστικών από κάθε κανάλι χωριστά ή αποκλειστικά το μονοφωνικό σήμα ραδιοφωνικών εκπομπών, ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή της στερεοφωνικής ιδιότητας του ήχου στην σημασιολογική ανάλυση ηχητικών δεδομένων.

Classification Techniques of Audio Events in Radio Productions and the Exploitation of Audio Properties

ABSTRACT

One of the most important properties of audio signal is the utilization of two channels (stereo), during the radio transmission, leading to new perspectives in audio semantic analysis and classification. The current work is focused on the development of a classification model, involving segmentation techniques in the differential signal between the two channels, in order to extract and evaluate the respective features. Finally, an overall comparison is conducted between the performance of the implemented model and those that use the features' differences of each channel or the monophonic signal of radio productions, in order to conclude in useful results for the stereo contribution, while conducting audio semantic analysis.

Εισαγωγή

Η ταχύτατη ανάπτυξη τεχνολογιών διαδικτύου και επεξεργασίας πολυμέσων επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη ανταλλαγή ψηφιακού υλικού μεταξύ των χρηστών. Οι διαφοροποιήσεις στις απαιτήσεις και ενδιαφέροντα των χρηστών οδηγούν στην ανάγκη εκμετάλλευσης ετερογενών και πολυτροπικών πηγών περιεχομένου, οπότε καθίσταται απαραίτητη η ανεύρεση κατάλληλων μηχανισμών περιγραφής και σημασιολογικής ανάλυσης πολυμεσικού υλικού [1]. Επιπροσθέτως, στις αναπτυσσόμενες εφαρμογές και υπηρεσίες πολυμέσων συνήθως εμπλέκονται εκτεταμένες βάσεις δεδομένων, στις οποίες οι χρήστες μπορούν να αναζητήσουν το οπτικοακουστικό περιεχόμενο που επιθυμούν. Κατά συνέπεια, αναγκαία θεωρείται η χρήση και ενσωμάτωση αποδοτικών τεχνικών περιγραφής και επισημείωσης δεδομένων, για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών αναζήτησης και ανάκτησης περιεχομένου [2],[3].

Πιο συγκεκριμένα στο πεδίο του ήχου, οι τεχνικές σημασιολογικής ανάλυσης και κατηγοριοποίησης ηχητικού υλικού συνήθως περιλαμβάνουν διαδικασίες αναγνώρισης ήχου και μουσικής [4]-[5], [12], επεξεργασίας και κατηγοριοποίησης φωνημάτων [9]-[11], διάκρισης ομιλίας και ομιλητών [6]-[8]. Στην κατεύθυνση αυτή, για την επίτευξη αναγνώρισης προτύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στατιστικά και πιθανοτικά μοντέλα όπως αλυσίδες Markov, μοντέλα Gaussian Mixture, μοντέλα αποθορυβοποίησης με χρήση μετασχηματισμών Fourier, εκπαίδευση μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων ή και άλλοι αλγόριθμοι καθοδηγούμενης εκμάθησης [6], [13], [17]. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης και εξόρυξης γνώσης εφαρμόζονται σε σύνολα χαρακτηριστικών/ιδιοτήτων του ήχου, που εξάγονται από το σήμα, ενώ παράλληλα απαραίτητη καθίσταται η αναζήτηση των πλέον αποδοτικών, για την κατηγοριοποίηση, χαρακτηριστικών [7], [16]. Ειδικότερα, στις τεχνικές διάκρισης ομιλίας και ομιλητών, ένα από τα πιο κύρια εξαγόμενα χαρακτηριστικά είναι οι συντελεστές MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients) [14], ενώ ταυτόχρονα σημαντικές καθίστανται οι παραλλαγές σε ήδη υπάρχοντα χαρακτηριστικά ή και η αναζήτηση νέων, με ενδεχόμενη μεγαλύτερη απόδοση στην διαδικασία της κατηγοριοποίησης [15]. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην σημασιολογική ανάλυση ηχητικής πληροφορίας από ραδιοφωνικές μεταδόσεις με τη χρήση ποικίλων χαρακτηριστικών, αναζητώντας παράλληλα τη συμβολή της στερεοφωνίας στην διαδικασία της κατηγοριοποίησης, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ερευνητική συνέχεια σε προηγούμενες εργασίες.

1. Προηγούμενη Έρευνα – Ορισμός Προβλήματος

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη έρευνα με σκοπό την ανάλυση και περιγραφή ηχητικού περιεχομένου από ραδιοφωνικές εκπομπές, με σκοπό την διάκριση ομιλίας-μουσικής και την αναγνώριση φωνής διαφορετικών ομιλητών με τη χρήση ποικίλων ιεραρχικών και υβριδικών-συνδυαστικών σχημάτων ταξινόμησης. Η διαδικασία υλοποίησης περιελάμβανε αρχικά την κατάτμηση του ήχου της ραδιοφωνικής εκπομπής σε κατάλληλα χρονικά παράθυρα, την μετέπειτα αντίστοιχη επισημείωση των δεδομένων (ground truth labeling) και την αντίστοιχη εξόρυξη χαρακτηριστικών από αυτά. Στο τελικό βήμα της κατηγοριοποίησης των σημάτων χρησιμοποιήθηκαν ποικίλοι αλγόριθμοι εκμάθησης από το πεδίο της

στατιστικής (λογιστική, γραμμική παλινδρόμηση), δενδροειδείς αλγόριθμοι (J48, δένδρα αποφάσεων), ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία επέφεραν υψηλά ποσοστά διαχωρισμού των σημάτων και στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσίασαν και την καλύτερη απόδοση κατηγοριοποίησης, σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους. Για το λόγο αυτό στις μετέπειτα εργασίες και έρευνες, όπως και στην παρούσα, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τεχνικές ανάπτυξης νευρωνικών δικτύων στην διαδικασία της κατηγοριοποίησης [6].

Αναζητώντας ένα κατάλληλο διάνυσμα που θα περιλαμβάνει τα πλέον αποδοτικά, για την κατηγοριοποίηση, χαρακτηριστικά που θα πρέπει να εξαχθούν από τα ηχητικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη αξιολόγηση με σκοπό την κατάταξη τους. Συγκεκριμένα, από την κατάτμηση διαφορετικών ραδιοφωνικών εκπομπών δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων, από την οποία εξήχθηκε ένας διευρυμένος αριθμός χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων, τα χαρακτηριστικά αξιολογήθηκαν και κατατάχθηκαν σε αντίστοιχες σειρές, ώστε να εξευρεθούν τα πλέον αποδοτικά. Η κατάταξη αυτή επιβεβαιώθηκε και με αντίστοιχα πειράματα διαχωρισμού σημάτων ομιλίας και μουσικής, με την ανάπτυξη τεχνητών νευρωνικών δικτύων, που ως μεταβλητές εισόδου περιελάμβαναν μόνο τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά στην διαδικασία εξόρυξης, επιφέροντας εξίσου υψηλά ποσοστά κατηγοριοποίησης [7].

Μια από τις πιο σημαντικές ιδιαιτερότητες του ηχητικού σήματος είναι η ενδεχόμενη χρήση δυο καναλιών (stereo) κατά τη μετάδοσή του, προσφέροντας νέες προοπτικές στην σημασιολογική ανάλυση και κατηγοριοποίησή του. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκαν οι διαδικασίες κατάτμησης, επισημείωσης και εξόρυξης δεδομένων σε κάθε κανάλι χωριστά και στη συνέχεια με καθοδηγούμενη εκμάθηση αναπτύχθηκαν νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας μόνο τις διαφορές των τιμών των χαρακτηριστικών των δυο καναλιών [8]. Στα αποτελέσματα που σημειώθηκαν, αξίζει να αναφερθεί πως κατά την διάκριση ομιλίας/μουσικής οι αποδόσεις των νευρωνικών δικτύων ήταν υψηλές. Στην μετέπειτα, όμως, ιεραρχική διάκριση των σημάτων ομιλίας, για την αναγνώριση των κυρίων ομιλητών, η κατηγοριοποίηση σημείωσε χαμηλές αποδόσεις, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην μερική «στερεοφωνική αποκοπή» των σημάτων ομιλίας μεταξύ των καναλιών [8].

Στα πλαίσια περαιτέρω έρευνας, στην παρούσα εργασία, επιχειρείται να υλοποιηθεί ένα μοντέλο κατηγοριοποίησης που θα εφαρμόζει τις παραπάνω τεχνικές κατάτμησης και διαχωρισμού στο σήμα που προκύπτει κατά την αφαίρεση των σημάτων των δυο καναλιών. Κατά συνέπεια, θα εξαχθούν και θα αξιολογηθούν εκ νέου τα χαρακτηριστικά από το διαφορικό πλέον σήμα. Τέλος, πραγματοποιείται και μια συνολική σύγκριση με τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών, ώστε να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή της στερεοφωνικής ιδιότητας του ήχου στην σημασιολογική ανάλυση ηχητικών δεδομένων.

2. Υλοποίηση – Εξαγωγή Χαρακτηριστικών

Τα ηχητικά δεδομένα για την διεξαγόμενη έρευνα προέρχονται από στερεοφωνικές ραδιοφωνικές μεταδόσεις, που ηχογραφήθηκαν σε αρχεία παλμοκωδικής διαμόρφωσης wav (PCM wav, 16bit, 44.100 Hz). Οι ραδιοφωνικές εκπομπές περιλαμβάνουν δυο ή περισσότερους κύριους ομιλητές, που διακόπτονται από μουσικές παρεμβολές με διαδικασίες fade in/fade out, ενώ παράλληλα

συνυπάρχει και θόρυβος με το σήμα ομιλίας. Τέλος, όπως συμβαίνει στις περισσότερες ραδιοφωνικές εκπομπές, διαδραματίζονται διάλογοι μέσω τηλεφώνου, γεγονός που συνιστά μια επιπλέον κλάση στην διαδικασία της κατηγοριοποίησης. Στο στάδιο της προεπεξεργασίας, το ηχητικό σήμα διαχωρίζεται στα δυο επιμέρους ηχητικά σήματα, που αντιστοιχούν στα δυο κανάλια της στερεοφωνίας και στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab υπολογίζεται το διαφορικό σήμα, με την αλγεβρική διαφορά μεταξύ αριστερού και δεξιού καναλιού μετάδοσης.

Στο επόμενο στάδιο, το διαφορικό πλέον σήμα κατατμήθηκε σε μικρότερα αρχεία σταθερής χρονικής διάρκειας μέσω προγραμματισμού σε γλώσσα Python [18]. Με βάση αποτελέσματα παλαιοτέρων ερευνών [6]-[8], επιλέχθηκε ως χρόνος κατάτμησης το χρονικό παράθυρο διάρκειας 1 sec, που σημείωσε ικανοποιητικές αποδόσεις στη διαδικασία διαχωρισμού ομιλίας και ομιλητών. Έπειτα, για τα 5775 ηχητικά τμήματα-«παράθυρα» που προέκυψαν, ακολούθησε η διαδικασία επισημείωσης (Πίνακας 2.1) με τους ακόλουθους συμβολισμούς [7]-[8] των αντίστοιχων κλάσεων:

- M, P, V για σήμα μουσικής, τηλεφωνικής συνομιλίας, ομιλίας αντίστοιχα
  - V1, V2, V3 για το σήμα ομιλίας κάθε κύριου ομιλητή
  - V12, V23, V13 για το σήμα ομιλίας με επικάλυψη των αντίστοιχων ομιλητών
- R για το σήμα που εναπομένει (παύσεις, θόρυβος, κτλ)

Πίνακας 2.1 Κατανομή Δειγμάτων σε Κλάσεις

M	P	R	V	V1	V2	V3	V12	V23	V13	Άθρ.
564	667	55	4489	2611	1043	679	92	16	48	5775

Για κάθε στοιχειώδες δείγμα ηχητικού σήματος εξήχθησαν οι τιμές 90 ηχητικών χαρακτηριστικών από το πεδίο του χρόνου (εντροπία, σηματοθορυβική σχέση, ενεργός τιμή, κτλ) από το πεδίο της συχνότητας (μέσος όρος, διασπορά, κύρτωση, εύρος φάσματος, κτλ) καθώς και χαρακτηριστικά από τη θεωρία κυματιδιών (ενέργεια, διασπορά wavelet coefficients, κτλ) και οι 13 φασματικοί συντελεστές συναρτημένοι στην κλίμακα Mel (MFCCs). Μια αναλυτική περιγραφή των 90 χαρακτηριστικών μπορεί να ανευρεθεί στα [6], [7], [19]-[21].

Για την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά που προέκυψαν στα [7], [8], ακολουθήθηκαν δυο δομές κατηγοριοποίησης και ειδικότερα, ένα αρχικό άμεσο σχήμα διαχωρισμού σημάτων ομιλίας/μουσικής/τηλεφώνου (VMP) και στη συνέχεια ένα δευτερεύον ιεραρχικό μοντέλο διάκρισης της ομιλίας στους αντίστοιχους κύριους ομιλητές (HV). Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, στην διαδικασία κατηγοριοποίησης χρησιμοποιήθηκε εκπαίδευση μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων, καθώς σημείωσαν τις καλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους εξόρυξης γνώσης [6].

3. Αξιολόγηση – Κατάταξη Χαρακτηριστικών

Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών που εξήχθησαν, όσον αφορά τη συμβολή τους στην διαδικασία της κατηγοριοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν δυο

αλγόριθμοι ("InfoGainAttributeEval" and "OneRAttributeEval") με μετρικές από την θεωρία των Πληροφοριών, στο λογισμικό Weka [22]. Μια πιο αναλυτική περιγραφή των αλγορίθμων μπορεί να ανευρεθεί στα [6], [7], [22]. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η κατάταξη των 10 πιο αποδοτικών χαρακτηριστικών τόσο για τη δομή VMP όσο και για την HV, με την χρήση των δυο αλγορίθμων.

Πίνακας 3.1 Κατάταξη Εξαγόμενων Χαρακτηριστικών

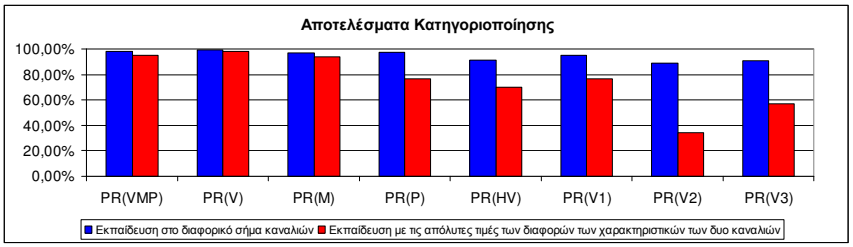
	Δομή VMP		Δομή HV	
	InfoGain.Eval	OneR.Eval	InfoGain.Eval	OneR.Eval
1	Wpav-k=10	Wpav-k=10	Wpav-k=10	Wpav-k=10
2	Wpav-k=9	Wpav-k=9	Wpav-k=9	Wpav-k=9
3	Dfi	Dfi	Dfi	RF
4	DR [dB]	BER_HF	BER_HF	BER_HF
5	BER_HF	BW	DR [dB]	BW
6	BW	RF	BW	DR [dB]
7	E85 [dB]	SPc	E85 [dB]	BER_MF
8	Entropy	DR [dB]	RF	Wpav-k=4
9	Wpav-k=4	Wpav-k=4	Wpav-k=4	Dfi
10	RMSenergy	BER_MF	Entropy	Wpav-k=3

Η πρώτη παρατήρηση που προκύπτει από τον Πίνακα 3.1, αφορά την εμφάνιση των ίδιων περίπου χαρακτηριστικών στις πρώτες θέσεις κατάταξης και για τις δυο δομές κατηγοριοποίησης χρησιμοποιώντας και τους δυο αλγορίθμους, ενώ παράλληλα αρκετά χαρακτηριστικά εμφανίζονται σε διαφορετικές θέσεις στο σύνολο της πρώτης δεκάδας. Αξίζει επίσης να τονιστεί η σχετική υπεροχή των συντελεστών κυματιδίων, καθώς αν πραγματοποιηθεί σύγκριση με τις κατατάξεις στα [7], [8], δεν εμφανίζονται πλέον καθόλου οι συντελεστές MFCCs. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι, στα [7], [8], οι ίδιοι αλγόριθμοι ιεράρχησης χρησιμοποιούν τιμές χαρακτηριστικών που εξήχθησαν είτε από μονοφωνικό σήμα, είτε από στερεοφωνικό σε κάθε κανάλι χωριστά, οπότε είναι αναμενόμενη η εμφάνιση των συντελεστών MFCCs που επηρεάζονται άμεσα από την παρουσία φωνής, ενώ στην παρούσα εργασία βρίσκονται σε πολύ κατώτερες θέσεις, καθώς οι αλγόριθμοι επεξεργάζονται τιμές από το διαφορικό σήμα.

4. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων Ηχητικής Ταξινόμησης

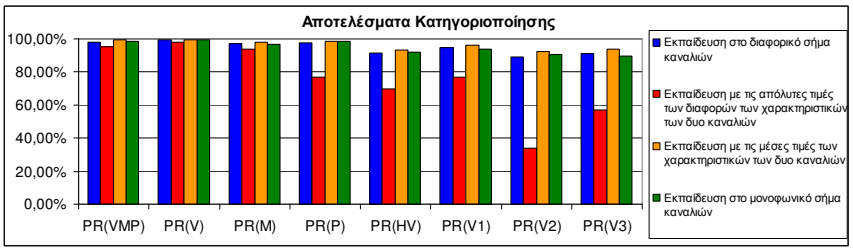
Για να εξεταστεί η συμβολή της στερεοφωνίας στην κατηγοριοποίηση του ραδιοφωνικού σήματος, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές εκπαίδευσης μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων, με δυο κρυφά (σιγμοειδή) επίπεδα και ένα γραμμικό επίπεδο εξόδου. Στην διαδικασία εκπαίδευσης εφαρμόστηκε η τεχνική αναδίπλωσης του συνόλου δειγμάτων εισόδου-ελέγχου (k-fold validation), με αριθμό αναδιπλώσεων

k=10. Η συνολική απόδοση κατηγοριοποίησης PR% για κάθε δομή, προσδιορίστηκε από τις αντίστοιχες μήτρες σύγχυσης, ως η αναλογία του αριθμού δειγμάτων που κατατάχθηκαν σωστά, προς το σύνολο τους, ενώ κατ' αντιστοιχία προσδιορίζεται η απόδοση κάθε κλάσης (PR_x%), [6], [7]. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι αποδόσεις κατηγοριοποίησης για τις δυο δομές χρησιμοποιώντας το διαφορικό σήμα των καναλιών. Παράλληλα, πραγματοποιείται σύγκριση με τις αποδόσεις που έχουν προσδιοριστεί, όταν προηγηθούν οι διαδικασίες κατάτμησης, εξαγωγής χαρακτηριστικών σε κάθε κανάλι χωριστά και στη συνέχεια η εκπαίδευση πραγματοποιείται με τις απόλυτες τιμές των διαφορών [8].



Σχήμα 4.1 Σύγκριση αποδόσεων με τη χρήση του διαφορικού σήματος με τη χρήση των απόλυτων τιμών των διαφορών των χαρακτηριστικών

Καταρχάς, αξίζει να σημειωθούν τα υψηλά ποσοστά απόδοσης όταν χρησιμοποιείται το διαφορικό σήμα. Κατά δεύτερον, σημαντική αναδεικνύεται η βελτίωση που παρουσιάζεται στις αποδόσεις, σε σχέση με τη χρήση των απόλυτων τιμών των διαφορών των χαρακτηριστικών κατά την εκπαίδευση, ειδικότερα στην ιεραρχική δομή HV, για την αναγνώριση των κύριων ομιλητών.



Σχήμα 4.2 Συνολική σύγκριση μοντέλων κατηγοριοποίησης

Τέλος, το σχήμα 4.2 παρουσιάζει την συνολική σύγκριση αποδόσεων όταν χρησιμοποιείται το μονοφωνικό σήμα ή οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων (features) των δυο καναλιών [7]. Οι αποδόσεις με τη χρήση του διαφορικού σήματος κατά την εκπαίδευση είναι σε μεγάλο βαθμό συγκρίσιμες με αυτές των μέσων τιμών των χαρακτηριστικών των καναλιών ή με το μονοφωνικό σήμα και στις δυο δομές κατηγοριοποίησης, γεγονός που επιβεβαιώνει την μεγάλη

συμβολή της στερεοφωνικής ιδιότητας του ήχου στη σημασιολογική ανάλυση δεδομένων.

5. Συμπεράσματα – Πτυχές Μελλοντικής Έρευνας

Από την ανάλυση που προηγήθηκε καθίσταται σαφές ότι η αξιοποίηση της στερεοφωνικής πληροφορίας στα προβλήματα κατάτμησης και ταξινόμησης ηχητικών συμβάντων δείχνει ιδιαίτερα χρήσιμη και μάλλον χρίζει περαιτέρω διερεύνησης. Ειδικότερα στον ραδιοφωνικό ήχο, όπου συνυπάρχουν ποικίλες πηγές ήχου από διαφορετικά κανάλια μετάδοσης, μικρόφωνα με «άνισο» καταμερισμό, η στερεοφωνία μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποιημένες τεχνικές διαχωρισμού του σήματος πληροφορίας από τα υπόλοιπα δεδομένα.

Σε μελλοντική έρευνα εντάσσεται η προσπάθεια ανεύρεσης ενός προσαρμοστικού διανύσματος ιδιοτήτων εισόδου, που θα εκμεταλλεύεται τόσο «στερεοφωνικά» όσο και «μονοφωνικά χαρακτηριστικά», που θα οδηγήσει σε πιο αποδοτικά ποσοστά κατηγοριοποίησης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως οι τεχνικές αυτές μπορούν με ορισμένες διαφοροποιήσεις να χρησιμοποιηθούν και στη σημασιολογική ανάλυση ηχητικών δεδομένων σε τηλεοπτικές μεταδόσεις για θεματικό διαχωρισμό σημάτων πληροφορίας.

6. Αναφορές

[1] Gennaro C., Lenzi R, Mandreoli F., Martoglia R., Mordacchini M., Penzo W., Sassatelli S., "A unified multimedia and semantic perspective for data retrieval in the semantic web", *Information Systems*, Vol. 36, no. 2, pp. 174-191, 2011.

[2] Lazaridis M., Axenopoulos A., Rafailidis D., Daras P., "Multimedia search and retrieval using multimodal annotation propagation and indexing techniques", Signal Processing: Image Communication, *in press*, http://dx.doi.org/10.1016/j.image.2012.04.001, 2012.

[3] Irfanullah, Aslam N., Loo J., Roohullah, Loomes M., "Adding semantics to the reliable object annotated image databases", *Procedia Computer Science*, Vol. 3, pp. 414-419, 2011.

[4] C. Vegiris, C. Dimoulas, and G. Papanikolaou, "Audio content annotation, description and management using joint audio detection, segmentation and classification techniques", *in Audio engineering society preprint, proceedings of the 126th AES convention*, Munich (paper no. 7661), 2009.

[5] C. Dimoulas, C. Vegiris, K. Avdelidis, G. Kalliris, G. Papanikolaou, "Automated audio detection, segmentation, and indexing with application to postproduction editing", *proceedings of the 122nd AES convention* (paper no. 7138), Vienna, 2007.

[6] R. Kotsakis, G. Kalliris, C. Dimoulas, "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., Kalliris G., Dimoulas C., "Investigation of salient audio-features for pattern-based semantic content analysis of radio productions", *Proceedings of the 132nd AES Convention*, paper no. 8663, Budapest, Hungary, April 26-29 2012.

[8] R. Kotsakis, C. Dimoulas, G. Kalliris, "Contribution of stereo information to feature-based pattern classification for audio semantic analysis", *submitted in 7th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization*, SMAP 2012.

[9] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, G. Papanikolaou, "Adaptive phoneme alignment based on rough set theory", *Rough Sets and Current Trends in Computing (Sub-series of Lecture Notes in Computer Science)*, vol 6086, 2010a.

[10] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, G. Papanikolaou, "Designing optimal phoneme-wise fuzzy cluster analysis", *in Proceedings of the 128th AES Convention*, London, 2010b.

[11] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, G. Papanikolaou, "A heuristic text-driven approach for applied phoneme alignment", *in Proceedings of the 128th AES Convention*, London, 2010c.

[12] G. Tzanetakis, L. G. Martins, K. McNally, R. Jones, "Stereo Panning Information for Music Information Retrieval Tasks", *JAES*, 58(5), 409-417, 2010.

[13] Axelrod S., Goel V., Gopinath R.A., Olsen P.A., Visweswariah K., "Subspace constrained Gaussian mixture models for speech recognition", *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 13, no. 6, pp. 1144-1160, 2005.

[14] Nakagawa S., Wang L., Ohtsuka S., "Speaker Identification and Verification by Combining MFCC and Phase Information", *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, Vol. 20, no. 4, pp. 1085-1095, 2012.

[15] Zhao X., Shao Y., Wang D., "CASA-Based Robust Speaker Identification", IEEE *Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, Vol. 20, no. 5, pp. 1608-1616, 2012.

[16] Frenay B., Heeswijk M., Miche Y., Verleysen M., Lendasse A., "Feature selection for nonlinear models with extreme learning machines", *Neurocomputing*, in press, http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.12.055, 2012.

[17] Krishnamoorthy P., Prasanna S.R.M., Enhancement of noisy speech by temporal and spectral processing, *Speech Communication*, vol. 53, no. 2, pp. 154-174, 2011.

[18] G van Rossum et al., 1991, Python Language Website, online www.python.org.

[19] Dimoulas C., "Audio-visual processing and content management techniques, for the study of (human) bioacoustics' phenomena", PhD Thesis (in Greek), Dept. of Electrical and Computer Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, online: http://invenio.lib.auth.gr/record/66265/files/gri-2007-1053.pdf, 2006.

[20] O. Lartillot and P. Toiviainen, "Mir in matlab (ii): A toolbox for musical feature extraction from audio", in Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval, Vienna, 2007.

[21] C. Dimoulas, G. Papanikolaou, V. Petridis, "Pattern Classification and Audiovisual Content Management techniques using Hybrid Expert Systems: a video-assisted Bioacoustics Application in Abdominal Sounds Pattern Analysis", *Expert Systems with Applications*, 38 (10), 13082-13093, 2011.

[22] 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.

Ημιτονοειδής ανάλυση και σύνθεση ηχητικών σημάτων για αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων

Αλέξανδρος Τσιλφίδης
Μεταδιδακτορικός ερευνητής- Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Τεχνολογίας Υπολογιστών, MPhil, PhD *
altsilfidis@upatras.gr

Ελευθέριος-Μάριος Κοτσώνης-Τζάννες
Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Τεχνολογίας Υπολογιστών *
lefteris.kotsonis@gmail.com

Γιάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής *
mourjop@upatras.gr

* Ομάδα Ακουστικής και Τεχνολογίας Ήχου
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση ημιτονοειδούς μοντελοποίησης για την ανάλυση και σύνθεση ήχων, δίνοντας έμφαση στις χαμηλές συχνότητες και κυρίως σε πιθανούς τρόπους συμπίεσης της πληροφορίας. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διερευνήσει τρόπους μεγάλης μείωσης των τελικών ημιτονοειδών συνιστωσών, μέσα από κατάλληλη ομαδοποίηση κι επεξεργασία. Η προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου τρόπου ομαδοποίησης των ημιτονοειδών συνιστωσών έγινε για περιοχές συχνότητας γύρω από τα εκτιμώμενα κυρίαρχα τονικά ύψη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος είναι υποσχόμενη, μιας και σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ λίγες συνιστώσες (δηλαδή πολύ λίγες αλλά προσεχτικά επιλεγμένες συχνότητες) για να αναπαρασταθούν ικανοποιητικά τα χαμηλόσυχνα σήματα.

Sinusoidal analysis and synthesis for the reproduction of low frequencies

ABSTRACT

The present paper focuses on using sinusoidal modeling to analyse and synthesize sound, emphasizing on low frequencies and mainly on possible ways to compress information. The aim of this paper is to investigate ways of vastly reducing the number of sinusoidal components, through appropriate grouping and processing. In order to investigate the optimal grouping method the dominant pitch regions were estimated. The

results show that ın many cases, only few but carefully selected components can be used, in order to represent low-frequency signals competently.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάλυση και σύνθεση ήχου με χρήση ημιτονοειδών προκειμένου να επιτευχθεί συμπίεση δεδομένων στις χαμηλές συχνότητες. Προτείνονται διαφορετικές μέθοδοι αξιοποίησης της ημιτονοειδούς ανάλυσης προκειμένου να επιτευχθεί υποκειμενικά βέλτιστη συμπίεση της χαμηλόσυχνης πληροφορίας. Η ανάγκη να μειωθεί ο όγκος των ηχητικών δεδομένων έχει προκύψει από την ανάγκη να εκτελεστούν λειτουργίες αποθήκευσης ή ψηφιακής μετάδοσης (streaming) μεγάλου όγκου ηχητικών δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτό συχνά χρησιμοποιούνται γνωστές κωδικοποιήσεις όπως το mp3, aac, κ.ο.κ. Οι κωδικοποιήσεις αυτές συνήθως συμπιέζουν την πληροφορία, απορρίπτοντας συχνότητες πέραν του ακουστικού φάσματος και σύμφωνα με ένα ψυχοακουστικό μοντέλο.

Η συμπίεση σε χαμηλές συχνότητες είναι σημαντική για επιπλέον λόγους. Στην ακουστική χώρων, ξέρουμε ότι στις χαμηλές συχνότητες δημιουργούνται συχνά συντονισμοί, οι οποίοι είναι δύσκολο (και έχει μεγάλο κόστος) να αντιμετωπιστούν με τη χρήση υλικών/αλλαγή κατασκευαστικών δεδομένων. Συνεπώς, περιορίζοντας με μεθόδους επεξεργασίας σήματος την εκπομπή χαμηλών συχνοτήτων σε αυτές που είναι απολύτως απαραίτητες για την ακρόαση, θα μπορούσαμε να αποφύγουμε να διεγείρουμε το δωμάτιο σε συχνότητες συντονισμού και άρα να παραμορφώσει ο χώρος το σήμα. Η εργασία αυτή εστιάζει στην συμπίεση χαμηλών συχνοτήτων, πρακτικά κάτω από 220 Hz. Η συχνότητα αυτή επιλέχθηκε ως μια τυπική τιμή που χρησιμοποιείται στα crossover των ηχείων για την οδήγηση των χαμηλών συχνοτήτων του σήματος στο sub-woofer. Βέβαια, η συμπίεση της χαμηλόσυχνης πληροφορίας παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις, μιας και είναι γνωστό ότι η συχνοτική ανάλυση του αυτιού είναι καλύτερη στις χαμηλές συχνότητες από ότι στις ψηλές.

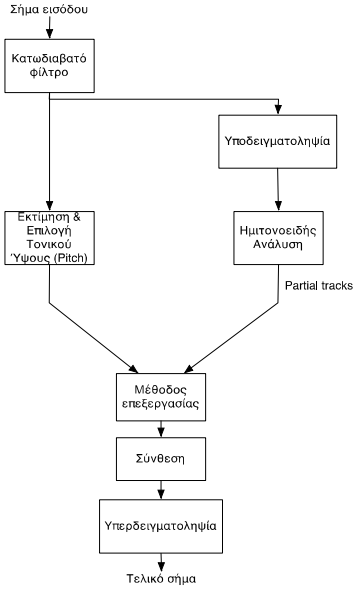
Σύμφωνα με την ημιτονοειδή ανάλυση, ένα ηχητικό σήμα αναλύεται σε απλά ημιτονοειδή στοιχεία (partials), που χαρακτηρίζονται από μία τιμή πλάτους, συχνότητας και φάσης καθώς και τη θέση τους στο χρόνο [1]. Για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας, υλοποιήθηκαν καινοτόμες μέθοδοι διαχωρισμού των partials: τα partials διαχωρίζονται σε ωφέλιμα και μη με βάση μία ανάλυση τονικού ύψους. Έτσι τελικά, επιλέγονται μόνο τα ωφέλιμα partials που είναι απαραίτητα για την κατά το δυνατόν πιο υποκειμενικά πιστή ανασύνθεση του σήματος. Η πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου τρόπου ομαδοποίησης των ημιτονοειδών συνιστωσών γύρω από τις περιοχές που έχουν οριστεί από τα κυρίαρχα (στη ροή του σήματος) τονικά ύψη. Έτσι, διερευνήθηκαν τρις μέθοδοι: (α) μεταβλητό εύρος ζώνης, (β) σταθερό εύρος ζώνης, (γ) ισοδύναμο παραλληλόγραμμο εύρος ζώνης (ERB) [2]. Οι μέθοδοι αυτές αξιολογήθηκαν ως προς το ακουστό αποτέλεσμα μέσω του δείκτη PEAQ.

Το υπόλοιπο της εργασίας αυτής χωρίζεται ως εξής: στην παράγραφο 2 γίνεται μία περιγραφή μεθόδου και η αναλυτική επεξήγηση όλων των σταδίων υλοποίησης, στην

παράγραφο 3 παρουσιάζονται επιλεγμένες μετρήσεις ενώ στην παράγραφο 4 δίνονται τα συμπεράσματα.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η εικόνα 2.1 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής της επεξεργασίας σήματος για την προτεινόμενη μέθοδο.



Εικ. 2.1 Διάγραμμα ροής επεξεργασίας του σήματος

Σύμφωνα με την ημιτονοειδή ανάλυση [1], ένα ηχητικό σήμα $x(t)$ μπορεί να περιγραφεί ως άθροισμα ημιτονοειδών, πιθανώς διαμορφωμένα κατά πλάτος και συχνότητα

$$x(t) = \sum_{1}^{L} A_l(t)\sin[\varphi_l(t)] \tag{2.1}$$

με

$$\varphi_l(t) = \varphi_l(0) + \int_0^t \omega_l(u)du \tag{2.2}$$

όπου $A_l(t)$ και $\varphi_l(t)$ είναι αντίστοιχα οι συναρτήσεις πλάτους και διαμόρφωσης συχνότητας στο χρόνο της l-οστής συνιστώσας (partial).

Το πρώτο στάδιο της ημιτονοειδούς ανάλυσης περιλαμβάνει τη χρήση του βραχύχρονου μετασχηματισμού Fourier (STFT) και την ανίχνευση των κορυφών του

φάσματος. Αυτό γίνεται εντοπίζοντας τα τοπικά μέγιστα στο φάσμα πλάτους των συχνοτήτων σε διαδοχικά χρονικά παράθυρα (frames). Επόμενο στάδιο είναι η εκτίμηση παραμέτρων της ανάλυσης: του πλάτους, της φάσης και της συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια εκτιμητών που βασίζονται είτε στη φάση είτε στην φασματική παρεμβολή. Οι τελευταίοι, προσαρμόζουν μία αναλυτική συνάρτηση γύρω από το φάσμα ισχύος ενός ανιχνευμένου ημιτονοειδούς στοιχείου. Οι εκτιμητές φάσης προσεγγίζουν την παράγωγο της στιγμιαίας φάσης ώστε να εκτιμήσουν την συχνότητα. Τελευταίο στάδιο της ανάλυσης είναι η ιχνηλασία συνιστωσών (partial tracking). Στο στάδιο αυτό αντιστοιχίζονται οι κορυφές διαδοχικών frames ώστε να σχηματιστούν τα partial tracks. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για partial tracking. Συχνά χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος McAulay-Quatieri (MQ). Χρησιμοποιεί μία στρατηγική αναζήτησης που λαμβάνει υπόψη μόνο συχνοτικές διαφορές για να αντιστοιχίσει μία παρατηρούμενη κορυφή σε ένα δεδομένο track ώστε να κατασκευάσει τα τελικά tracks. Αυτό το στάδιο είναι υπεύθυνο για την δημιουργία των partials που αργότερα θα χρησιμοποιήσουμε για να επιλέξουμε αυτά που απαιτούνται για τις ανάγκες της συμπίεσης. Για την ανακατασκευή του σήματος γίνεται η ημιτονοειδής σύνθεση και το σήμα μετασχηματίζεται ώστε να δημιουργηθεί ο συντεθειμένος ήχος [1]. Η εξίσωση σύνθεσης:

$$d_l[n] = \sum_{k=1}^{R_l} \hat{A}_k^l \cos(\hat{\theta}_k^l[n]) \tag{2.3}$$

δίνει το τελικό σήμα όπου τα Ακ και θκ είναι τα παρεμβεβλημένα πλάτη και φάσεις.

Προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική ισχύς για τις ανάγκες των πειραμάτων, στην παρούσα αλυσίδα επεξεργασίας σήματος έχουν προστεθεί ένα στάδιο υποδειγματοληψίας κι ένα στάδιο υπερδειγματοληψίας. Πριν εφαρμοστεί ο STFT, το σήμα φιλτράρεται με κατωδιαβατό φίλτρο κι επαναδειγματοληπτείται με συχνότητα διπλάσια αυτής του κατωδιαβατού φίλτρου. Με βάση την αρχή του Nyquist, έτσι επιτυγχάνουμε μικρότερο αριθμό δειγμάτων χωρίς απώλεια πληροφορίας, και συνεπώς μικρότερες ανάγκες σε υπολογιστική ισχύ. Στο τέλος της επεξεργασίας μας, επαναφέρουμε το σήμα στην αρχική συχνότητα δειγματοληψίας (με υπερδειγματοληψία) ώστε να μπορεί να αναπαραχθεί σε ένα τυπικό υπολογιστικό περιβάλλον.

Για να καταλήξουμε σε ένα κριτήριο επιλογής των συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν για να απεικονίσουν το σήμα, έγιναν πρώιμα τεστ στα οποία η επιλογή ήταν χειροκίνητη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SPEAR [3]. Αυτές οι πρόχειρες δοκιμές επιβεβαίωσαν την αρχική μας υπόθεση κι έδειξαν ότι μπορούσαμε να αφαιρέσουμε σημαντικό όγκο πληροφορίας επιτυγχάνοντας ένα ακουστό αποτέλεσμα, κοντά στο αρχικό. Στη συνέχεια αναζητήθηκαν τρόποι αυτόματης επιλογής των συχνοτήτων που θα αναπαραστήσουν το σήμα. Από τα αρχικά τεστ έγινε φανερό ότι το τονικό ύψος του σήματος παίζει κυρίαρχο ρόλο στην υποκειμενική μας αντίληψη. Έτσι, με την εκτίμηση κι επιλογή των κυρίαρχων τονικών υψών έγινε εφικτό να επιλεγούν τα τονικά ύψη που θεωρούνται βασικά για την αναπαραγωγή των χαμηλών συχνοτήτων του σήματος.

Το πρώτο στάδιο αυτού του βήματος υλοποιήθηκε με μία συνάρτηση εύρεσης τονικού ύψους [4]. Η συνάρτηση εντοπίζει έναν αριθμό τονικών υψών στο σήμα. Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας τα ανιχνευμένα τονικά ύψη απεικονίζονται σε ένα ιστόγραμμα. Μία συνάρτηση ανίχνευσης τοπικών μεγίστων, βρίσκει τα τονικά ύψη με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Οι συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται ως κεντρικές συχνότητες για τις τρεις μεθόδους ομαδοποίησης που αναπτύχθηκαν. Η πρώτη μέθοδος, χρησιμοποιεί ένα μεταβλητό εύρος ζώνης για κάθε κεντρική συχνότητα. Για κάθε ανιχνευμένη (από το προηγούμενο βήμα επεξεργασίας) κεντρική συχνότητα k, θεωρούμε ένα αρχικό εύρος ζώνης. Το εύρος ζώνης αυτό μεταβάλλεται αν υπάρχει περίπτωση επικαλυπτόμενων περιοχών μεταξύ αυτού και των ευρών ζώνης των υπολοίπων κεντρικών συχνοτήτων. Πρόχειρες ακουστικές δοκιμές έδειξαν ότι η χρήση όλου του εύρους ζώνης δίνει καλύτερα αποτελέσματα καθώς συσσωρεύεται περισσότερη ενέργεια και έχουμε λιγότερες απώλειες ενέργειας. Έτσι επιτυγχάνουμε να καλύψουμε όλο το φάσμα ως τα 220 Hz χωρίς να υπάρχει επικάλυψη συχνοτήτων. Το εύρος ζώνης αυτό, καθορίζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις περιοχές χαμηλότερα (ή ψηλότερα) από το γειτονικό εύρος ζώνης. Η συνθήκη που καθορίζει τα εύρη αυτά είναι:

$$f_i + \frac{B_i}{2} = f_{i+1} - \frac{B_{i+1}}{2}\ ,\ i = 1,2,\ldots,k \tag{2.4}$$

όπου f_i η i-οστή κεντρική συχνότητα και B_i το αντίστοιχο εύρος ζώνης της, θεωρώντας ότι $f_i < f_{i+1}$. Αν το εύρος ζώνης μίας συχνότητας παραβαίνει την συνθήκη αυτή τότε το νέο B_i υπολογίζεται ως:

$$B_i' = f_{i+1} - f_i \tag{2.5}$$

Τέλος, κάθε partial τροποποιείται έτσι ώστε κάθε ημιτονοειδής συνιστώσα να λάβει την νέα τιμή συχνότητας:

$$f_{new}^{l}[n] = f_i,\ f^{l}[n] \in [f_i - \frac{B_i}{2}, f_i + \frac{B_i}{2}] \tag{2.6}$$

όπου $f^{l}[n]$ η συχνότητα της ημιτονοειδούς συνιστώσας n του partial l, και $f_{new}^{l}[n]$ η νέα τιμή της ημιτονοειδούς συνιστώσας.

Η δεύτερη μέθοδος επεξεργασίας που υλοποιήθηκε (μέθοδος σταθερού εύρους ζώνης) θεωρεί τρία προκαθορισμένα εύρη ζώνης ανεξάρτητα της συχνότητας. Τα εύρη ζώνης αυτά προέκυψαν από την παρατήρηση της κλίμακας Bark [2][5], όπου το συχνοτικό φάσμα χωρίζεται σε ισοδύναμες στάθμες ενέργειας. Σύμφωνα με την κλίμακα Bark, αυτές ξεκινούν από τα 100 Hz, με αμέσως επόμενη βαθμίδα τα 200 Hz. Για λόγους καλύτερης κατάτμησης του περιορισμένου εύρους ζώνης στο οποίο εργαζόμαστε, χωρίσαμε το διάστημα αυτό σε τρία μέρη. Επομένως τα εύρη ζώνης ορίστηκαν ως:

$$B_i = \begin{cases} [20,60], & i = 1 \\ [60,100], & i = 2 \\ [100,220], & i = 3 \end{cases} \tag{2.7}$$

Επόμενο αυτής της υλοποίησης, είναι πως οι κεντρικές συχνότητες έχουν πάντα σταθερό αριθμό – τρεις. Η κατηγοριοποίηση των ήδη υπαρχόντων συχνοτήτων των partial γίνεται όμοια με την προηγούμενη μέθοδο

$$f^{l}_{new}[n] = f_i,\ f^{l}[n] \in [f_i - \frac{B_i}{2}, f_i + \frac{B_i}{2}] \tag{2.8}$$

Η τελευταία μέθοδος επεξεργασίας βασίζεται στο ισοδύναμο παραλληλόγραμμο εύρος ζώνης (Equivalent Rectangular Bandwidth – ERB). Είναι μία χαρτογράφηση συχνοτήτων που ανήκει στις μεθόδους στρέβλωσης στην κλίμακα συχνοτήτων ακοής και είναι στενά συνυφασμένη με τις τράπεζες φίλτρων ακοής [2]. Η κλίμακα αυτή ορίζεται από τη σχέση

$$ERB(f) = B_i = 24. + (0.108 \cdot f_i) \tag{2.9}$$

όπου από κάθε συχνότητα f_i υπολογίζεται το ισοδύναμο παραλληλόγραμμο εύρος ζώνης το οποίο χρησιμοποιείται στην μέθοδο για την κατηγοριοποίηση των συχνοτήτων του διανύσματος του partial track.

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να μετρηθεί η αντικειμενική απόδοση των μεθόδων με διάφορα πλήθη κεντρικών συχνοτήτων, χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο για την μέτρηση της αντιληπτικής ποιότητας (Perceptual Evaluation of Audio Quality – PEAQ) [6]. Το πρότυπο αυτό είναι ικανό να προβλέπει τα αποτελέσματα υποκειμενικών τεστ ακρόασης. Χρησιμοποιεί μία κλίμακα από το 0 ως το -4 (0: ανεπαίσθητη, -1: αισθητή αλλά όχι ενοχλητική, -2: ελαφρώς ενοχλητική, -3: ενοχλητική, -4 πολύ ενοχλητική). Οι μετρήσεις PEAQ για 4 σήματα με διαφορετικό περιεχόμενο (jazz, κλασσική, ηλεκτρονική, ηχοτοπία) φαίνονται στην Εικόνα 3 (α-δ), στα αντίστοιχα ραβδογράμματα. Το jazz σήμα περιέχει κρουστά, μπάσο, πλήκτρα και άλλα όργανα που χρησιμοποιούνται συνήθως στο είδος αυτό, δηλαδή μία ποικιλία τονικών υψών και συχνοτήτων και γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα (transients) λόγω του ύφους. Το σήμα κλασσικής περιέχει επίσης γρήγορα μεταβατικά αλλά δεν έχει μεγάλη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες λόγω των οργάνων και των συχνοτικών περιοχών που χρησιμοποιούνται στην μουσική αυτή. Στο σήμα ηλεκτρονικής μουσικής υπάρχουν πολύ γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα και συγκέντρωση ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος στο σήμα ηχοτοπίου, τα μεταβατικά φαινόμενα είναι ακαθόριστα και σπασμωδικά και το σήμα έχει κατά κύριο λόγο χαμηλές συχνότητες. Υπενθυμίζεται πως μέθοδοι 1,2 και 3 είναι αντίστοιχα οι: μεταβλητού εύρους ζώνης, σταθερού εύρους ζώνης, ισοδύναμου παραλληλόγραμμου εύρους ζώνης. Για τη μέθοδο 2 φαίνονται αποτελέσματα μόνο σε 3 κεντρικές συχνότητες (βλ. εξίσωση 2.7).

Σε γενικές γραμμές φαίνεται ότι υπάρχει μείωση της τιμής του PEAQ (δηλαδή μείωση της ηχητικής ποιότητας), όσο αυξάνουν οι κεντρικές συχνότητες. Αυτό εκ πρώτης όψεως δεν είναι κάτι αναμενόμενο, μιας και θα περίμενε κανείς ότι περισσότερη πληροφορία θα οδηγούσε σε καλύτερη ποιότητα. Όμως, η επιλογή της ομαδοποίησης συχνοτήτων γύρω από κεντρικές συχνότητες τονικών υψών, αποδείχθηκε ότι δεν είναι σθεναρή σε περιπτώσεις που κάποια τονικά ύψη θεωρηθούν κυρίαρχα ενώ δεν πρέπει. Η συγκέντρωση φασματικής ενέργειας γύρω από αυτές τις συχνότητες οδηγεί σε λάθος

υποκειμενική αντίληψη. Αυτό το φαινόμενο εξηγεί την πτώση της ποιότητας παρότι προσθέτουμε συχνότητες.

Στην περίπτωση της jazz μουσικής (Εικ. 3-α) φαίνεται ότι η μέθοδος 1 δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα για 4 και 6 συχνότητες, όμως δεν είναι σθεναρή στην πρόσθεση κεντρικών συχνοτήτων. Η μέθοδος 3 αντίθετα φαίνεται να είναι σθεναρή στην πρόσθεση συχνοτήτων. Στην περίπτωση της κλασσικής μουσικής παίρνουμε τα καλύτερα αποτελέσματα για τη μέθοδο 1 με 4 συχνότητες και τη μέθοδο 2. Η απόδοση της μεθόδου 3 φαίνεται να καταρρέει όσο προστίθενται κεντρικές συχνότητες. Για το σήμα ηλεκτρονικής μουσικής φαίνεται ότι η μέθοδος 3 για 3,4,5 κεντρικές συχνότητες καθώς και η μέθοδος 1 για 4 και 5 έχουν την καλύτερη απόδοση. Τέλος για την περίπτωση του ηχοτοπίου, η μέθοδος 1 έχει σταθερή απόδοση μέχρι τις 7 συχνότητες, παρόμοια με αυτή της μεθόδου 2 και της μεθόδου 3 για 3,4 και 5 συχνότητες.

Σε γενικές γραμμές από αυτά τα πρώτα αποτελέσματα προκύπτει πως είναι δυνατό να μειωθούν σημαντικά οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται για την ανασύνθεση του σήματος. Όμως, η επιλογή λάθος κεντρικών συχνοτήτων είναι ικανή να παραμορφώσει αρκετά το τελικό σήμα. Αυτό γίνεται κατανοητό και από τις μετρήσεις PEAQ που διενεργήθηκαν. Πρόχειρες ακροάσεις έδειξαν πως δεδομένης της χρήσης τόσο λίγων συχνοτήτων, είναι δυνατή η ανακατασκευή του σήματος με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, έγινε κατανοητό πως τα «στάσιμα» σήματα μπορούν να αναπαρασταθούν πιο εύκολα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν μέθοδοι συμπίεσης της χαμηλόσυχνης μουσικής πληροφορίας, οι οποίες βασίζονται στη χρήση ημιτονοειδούς ανάλυσης. Πραγματοποιήθηκε μία επεξεργασία εξαρτώμενη από το σήμα κι η βασική ιδέα είναι η συγκέντρωση της φασματικής ενέργειας γύρω από περιοχές που εμφανίζονται τα κυρίαρχα τονικά ύψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ειδικά για στάσιμα σήματα μπορεί να επιτευχθεί πολύ καλή αναπαράσταση με εξαιρετικά λίγες συχνότητες (3-4). Παρόλα αυτά, η προτεινόμενη τεχνική χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση για να αντιμετωπίσει σήματα με έντονα μεταβαλλόμενο χρονοσυχνοτικό περιεχόμενο.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα που κατέληξε στα αποτελέσματα αυτά χρηματοδοτήθηκε από Εθνικούς πόρους και από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2007-2013 βάσει της Σύμβασης Επιχορήγησης αριθ. ΜΙΚΡΟ2-38/Ε-ΙΙ-Α

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] L.O. Nunes, P.A. Esquef, L.W. Biscaihno “FlexSM: A Flexible Sinusoidal Modeling System” Journal of Acoustic Eng. Soc., **57(12)**, p 1042-1056 (2009)

[2] J.O. Smith III, J.S. Abel “Bark and ERB Bilinear Transforms” IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, **7(6)**, p 697-708 (1999)

[3] M. Klingbeil "SPEAR – Sinusoidal Partial Editing and Resynthesis" (Εφαρμογή) http://www.klingbeil.com/spear (2009)

[4] A. Camacho "SWIPE: A Sawtooth Waveform Inspired Pitch Estimator for speech and music" Διδακτορική Διατριβή, University of Florida (2007)

[5] G. Salvi "Auditory Scales" (http://www.speech.kth.se/~giampi/auditoryscales/)

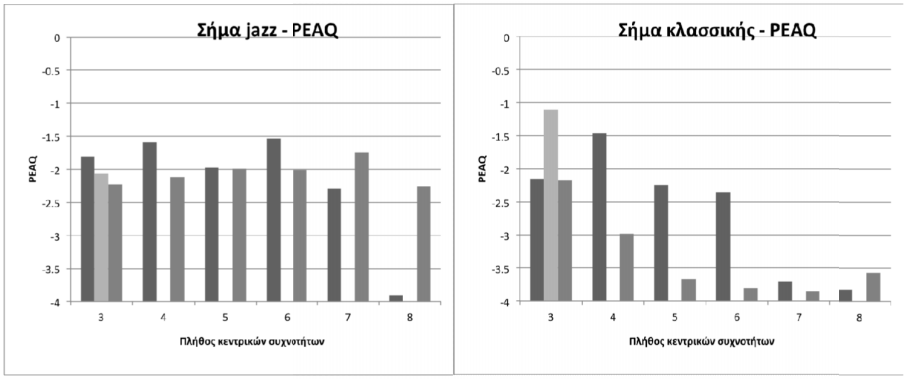
[6] A. Spanias, T. Painter, A. Venkatraman *Audio Signal Processing and Coding,* Wiley-Interscience (2007)

[7] U. Zolzer *DAFX – Digital Audio Effects* John Wiley & Sons, LTD. (2002)

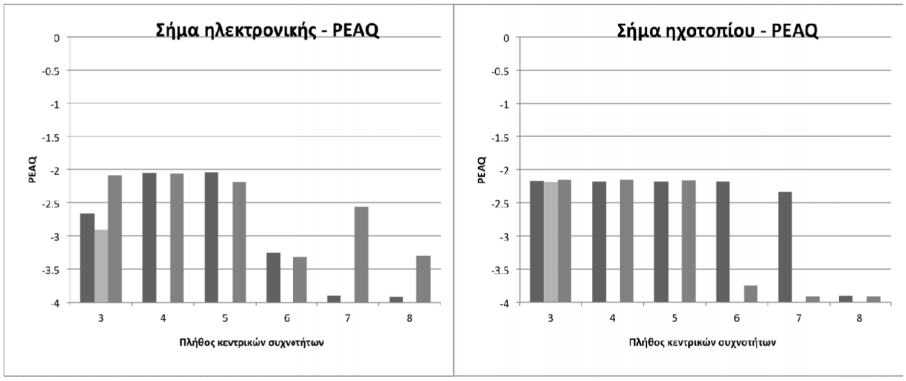
[8] P. Kabal "AFsp Package" Ανάκτηση 2011 από ResampAudio (http://www.mmsp.ece.mcgill.ca/documents/Software/Packages/AFsp/ResampAudio.html) (2011)

Εικ. 3.1 Μετρήσεις PEAQ για (α) σήμα jazz (β) σήμα κλασσικής μουσικής (γ) σήμα ηλεκτρονικής μουσικής (δ) σήμα ηχοτοπίου

(α) (β)



(γ) (δ)


Σήμα ηλεκτρονικής - PEAQ
PEAQ
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
-4
3
4
5
6
7
8
Πλήθος κεντρικών συχνοτήτων
Σήμα ηχοτοπίου - PEAQ
PEAQ
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
-4
3
4
5
6
7
8
Πλήθος κεντρικών συχνοτήτων

Ανάλυση και εκτίμηση του ακουστικού περιβάλλοντος απευθείας από ηχητικά σήματα

Ελευθερία Γεωργαντή
Διδακτορική φοιτήτρια /Ομάδα ακουστικής και τεχνολογίας ήχου
Τμήμα Ηλ.Μηχ. Πανεπιστημίου Πατρών
egeorganti @ upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής /Ομάδα ακουστικής και τεχνολογίας ήχου
Τμήμα Ηλ.Μηχ. Πανεπιστημίου Πατρών
mourjop @ upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα μέρους της ερευνητικής δραστηριότητας των συγγραφέων των τελευταίων ετών πάνω στο θέμα της ανάλυσης του ακουστικού περιβάλλοντος απευθείας από ηχητικά σήματα. Η παρούσα εργασία αρχικά αναφέρεται στις υπάρχουσες τεχνολογίες ανάλυσης ακουστικού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, προτείνονται τρεις μέθοδοι: (α) μέθοδος εκτίμησης της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη, (β) μέθοδος εκτίμησης της παραμέτρου της ακουστικής ευκρίνειας, (γ) μέθοδος κατηγοριοποίησης του τύπου του δωματίου βάσει των ακουστικών του ιδιοτήτων. Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι εφαρμόζονται απευθείας σε αμφιωτικά ηχητικά σήματα.

Analysis of the acoustical environment based on the signals' statistics

ABSTRACT

In this study, the results of the ongoing work of the authors on the topic of the analysis of the acoustical environment from reverberant signals will be presented. More specifically, this study will initially present existing acoustical environment analysis methods. Then, three methods are proposed based on binaural reverberant signals: (a) a source/reveiver distance estimation method, (b) clarity estimation method, (c) room categorization method based on its acoustical characteristics.

1 Εισαγωγή

Όταν σε ένα ακροατή παρουσιαστεί ένα ηχητικό σήμα αμφιωτικά (με τη βοήθεια ακουστικών για παράδειγμα) μπορεί μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα να βγάλει κάποια συμπεράσματα για το χώρο που έχει ηχογραφηθεί το ηχητικό σήμα. Για παράδειγμα, αν βρίσκεται σε χώρο μεγάλων ή μικρών διαστάσεων, αν βρίσκεται κοντά ή μακριά από την ηχητική πηγή κλπ. Ενώ μια τέτοια διαδικασία φαίνεται να είναι αρκετά απλή για κάποιον ακροατή ο οποίος ακούει κι επεξεργάζεται την πληροφορία, η ανάπτυξη ενός τέτοιου «έξυπνου» τεχνολογικού συστήματος αποτελεί πρόκληση για τους μηχανικούς τεχνολογίας ήχου.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα έντονο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα για θέματα ανάλυσης του ακουστικού περιβάλλοντος από ηχητικά σήματα και διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί σε αυτόν το τομέα βασιζόμενες στην επεξεργασία που κάνει το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα [1]. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την εκτίμηση ακουστικών παραμέτρων, ή για την εκτίμηση της απόστασης πηγής/δέκτη [2], με στόχο την υποστήριξη τεχνικών επεξεργασίας ήχου για διάφορες εφαρμογές, όπως π.χ. για την απαλοιφή αντήχησης από ηχητικά σήματα [3].

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται αποτέλεσματα μέρους της έρευνας των τελευταίων ετών των συγγραφέων πάνω στο θέμα της ανάλυσης του ακουστικού περιβάλλοντος απευθείας από αμφιωτικά ακουστικά σήματα και παρουσιάζονται συνοπτικά τρεις μέθοδοι: (α) μέθοδος εκτίμησης της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη, (β) μέθοδος εκτίμησης της παραμέτρου της ακουστικής ευκρίνειας, (γ) μέθοδος κατηγοριοποίησης του τύπου του δωματίου βάσει των ακουστικών του ιδιοτήτων.

1.1 Εκτίμηση της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη

Σε αυτή την ενότητα θα δοθούν οι πληροφορίες που αφορούν στην υλοποίηση μιας μεθόδου υπολογισμού της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη από αμφιωτικά σήματα. Το πρόβλημα της εκτίμησης της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη σχετίζεται άμεσα με την εκτίμηση της στάθμης λόγου κατευθείαν προς ανακλώμενου ήχου κι έχει μελετηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια [2]. Η πλειονότητα των υπάρχοντων μεθόδων αξιοποιεί παραμέτρους που μπορούν να υπολογιστούν από αμφιωτικά σήματα όπως για παράδειγμα η ενδοωτική συνάφεια (interaural coherence-IC), καθώς πρόκειται για μια παράμετρο η οποία σχετίζεται άμεσα με τη στάθμη λόγου κατευθείαν προς ανακλώμενου ήχου [2]. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση απόσταση/δέκτη, η οποία βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά της ενδοωτικής συνάφειας.

Έστω ότι ένα ανηχωικό σήμα $s(t)$ αναπαράγεται σε μια συγκεκριμένη θέση σε ένα χώρο και ηχογραφείται αμφιωτικά (π.χ. με χρήση δυο μικροφώνων τοποθετημένα στα αυτιά ενός KEMAR (GRAS 45BM)). Αν $x_l(t)$ και $x_r(t)$ είναι τα ηχογραφημένα σήματα (αριστερό και δεξί κανάλι), τότε προκύπτει:

$$s(t) * h_l(t) = x_l(t), \quad (1)$$

$$s(t) * h_r(t) = x_r(t), \quad (2)$$

όπου $h_l(t)$ και $h_r(t)$ είναι η δεξιά και η αριστερή αμφιωτική κρουστική απόκριση

για το συγκεκριμένο συνδυασμό θέσης πηγής και δέκτη. Τα μέτρα του φάσματος των αμφιωτικών σημάτων σε dB τότε θα είναι:

$$X_l^{dB}(\omega) = 20\log_{10}|X_l(\omega)|, \quad (3)$$
$$X_r^{dB}(\omega) = 20\log_{10}|X_r(\omega)|, \quad (4)$$

όπου $X_l(\omega)$ και $X_r(\omega)$ είναι τα φάσματα των αμφιωτικών σημάτων και ω είναι ο φασματικός δείκτης. Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier στις εξισώσεις (1) και (2) και κάνοντας χρήση των εξισώσεων (3) και (4), μπορεί να γραφτεί:

$$X_l^{dB}(\omega) = S^{dB}(\omega) + H_l^{dB}(\omega) \quad (5)$$
$$X_r^{dB}(\omega) = S^{dB}(\omega) + H_r^{dB}(\omega) \quad (6)$$

Η διαφορά των μέτρων του φάσματος $\Delta_X^{dB}(\omega)$ των δυο σημάτων στα δυο αυτιά θα είναι:

$$\Delta_X^{dB}(\omega) = X_l^{dB}(\omega) - X_r^{dB}(\omega), \quad (7)$$

οπότε συνδυάζοντας τις σχέσεις (5), (6) και (7), προκύπτει ότι:

$$\Delta_X^{dB}(\omega) = H_l^{dB}(\omega) - H_r^{dB}(\omega), \quad (8)$$

όπου $\Delta_X^{dB}(\omega)$ είναι η διαφορά των μέτρων του φάσματος των δυο αμφιωτικών σημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι όροι $H_l^{dB}(\omega)$ και $H_r^{dB}(\omega)$ στην εξίσωση (8) εκφράζουν τη διαφορά δυο τυχαίων μεταβλητών, μια σχέση για τη διασπορά των δυο μεταβλητών προκύπτει ως εξής [6]:

$$V_x = V_l + V_r - 2\mathbf{Cov}(H_l, H_r), \quad (9)$$

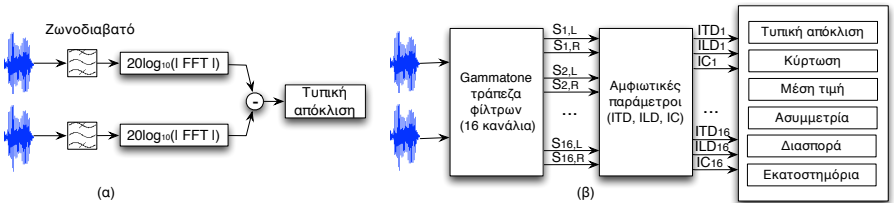
όπου V_x είναι η διασπορά της $\Delta_X^{dB}(\omega)$. Παράλληλα, V_l, V_r και $\mathbf{Cov}(H_l, H_r)$ είναι η διασπορά και η συνδιασπορά των $H_l^{dB}(\omega)$ και $H_r^{dB}(\omega)$. Εδώ, οι όροι $H_l^{dB}(\omega)$ και $H_r^{dB}(\omega)$ υποθέτουμε ότι είναι στατιστικά ανεξάρτητοι [4] καθώς οι τιμές της μιας μεταβλητής δεν επηρεάζουν τις τιμές της άλλης. Συμπερασματικά, η συνδιασπορά των $H_l^{dB}(\omega)$ και $H_r^{dB}(\omega)$ προσεγγίζει την τιμή μηδέν [4] και η εξίσωση (9) μπορεί να γραφεί ως:

$$V_x \simeq V_l + V_r. \quad (10)$$

Παρομοίως, οι σχετικές τιμές της τυπική απόκλισης συσχετίζονται ως [6]:

$$\sigma_x \simeq \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_r^2}, \quad (11)$$

όπου σ_x είναι η τυπική απόκλιση της Δ_X^{dB} και σ_l και σ_r αντιστοιχούν στις τιμές της τυπικής απόκλισης των φασματικών τιμών των αμφιωτικών κρουστικών αποκρίσεων χώρου, H_l^{dB} and H_r^{dB}. Η εξίσωση (11) υποδεικνύει ότι η τυπική απόκλιση της διαφοράς του μέτρου του φάσματος των αμφιωτικών σημάτων σχετίζεται μοναδικά με τις σχετικές αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις χώρου. Σε προηγούμενες εργασίες έχει αποδειχθεί ότι η τυπική απόκλιση μιας αμφιωτικής απόκρισης χώρου εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη και μεταβάλλεται με αυτήν [5,6]. Άρα η τυπική απόκλιση της διαφοράς του μέτρου του φάσματος των αμφιωτικών σημάτων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος για την εκτίμηση



Σχήμα 1.1 *Διαδικασία εξαγωγής (α) της παραμέτρου της τυπικής απόκλισης της διαφοράς του μέτρου του φάσματος αμφιωτικών σημάτων και (β) των στατιστικών παραμέτρων από τα αμφιωτικά σήματα.*

της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη. Η διαδικασία εξαγωγής της παραμέτρου φαίνεται στο σχήμα 1.1(α). Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξαγωγή της παραμέτρου μπορεί να προκύψει κανόντας χρήση είτε όλου του συχνοτικού εύρους των σημάτων (fullband) είτε συγκεκριμένων μπάντων συχνοτήτων (subbands).

Στην παρούσα εργασία, η προτεινόμενη παράμετρος σε συνδυασμό με μια μέθοδο αναγνώρισης προτύπων που κάνει χρήση μειγμάτων Γκαουσιανών μοντέλων (Gaussian Mixture Model - GMM) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόστασης πηγής/δέκτη. Περισσότερες λεπτομέρειες για την υλοποίηση και τα αποτελέσματα της μεθόδου θα παρουσιαστούν στην ενότητα 3.1.

1.2 Μέθοδος κατηγοριοποίησης δωματίου

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, όταν σε έναν ακροατή παρουσιαστεί αμφιωτικά ένα ηχητικό σήμα (με τη βοήθεια ακουστικών για παράδειγμα) μπορεί μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα να βγάλει κάποια συμπεράσματα για το χώρο που έχει που έχει ηχογραφηθεί το ηχητικό σήμα (αν δηλαδή ο χώρος είναι μεγάλος ή μικρός σε μέγεθος, αν έχει μεγάλο χρόνο αντήχησης ή όχι κλπ). Είναι γνωστό ότι το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα αξιοποιεί τις αμφιωτικές «πληροφορίες» για την εξαγωγή τέτοιου είδους συμπερασμάτων αξιοποιώντας τις ενδοωτικές χρονικές διαφορές (interaural time difference - ITD) της άφιξης των δυο σημάτων στα δυο αυτιά, την ενδοωτική στάθμη διαφοράς (interaural level difference - ILD) ή την ενδοωτική συνάφεια (interaural coherence - IC) [7].

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια μέθοδος κατηγοριοποίησης χώρων, η οποία βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων αμφιωτικών παραμέτρων που μπορούν να εξάχθούν από τα αμφιωτικά σήματα. Στο σχήμα 1.1(β) φαίνεται η διαδικασία εξαγωγής των στατιστικών παραμέτρων από δυο ηχητικά σήματα. Τα αμφιωτικά σήματα (δυο κανάλια) φιλτράρονται από μια τράπεζα φίλτρων τύπου gammatone (16 συχνοτικών περιοχών) και στη συνέχεια υπολογίζονται οι αμφιωτικές παράμετροι ILD, ITD και IC για χρονικά παράθυρα των 20 msec. Έπειτα, υπολογίζονται εννέα διαφορετικές στατιστικές παράμετροι (τυπική απόκλιση, κύρτωση, μέση τιμή, διασπορά, εκατοστημόρια κλπ.) από τις αμφιωτικές παραμέτρους από χρονικά παράθυρα μεγαλύτερης διάρκειας (2 sec). Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην εξαγωγή 432 παραμέτρων (16 συχνοτικές περιοχές $\times$ 3 ενδοωτικές παράμετροι $\times$ 9 στατιστικές παράμετροι).

Οι παράμετροι αυτές σε συνδυασμό με μια μέθοδο αναγνώρισης προτύπων που κάνει χρήση μειγμάτων Γκαουσιανών μοντέλων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του τύπου του δωματίου. Η κατηγοριοποίηση των δωματίων βασίζεται σε προηγούμενη εργασία [8], η οποία προτείνει τρεις κατηγορίες δωματίων βάσει της ακουστικής τους χρήσης για την αναπαραγωγή ήχου σε αυτούς: **Μικρά**: Χώροι ακρόασης, στούντιο ηχογραφήσεων, χώροι με χαμηλές τιμές χρόνου αντήχησης, **Μεσαία**: Χώροι εργασίας, βιομηχανικοί χώροι, χώροι με χρόνους αντήχησης της τάξεως των 0.3-0.6 sec και **Μεγάλα**: Αίθουσες συναυλιών, αίθουσες με χρόνο αντήχησης από 1.5 ως 5 sec.

Κάνοντας χρήση της παραπάνω προτεινόμενης κατηγοριοποίησης και των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν αναπτύχθηκε μέθοδος αυτόματης κατηγοριοποίησης των χώρων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην ενότητα 3.2.

1.3 Μέθοδος εκτίμησης ακουστικών παραμέτρων

Οι ακουστικές παράμετροι σχετίζονται με την ακουστική ποιότητα αναπαραγωγής του ήχου μέσα σε ένα χώρο και μπορούν να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για την «ακουστική» χρήση του. Μερικές από αυτές είναι ο χρόνος αντήχησης, ο λόγος στάθμης απευθείας προς ανακλώμενης, η ακουστική ευκρίνεια κλπ. Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται μια μέθοδος εκτίμησης της ακουστικής παραμέτρου της ευκρίνειας (Clarity - C50) απευθείας από ηχητικά σήματα. Με χρήση των αμφιωτικών παραμέτρων (βλ. σχήμα 1.1(β))όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 1.2 καθώς και με χρήση απλής γραμμικής παλινδρόμησης (simple linear regression) αναπτύχθηκε τεχνική εκτίμησης της ακουστικής ευκρίνειας. Η μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης επέστρεψε μεγαλύτερο βάρος στις στατιστικές παραμέτρους που προκύπτουν από τις ενδοωτικές χρονικές διαφορές. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου θα παρουσιαστούν στην ενότητα 3.3.

2 Μετρήσεις

Για την ανάπτυξη και αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων χρησιμοποιήθηκε βάση ανηχωικών ηχητικών σημάτων διάρκειας 60 λεπτών. Σε όλες τις περιπτώσεις το 65 % της συνολικής διάρκειας των ηχητικών σημάτων χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των μοντέλων (training) και το 35 % για την αξιολόγηση των μεθόδων (evaluation). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν αμφιωτικές κρουστικές αποκρίσεις από διαφορετικούς χώρους. Τα ανηχωικά σήματα συνελίχθηκαν με τις αμφιωτικές αποκρίσεις χώρου από διάφορους χώρους και για διάφορες αποστάσεις πηγής/δέκτη. Στο πίνακα 2.1 φαίνονται ο όγκος και ο χρόνος αντήχησης των υπό μελέτη δωματίων.

3 Αποτελέσματα

3.1 Εκτίμηση της απόστασης

Βάσει της διαδικασίας που περιγράφηκε στην ενότητα 1.1 υπολογίστηκε η παράμετρος της τυπικής απόκλισης της διαφοράς του μέτρου των φασμάτων από τα αμφιωτικά ηχητικά σήματα. Η παράμετρος εξάγεται από χρονικά παράθυρα του σήματος διάρκειας 2 sec για την συχνοτική περιοχή (subband) 0.2 με 2.3 kHz.

Δωμάτιο	**Όγκος (m^3)**	**Χρόνος αντήχησης (s)**
Θάλαμος ακρόασης	12	0.12
Δωμάτιο συνεδριάσεων	120	0.23
Γραφείο I	50	0.3
Γραφείο II	93	0.43
Αίθουσα διαλέξεων I	177	0.5
Αίθουσα διαλέξεων II	371	0.78
Χώρος σκάλας	-	0.86
Αίθουσα συναυλιών I	-	2
Αίθουσα συναυλιών II	9300	2.1
Καθεδρικός ναός	-	5

Πίνακας 2.1 *Όγκος και χρόνος αντήχησης των υπό μελέτη δωματίων.*

Στη συνέχεια, εξάχθηκε το μοντέλο κάνοντας χρήση GMM και του αλγορίθμου Expectation-Maximization (EM), k-means με 300 επαναλήψεις, 5 γκαουσιανών στοιχείων και διαγώνιων πινάκων συνδιασποράς. Η απόδοση της μεθόδου για τον καθεδρικό ναό (βλ. πίνακα 2.1) με τη μορφή μήτρας σύγχυσης φαίνεται στον πίνακα 3.1. Ειναι προφανές ότι η προτεινόμενη παράμετρος μπορεί να επιφέρει υψηλή απόδοση της τάξεως των 94 % (μέση απόδοση) για πέντε κατηγορίες απόστασεων (1 m, 2 m, 3 m, 5 m, 15 m). Οι γραμμές αντιστοιχούν στις πραγματικές αποστάσεις και οι στήλες στις εκτιμηθείσες.

	1 m	**2 m**	**3 m**	**5 m**	**15 m**
1 m	**99**	1	0	0	0
2 m	1	**99**	0	0	0
3 m	0	1	**85**	13	1
5 m	0	0	7	**90**	3
15 m	0	0	1	2	**97**

Πίνακας 3.1 *Μήτρα σύγχυσης για την εκτίμηση της απόστασης στον καθεδρικό ναό (βλ. πίνακα 2.1). Οι γραμμές αντιστοιχούν στις πραγματικές αποστάσεις και οι στήλες στις εκτιμηθείσες.*

3.2 Κατηγοριοποίηση δωματίου

Βάσει της διαδικασίας που περιγράφηκε στην ενότητα 1.2, υπολογίστηκαν οι στατιστικές αμφιωτικές παράμετροι. Οι 432 παράμετροι εξάγονται από κάθε χρονικό παράθυρο του σήματος διάρκειας 2 sec. Στη συνέχεια, εξάγεται το μοντέλο κάνοντας χρήση GMM και του αλγορίθμου Expectation-Maximization (EM), k-means με 300 επαναλήψεις, 5 γκαουσιανών στοιχείων και διαγωνίων πινάκων συνδιασποράς. Για την εξαγωγή του μοντέλου (training) χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι χώροι εκτός από τους χώρους του γραφείου I, του χώρου της σκάλας και της αίθουσα συναυλιών II, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της μεθόδου. Η απόδοση της μεθόδου για όλα τα δωμάτια (βλ. πίνακα 2.1) φαίνεται στον πίνακα 3.2

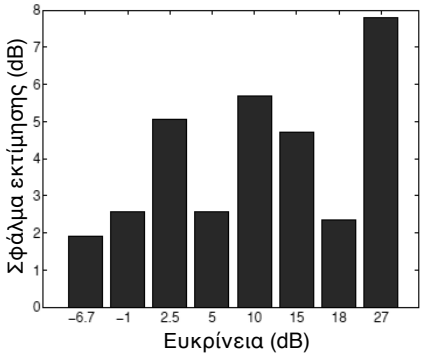
με τη μορφή μήτρας σύγχυσης. Ειναι προφανές ότι η μέθοδος μπορεί να κατηγοριοποιήσει σωστά με μέση απόδοση 70 % για τις τρεις κατηγορίες δωματίων. Οι γραμμές αντιστοιχούν στις πραγματικές κατηγορίες δωματίων και οι στήλες στις εκτιμηθείσες.

	Μικρά	**Μεσαία**	**Μεγάλα**
Μικρά	**78**	1	22
Μεσαία	5	**53**	42
Μεγάλα	6	15	**79**

Πίνακας 3.2 *Μήτρα σύγχυσης για την εκτίμηση του τύπου του δωματίου για όλα τα δωμάτια που φαίνονται στον πίνακα 2.1. Οι γραμμές αντιστοιχούν στις πραγματικές κατηγορίες δωματίων και οι στήλες στις εκτιμηθείσες.*

3.3 Εκτίμηση ακουστικής παραμέτρου ευκρίνειας

Βάσει της διαδικασίας που περιγράφηκε στην ενότητα 1.3 υπολογίστηκαν οι στατιστικές αμφιωτικές παράμετροι. Οι 432 παράμετροι εξάγονται βάσει του σχήματος 1.1(β) από κάθε χρονικό παράθυρο του σήματος διάρκειας 2 sec και γίνεται χρήση της μεθόδου απλής γραμμικής παλινδρόμησης (simple linear regression) για την εκτίμηση της ακουστικής ευκρίνειας. Το σφάλμα εκτίμησης της παραμέτρου της ακουστικής ευκρίνειας φαίνεται στο σχήμα 3.2. Ειναι προφανές ότι η μέθοδος παρουσιάζει σφάλμα από 0 ως 5 dB για όλες τις τιμές ευκρίνειας εκτός από την υψηλότερη τιμή των 27 dB. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις το σφάλμα εκτίμησης είναι χαμηλότερο από 3 dB.



Σχήμα 3.2 *Σφάλμα εκτίμησης της ακουστικής ευκρίνειας σε dB.*

4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν κάποιες στατιστικές σχέσεις που συνδέουν τα ανηχωικά σήματα και τα σήματα με αντήχηση. Βάσει των παραπάνω

σχέσεων προτάθηκε μια νέα παράμετρος για την εκτίμηση της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη. Παράλληλα, προτάθηκε ένα πλαίσιο εξαγωγής στατιστικών παραμέτρων εμπνεόμενο από την επεξεργασία που κάνει το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα. Οι παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης του τύπου του δωματίου και της παραμέτρου της ευκρίνειας. Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος ενός μελλοντικού πλαισίου εκτίμησης παραμέτρων προς τη δημιουργία ενός «ακουστικού χάρτη» ο οποίος θα μπορούσε δυνητικά να υποστηρίξει τεχνικές απαλοιφής αντήχησης, εντοπισμού της θέσης μιας ηχητικής πηγής κλπ.

5 Ταυτότητα του έργου

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

6 Αναφορές

[1] D. Wang and G. J. Brown, Eds., "Computational auditory scene analysis: Principles, Algorithms, and Applications". Wiley- IEEE, October 2006.

[2] S. Vesa, "Binaural sound source distance learning in rooms", IEEE Trans. Speech Audio Process., vol. 17, pp. 1498-1507, 2009.

[3] A. Tsilfidis, "Signal processing methods for enhancing speech and music signals in reverberant environments", PhD Thesis, University of Patras, 2011.

[4] J. A. Gubner, "Probability and Random Processes for Electrical and Computer Engineers", Cambridge University Press, 2006.

[5] J. J. Jetzt, "Critical distance measurement of rooms from the sound energy spectral response", J. Acoust. Soc. Am., vol. 65, pp. 1204-1211, 1979.

[6] E. Georganti, T. May, S. van de Par, and J. Mourjopoulos, "On the statistics of binaural room transfer functions", in 132th AES Conv. Proc., Budapest, Hungary, 2012.

[7] J. Blauert, "Spatial Hearing - The psychophysics of human sound localization". Cambridge MA: MIT Press, 1996.

[8] F. E. Toole, "Loudspeakers and Rooms for Sound Reproduction-A Scientific Review", Journal of Audio Engineering Society, Vol. 54, No. 6, June 2006.

Υλοποίηση Επεξεργαστή Ηχητικών Σημάτων με Έμφαση στα Μεταβατικά Φαινόμενα

Κωνσταντίνος Καραμήτας
Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Τεχνολογίας Υπολογιστών *
kostas.karamitas@gmail.com

ΑλέξανδροςΤσιλφίδης
Μεταδιδακτορικός ερευνητής-Διπλ. Ηλεκτρολόγος
Μηχανικός & Τεχνολογίας Υπολογιστών, MPhil, PhD *
altsilfidis@upatras.gr

ΓιάννηςΜουρτζόπουλος
Καθηγητής *
mourjop@upatras.gr

* Ομάδα Ακουστικής και Τεχνολογίας Ήχου
Τμήμα ΗλεκτρολόγωνΜηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία που ακολουθεί, προτείνεται μια υλοποίηση ενός διακριτού επεξεργαστή ηχητικών σημάτων, ο οποίος έχει την ικανότητα να ανιχνεύει τα χρονικά σημεία στα οποία παρουσιάζονται μεταβατικά φαινόμενα και να τα επεξεργάζεται διαφορετικά από ότι το υπόλοιπο σήμα. Ο επεξεργαστής λειτουργεί στο πεδίο του μετασχηματισμού Fourier βραχέως χρόνου. Αποτελείται από υπό-μονάδες που επιτελούν τους επιμέρους ρόλους της ανίχνευσης, του τεμαχισμού, του μετασχηματισμού στο πεδίο της συχνότητας, της επεξεργασίας/ φιλτραρίσματος, καθώς και της τελικής αναδόμησης του σήματος εξόδου στο πεδίο του χρόνου.

Implementation of a Transient-Aware Audio Processor

ABSTRACT

In the following paper, an effective implementation of a transient-aware processor is presented. The processor can successfully detect the transient portions of a given input audio signal and can apply different types of processing on the transient and steady state signal parts. The processing mainly takes place in the Short-Time Fourier Transform domain. The processor consists of several sub-blocks that fulfill functions such as transient detection, signal segmentation, STFT transform, processing/ filtering and signal reconstruction.

Εισαγωγή

Λόγω της αβεβαιότητας του Heisenberg, η επεξεργασία στο πεδίο του βραχύχρονου μετασχηματισμού Fourier (Short Time Fourier Transform –STFT, εμπεριέχει εγγενώς ένα συμβιβασμό μεταξύ της ακρίβειας στο χρόνο και τη συχνότητα. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά για αφαίρεση θορύβου, αφαίρεση αντήχησης, κ.α. [6] Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανάγκη για μεγάλη συχνοτική ανάλυση (η οποία προκύπτει λόγω του πλούσιου φασματικού περιεχομένου των μουσικών σημάτων), οδηγεί συχνά σε παραμόρφωση των χρονικών χαρακτηριστικών των επεξεργασμένων δειγμάτων [7]. Παρόλα αυτά, τα μεταβατικά (οι ατάκες) των σημάτων είναι πολύ σημαντικές για την υποκειμενική αντίληψη του ήχου [3].

Στην εργασία αυτή, θα παρουσιαστεί η υλοποίηση ενός επεξεργαστή διακριτών ηχητικών σημάτων με έμφαση στα μεταβατικά φαινόμενα. Ο επεξεργαστής βασίζεται στη μέθοδο του STFT και προβλέπει δυναμική μεταβολή μήκους παραθύρου ανάλογα με την παρουσία ή μη μεταβατικών φαινομένων στο σήμα εισόδου. Περιλαμβάνει επίσης μια μονάδα ανίχνευσης μεταβατικών φαινομένων (transient detector), καθώς και ένα πρακτικό πλαίσιο εφαρμογής διακριτών φίλτρων, τόσο στα μεταβατικά σημεία, όσο και στον υπόλοιπο όγκο του σήματος. Ως μεταβατικό φαινόμενο (transient) ορίζεται ένα πολύ σύντομο μη-αρμονικό σήμα που αντιστοιχεί στην έξαρση της αρχής ενός ηχητικού σήματος. Συνήθως, τα transients να συσχετίζονται αντιληπτικά με την αίσθηση της «δυναμικής» ή ακόμα και της «σαφήνειας» ενός μουσικού σήματος [1].

1. Μέθοδοι Μετασχηματισμού Fourier Βραχέως Χρόνου (STFT)

Η λειτουργία του επεξεργαστή βασίζεται στις αρχές της μεθόδου επικάλυψης-άθροισης (overlap-add). Προβλέπει τον τεμαχισμό του σήματος εισόδου και την εφαρμογή συνάρτησης παραθύρου στα μέρη του σήματος που προκύπτουν [2].

1.1 Εφαρμογή συνάρτησης παραθύρου

Η χρήση παραθύρου προκύπτει από την ανάγκη μοντελοποίησης ιδανικών συστημάτων (κρουστική απόκριση που εκτείνεται στο άπειρο), με διακριτά φίλτρα FIR. Συγκεκριμένα, ο απλούστερος τρόπος να παραχθεί ένα αιτιατό φίλτρο FIR με μια επιθυμητή κρουστική απόκριση $hd(n)$, είναι να εισαχθεί η έννοια μιας νέας κρουστικής απόκρισης $h(n)$, για την οποία θα ισχύει

$$hn=hdnw(n) \qquad (1.1)$$

όπου $w(n)$ η συνάρτηση παραθύρου. Στην πράξη, επιλέγονται συναρτήσεις παραθύρου τέτοιες ώστε οι τιμές να αποσβένουν σταδιακά προς το μηδέν καθώς φτάνουν στα όρια. Τα πιο κοινά τέτοια παράθυρα που χρησιμοποιούνται στις σημερινές εφαρμογές είναι: Bartlett, Hann, Hamming, Blackman.

1.2 Μετασχηματισμός STFT

Ο STFT ενός σήματος $x(n)$ ορίζεται γενικά ως [4]:

$$X(n,\lambda)=m=-\infty\infty x(n+m)w(m)e-j\lambda m \quad (1.2)$$

όπου $w(m)$ η συνάρτηση παραθύρου.

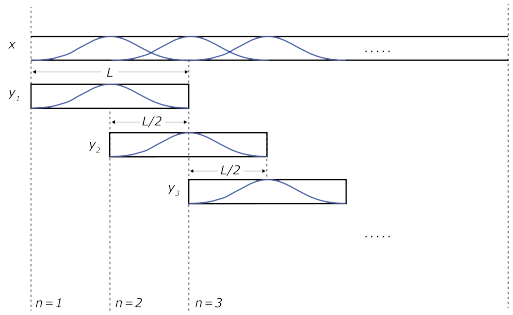
Ας υποτεθεί πως το παράθυρο έχει μήκος L δειγμάτων, οπότε και $wm=0$ εκτός του διαστήματος $0\le m\le L-1$. Δειγματοληπτώντας την εξίσωση (2) σε N ισαπέχουσες συχνότητες $\lambda k=2\pi k/N$ με $N\ge L$, ορίζεται το μέγεθος $X(n,k)$:

$$X(n,k)=X(n,2\pi kN)=m=0L-1x(n+m)w(m)e-j2\pi Nkm,\ 0\le k\le N-1 \quad (1.3)$$

Ή αλλιώς:

$$X_R(n,k)=X_R(n,2\pi kN)=$$
$$m=0L-1x_R(n+m)w(m)e-j2\pi Nkm,\ 0\le k\le N-1 \quad (1.4)$$

1.3 Επικάλυψη-Άθροιση (Overlap-Add)



Σχήμα 1.1 Μέθοδος Επικάλυψης-Άθροισης

Για να εκτελεστεί η συνέλιξη ενός απροσδιόριστα μεγάλου διακριτού σήματος $x(n)$ με το φίλτρο (FIR) $h(n)$, θα έχουμε:

$$y(n)=x(n)\ h(n)=m=-\infty\infty h(m)x(n-m)=m=1M h(m)x(n-m) \quad (1.5)$$

όπου $h(m)=0$ για τιμές του m εκτός του διαστήματος $[1,M]$. Το σήμα $x(n)$ θα διαιρεθεί σε μικρότερα μέρη μήκους L και κάθε ένα από αυτά θα συνελιχθεί με το φίλτρο:

$$x(n)=k=0\infty x_k(n-kL) \quad (1.6)$$

Η συνέλιξη γίνεται:

$$y(n)=k=0\infty x_k(n-kL)*h(n)=x(n)=k=0\infty y_k(n-kL) \quad (1.7)$$

όπου το $yk(n)=xk(n)\ h(n)$ έχει μηδενικές τιμές εκτός του διαστήματος $[1,L+M-1]$ και για κάθε $N \geq L+M-1$ ισοδυναμεί με την κυκλική συνέλιξη του σήματος $xk(n)$ με το φίλτρο $h(n)$ στην περιοχή $[1,N]$.

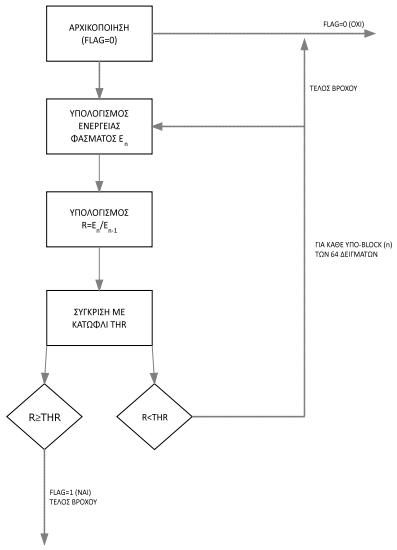
Όπως φαίνεται στο σχήμα, το σήμα $x(n)$ διασπάται αρχικά σε μη-επικαλυπτόμενα μέρη. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο DFT του $yk(n)$ ως το γινόμενο των $FFT(xkn)$ και $FFT(hn)$. Εκτελώντας αντίστροφο FFT, υπολογίζεται η έξοδος $yk(n)$, η οποία υπόκειται σε επικάλυψη και άθροιση για να επέλθει η τελική έξοδος $y(n)$ (σχήμα 1.1). Η επικάλυψη συμβαίνει γιατί η γραμμική συνέλιξη δύο σημάτων είναι πάντα μεγαλύτερη από το μήκος τους [5].

2. Μονάδα ανίχνευσης μεταβατικών φαινομένων (transient detector)

2.1 Δομή του ανιχνευτή

Το πρώτο στάδιο είναι αυτό της εισόδου. Η είσοδος μπορεί να είναι ένα block ηχητικού σήματος οποιουδήποτε μήκους. Το δεύτερο στάδιο είναι ένα υψιπερατό φίλτρο υψηλής τάξης με σχετικά μεγάλη συχνότητα αποκοπής, μια και το συντριπτικό μέγεθος της πληροφορίας που αντιστοιχεί στην παρουσία ενός transient σε κάποιο ηχητικό σήμα βρίσκεται στη ζώνη των υψηλών συχνότητων, συχνά πάνω από τα 10 kHz. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, επιλέχθηκε ένα φίλτρο τύπου Butterworth, 12ης τάξης, με συχνότητα αποκοπής τα 10 kHz. Το τρίτο στάδιο είναι αυτό του τεμαχισμού (segmentation). Το σήμα εισόδου χωρίζεται σε blocks. Στη συνέχεια ακολουθεί το τέταρτο στάδιο, το οποίο περιλαμβάνει και τον κυριότερο όγκο της επεξεργασίας. Η έξοδός του είναι το τελικό σήμα ελέγχου για την ύπαρξη ή μη ενός transient (σχήμα 2.1).

2.2 Κύριο στάδιο επεξεργασίας



Σχήμα 2.2 Λειτουργία του ανιχνευτή

Ας θεωρηθεί ότι το αρχικό σήμα έχει τεμαχιστεί σε n blocks των 64 δειγμάτων, αφού έχει προηγηθεί υψιπερατό φίλτρο. Το πρώτο βήμα για κάθε block είναι να γίνει μετασχηματισμός στο πεδίο της συχνότητας και να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια φάσματος E_n. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο λόγος R της ενέργειας του n-οστού block προς το προηγούμενο. Το μέγεθος R είναι αδιάστατο και εκφράζει το ποσοστό αύξησης της ενέργειας σε γειτονικά blocks. Η σύγκριση του R με μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου THR, θα αποδώσει το τελικό αποτέλεσμα της εξόδου. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, παρατηρήθηκε ότι τιμές κατωφλίου μεταξύ του 2.5 και του 3.5 απέδωσαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο transient detector έχει σαν έξοδο ένα σήμα ελέγχου που μπορεί να πάρει μία από δύο πιθανές διακριτές τιμές (flags): η πρώτη αντιστοιχεί στο «ΝΑΙ», οπότε κρίνεται πως στο αρχικό σήμα εισόδου βρίσκεται τουλάχιστον ένα transient και η δεύτερη στο «ΟΧΙ», οπότε το αρχικό σήμα εκτιμάται ως σταθερής κατάστασης (steady state).

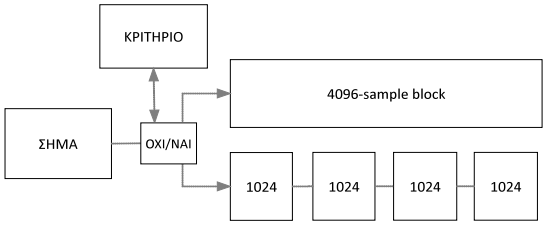
3. Υλοποιήση του επεξεργαστή

Η λειτουργία του συνολικού επεξεργαστή χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη μέθοδο επικάλυψης-άθροισης, ενώ επίσης περιλαμβάνει και το block του ανιχνευτή.

3.1 Επικάλυψη-Άθροιση Μεταβλητών Παραθύρων

Πρακτικά, υλοποιούνται δύο μέθοδοι overlap-add με τη μορφή βρόχου (σχήμα 3.1). Η πρώτη αναλαμβάνει τον τεμαχισμό σύμφωνα με το μεγάλο μήκος παραθύρου (large block) – έστω μήκος Α (στο παράδειγμα του σχήματος 3.1 το

μήκος είναι 4096 δείγματα). Στη συνέχεια, ανάλογα με την απόφαση του σήματος ελέγχου (ανιχνευτής transients), καλείται ή όχι ο δεύτερος αλγόριθμος, ο οποίος αναλαμβάνει να τεμαχίσει το μεγάλο block σε n μικρότερα μήκους A/n (small blocks). Η έξοδος του σταδίου ανασύνθεσης του δεύτερου αλγορίθμου είναι ένα block μήκους A. Ο πρώτος αλγόριθμος αναλαμβάνει το τελικό στάδιο ανασύνθεσης που θα έχει σαν έξοδο ένα ολοκληρωμένο ηχητικό σήμα.

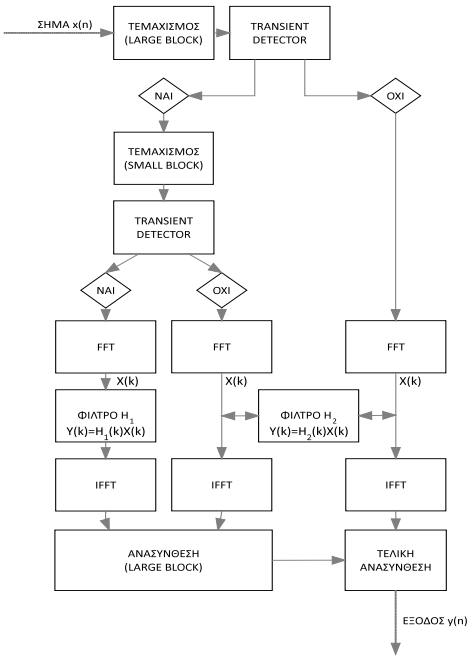


Σχήμα 3.3 Μεταβλητό μήκος παραθύρου

3.2 Ανάλυση συνολικής λειτουργίας

Το σήμα τεμαχίζεται κατά τα γνωστά της μεθόδου overlap-add. Το μέγεθος του block που θα οριστεί αρχικά, αντιστοιχεί στο μεγάλο block. Το μεγάλο block θα πάρει τυπικές τιμές μήκους από 2048 ως 8192 δείγματα. Το μικρό θα είναι υποδιαίρεση αυτού, με το μήκος του στο συγκεκριμένο παράδειγμα να ορίζεται σαν το 1/4 του μεγαλύτερου. Το σήμα για το δεύτερο επίπεδο του τεμαχισμού θα δοθεί από την έξοδο του transient detector. Ο detector θα ανιχνεύσει τα μεγάλα blocks, θα εκτιμήσει την ύπαρξη ή μη transients και στη συνέχεια, ανάλογα με την εκτίμηση, το μεγάλο block μπορεί να τεμαχιστεί περαιτέρω ή να αφεθεί ως έχει.

Αν ο δεύτερος τεμαχισμός γίνει, θα σχηματιστούν τέσσερα μικρότερα blocks που θα αντιστοιχούν στο προηγούμενο μεγαλύτερο. Από τα τέσσερα αυτά, τουλάχιστον ένα θα περιέχει ένα ή περισσότερα transients. Κάποιο ή κάποια από τα μικρά blocks ενδεχομένως να βρίσκονται σε ηρεμία. Γίνεται αναγκαίο επομένως, ο transient detector να αποφασίσει ποια από τα μικρά blocks θα υποστούν το κατάλληλο φίλτρο και ποια όχι. Για τον παραπάνω λόγο, προκύπτει μια δεύτερη βαθμίδα του detector εντός του βρόχου ανατεμαχισμού με στόχο να εντοπιστούν τα transients με ακρίβεια μικρού block.



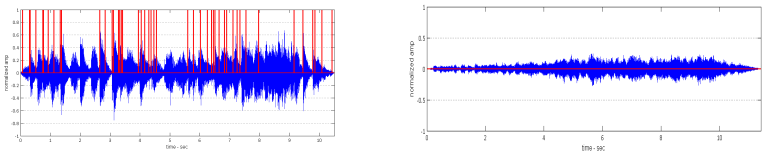
Σχήμα 3.2 Ανάλυση λειτουργίας

Σε περίπτωση που η πρώτη εφαρμογή του detector αποδώσει αρνητική εκτίμηση, το μεγάλο block μένει ως έχει και στη συνέχεια πραγματοποιείται η εφαρμογή του κατάλληλου φίλτρου. Σε περίπτωση ανατεμαχισμού, το πρώτο φίλτρο H1 θα εφαρμοστεί στα υπο-blocks με transients και το δεύτερο H2 στα υπόλοιπα υπο-blocks (σχήμα 3.2). Η έξοδος του βρόχου ανατεμαχισμού είναι ένα μεγάλο block. Τελικά, λαμβάνει μέρος η ανασύνθεση του σήματος εξόδου από το σύνολο των μεγάλων block που έχουν προκύψει.

4. Πειραματικές μετρήσεις

4.1 Απόδοση ανιχνευτή μεταβατικών φαινομένων

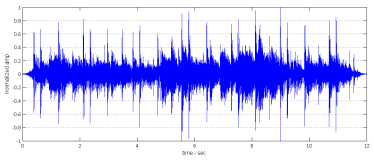
Προκειμένου να σχηματιστεί μια εικόνα της απόδοσης του ανιχνευτή, στο σχήμα 4.1 φαίνεται η έξοδος του ανιχνευτή για τυπικά σήματα μουσικής. Η ρύθμιση της τιμής κατωφλίου έγινε στην τιμή 2.3. Οι κόκκινες κατακόρυφες ευθείες σηματοδοτούν την παρουσία transient. Στο σχήμα 4.1 (α) παρουσιάζεται η απόδοση για ένα jazz σήμα με απότομα μεταβατικά. Για το σήμα αυτό ο αλγόριθμος ανίχνευσης έχει επιτυχημένα ανιχνεύσει ικανό αριθμό transients. Αντίθετα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 (β) για το σήμα κλασσικής μουσικής που έχει στατικό χρονικά περιεχόμενο ο αλγόριθμος δεν έχει δώσει false positives.



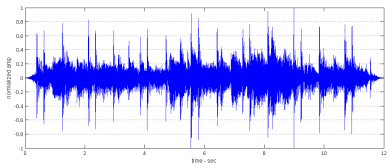
Σχήμα 4.1 (α) Miles Davis – Move και (β) Beethoven –Μέρος της 6ης συμφωνίας

4.2 Απόδοση του ολοκληρωμένου επεξεργαστή

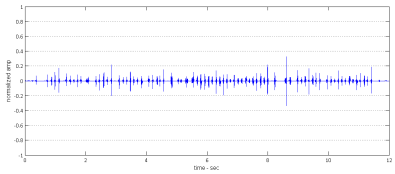
Έχοντας σαν είσοδο ένα μουσικό σήμα, καταγράφηκε το αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός φίλτρου μόνο στα transients. Το μεγάλο block ρυθμίστηκε στο μήκος των 2048 δειγμάτων, ενώ το μικρότερο στα 1024 δείγματα. Το φίλτρο που εφαρμόστηκε στα transients ήταν μια μορφή κατωδιαβατού φίλτρου, με στόχο να εξαλείψει τα μεταβατικά (ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του επεξεργαστή). Τα σχήματα 4.2–4.5 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του φιλτραρίσματος. Όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.3 και 4.4 τα περισσότερα transient σημεία του σήματος έχουν εκλείψει, ενώ από το σχήμα 4.5 φαίνεται μια αισθητή μείωση των υψηλών συχνοτήτων. Το πείραμα αυτό επιβεβαιώνει ότι η διάταξη που περιγράφηκε μπορεί να εστιάσει στην επεξεργασία των μεταβατικών ενός σήματος και να τη διαχωρίσει από την επεξεργασία των steady state σημείων.



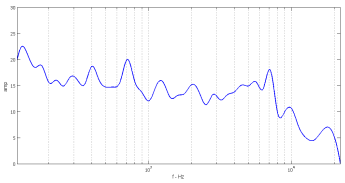
Σχήμα 4.2 Το σήμα εισόδου στο πεδίο του χρόνου



Σχήμα 4.3 Η έξοδος του επεξεργαστή



Σχήμα 4.4 Η διαφορά εισόδου-εξόδου στο πεδίο του χρόνου



Σχήμα 4.5 Η διαφορά εισόδου-εξόδου στο πεδίο της συχνότητας

5. Ευχαριστίες

Η έρευνα που κατέληξε στα αποτελέσματα αυτά χρηματοδοτήθηκε από Εθνικούς πόρους και από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2007-2013 βάσει της Σύμβασης Επιχορήγησης αριθ. ΜΙΚΡΟ2-38/Ε-ΙΙ-Α

6. Αναφορές

[1] Bosi, M. and Goldberg, *R.E. Introduction to Digital Audio Coding and Standards*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London, (2003)

[2] Dressler, «K. Sinusoidal extraction using an efficient implementation of a multi-resolution FFT», *Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06)*, Montreal, Canada, September 18-20, 2006

[3] Litovsky, R.Y., Coldburn, H.S., Yost, W.A. and Guzman, S.J. «The precedence effect», Journal of the Acoustical Society of America 106,4 pp 1633–1654, (1999)

[4] Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. and Buck, J.R. *Discrete Time Signal Processing*. Prentice Hall, USA, (1999)

[5] Orfanidis, S.J. *Introduction to Signal Processing*. Prentice Hall, USA, (1995)

[6] Tsilfidis, A. *Signal Processing Methods for Enhancing Speech and Music Signals in Reverberant Environments (Ph.D. thesis)*, University of Patras, Patras, Greece, (2011)

[7] Tsilfidis and J. Mourjopoulos, «Signal-dependent constraints for perceptually motivated suppression of late reverberation», *Signal Processing*, Volume 90, pp. 959-965, (2010)

Αιτιολογημένη εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων

Gottfried Schubert
Σύμβουλος Ακουστικής, Απόλλωνος 22, 15351 Κάντζα Παλλήνης
schubert@ath.forthnet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει δυο αναλυτικούς τρόπους εκτίμησης της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων διαμονής και δείχνει βασικές εφαρμογές των υπολογισμών. Στο γερμανικό πρότυπο VDI 4100 [1] αναφέρεται μια μέθοδος υπολογισμού του απαιτούμενου σταθμισμένου φαινομένου δείκτη ηχομείωσης $R'_{w,soll}$. W.Moll & A.Moll [2] συζητάνε μια εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων διαμονής, η οποία υπολογίζει την απαιτούμενη σταθμισμένη τυποποιημένη διαφορά ηχοστάθμης $D_{nT,w}$ για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ακουστικής άνεσης. Η ακουστική άνεση περιγράφεται με την διαφορά ΔL της στάθμης θορύβου βάθους και του σήματος το οποίο προέρχεται από το διπλανό διαμέρισμα και είναι ένα άμεσο μέτρο ηχοπροστασίας το οποίο μπορεί να μεταφραστεί σε μια ποιοτική περιγραφή. Η σύγκριση της περιγραφής με τα νούμερα δείχνει ότι η δήλωση «δεν θέλω να ακούω τίποτα από τον γείτονα» απαιτεί πολύ υψηλές ηχομονώσεις με τεράστιο κόστος εάν μπορεί να γίνει σε λογικά κατασκευαστικά πλαίσια. Παραμένει στο τέλος και στις καλύτερες κατασκευές η ανάγκη διακριτικότητας και κατανόησης μεταξύ των γειτόνων.

Reasonable determination of the required sound protection between rooms

ABSTRACT

Two analytic ways for the evaluation of the required sound protection between dwellings are discussed and basic applications of the calculations are shown. The German Guideline VDI 4100 [1] suggests a formula for the determination of the necessary sound reduction index on site $R'_{w,soll}$. W.Moll & A.Moll [2] are discussing a way to calculate the required sound protection between dwellings. Outcome of the determination is the required weighted standardized level difference $D_{nT,w}$. to obtain a certain acoustical convenience. The acoustical comfort is described by the level difference ΔL of the room back ground noise and the signal sound level coming from the neighbor home. This level difference directly characterizes the sound protection quality and can be translated into a qualitative description. The comparison of the numbers with the description will show us that the statement "I will not hear anything from the neighbor" is linked to a very high sound insulation with huge cost if at all it is possible to realize the constructions within a logical construction

framework. At the end also inside the best buildings there will be a demand for respectfulness and understanding between neighbors.

Εισαγωγή

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο για μη τεχνικούς να καταλάβουνε το αναμενόμενο επίπεδο ηχομόνωσης όταν βλέπουνε τα νούμερα που χαρακτηρίζουν τις παραμέτρους της ακουστικής άνεσης. Η δυσκολία αυτή οδηγεί σε παρεξηγήσεις μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή ή - εάν υπάρχει - μεταξύ συμβούλου ακουστικής και πελάτη. Δεν είναι λίγες φορές που μετράμε την ηχομονωτική ικανότητα δομικών στοιχείων μετά από παράπονα σχετικά με την έλλειψη της ηχομόνωσης και σε νέα διαμερίσματα. Άλλα περίμενε ο ιδιοκτήτης σύμφωνα με αυτά που του έχει εξηγήσει ο αρχιτέκτονας ή του έχει διαφημίσει ο κατασκευαστής. Υπάρχει μια ανάγκη να περιγράψουμε ποιοτικά την ηχομονωτική ικανότητα, ή γενικότερα την ακουστική άνεση χώρων, με έναν τρόπο ώστε και ο μη ακουστικά εκπαιδευόμενος να μπορεί να καταλάβει τι κατασκευάζει, νοικιάζει ή αγοράζει .

1. Η απαιτούμενη ηχοπροστασία μεταξύ χώρων

1.1 Μέθοδος υπολογισμού σύμφωνα με την Γερμανική Οδηγία VDI 4100 [1]

Η Γερμανική Οδηγία VDI 4100, 2007 [1] διαπραγματεύεται τα ακουστικά κριτήρια σχεδιασμού κατοικιών. Στο κεφάλαιο 5.1.2 αναφέρει μια σχέση για τον απαιτούμενο φαινόμενο σταθμισμένο δείκτη ηχομείωσης R'_{wsoll} ενός χωρίσματος (κατακόρυφο ή οριζόντιο) ο οποίος εξασφαλίζει έναν συγκεκριμένο βαθμό ακουστικής άνεσης. Ο βαθμός διακριτικότητας περιγράφεται με την διαφορά της στάθμης θορύβου βάθους στον χώρο του δέκτη και την ηχοστάθμη του σήματος το οποίο προέρχεται από το γειτονικό διαμέρισμα.

$$\Delta L = L_{GA} - L_{SPR}$$

L_{GA}	Στάθμη θορύβου βάθους [dB(A)]
L_{SPR}	Ηχοστάθμη του σήματος από το γειτονικό χώρο [dB(A)]

$$R'_{wsoll} = L_{wA} + 6dB - L_{GA} + \Delta L + 10\log\{(S^* 1m^2 / S_{GS} * S_{GE})\}dB + 2dB + K_i \quad (1)$$

R'_{wsoll}	Απαιτούμενο φαινόμενο σταθμισμένο δείκτη ηχομείωσης
L_{wA}	Στάθμη ακουστικής ισχύος του σήματος στον γειτονικό χώρο
S	Εμβαδόν του χωρίσματος μεταξύ χώρου πηγής και λήψης [m^2]
S_{GS}	Εμβαδόν κάτοψης στον χώρο πηγής [m^2]
S_{GE}	Εμβαδόν κάτοψης στον χώρο λήψης [m^2]
K_i	Διόρθωση σχετικά με το φάσμα του σήματος

K_i = 0 έως 5dB	Γυναικεία φωνή
K_i = 4 έως 7dB	Ανδρική φωνή
K_i = 10dB	Μουσικά όργανα ή στερεοφωνικά συγκροτήματα
K_i = 5dB	Γενικά, ήχοι κατοικίας

Ο βαθμός διακριτικότητας περιγράφεται ως εξής:

ΔL = -10dB Πλήρη κατανόηση του λόγου
ΔL = 0dB Υπάρχει ακόμα κατανόηση του λόγου
ΔL = 3dB Ακούγεται αλά χωρίς κατανόηση του λόγου
ΔL = 10dB Σχεδόν δεν ακούγεται
ΔL = 15dB Δεν ακούγεται

Οι περισσότεροι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί όπως και ο Ελληνικός Κανονισμός Κτιριακής Ηχοπροστασίας (ΕΚΚΗ-2010, Πρόταση ΕΛΙΝΑ [3]) προτείνουν ως παράμετρο αναφοράς την σταθμισμένη τυποποιημένη διαφορά ηχοστάθμης $D_{nT,w}$ και όχι τον σταθμισμένο φαινόμενο δείκτη ηχομείωσης R'_w. Για τον λόγο αυτό δεν σχολιάζουμε παραπάνω την αναφερόμενη σχέση (1) αλλά προχωράμε σε μια αιτιολογημένη εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων με την παράμετρο $D_{nT,w}$.

1.2 Η προσέγγιση κατά W.Moll & A.Moll [2]

Στο βιβλίο του W. Moll & A. Moll [2] αναφέρεται μια εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων διαμονής. Οι παράμετροι ηχοπροστασίας και ηχομόνωσης είναι:

D_{nTw}[dB] Σταθμισμένη τυποποιημένη διαφορά ηχοστάθμης
R'_w[dB] Σταθμισμένος φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης
C[dB] Φασματικός διορθωτικός συντελεστής:
- Τυπικές δραστηριότητες σε διαμερίσματα
- Τρένα μεσαίας ή υψηλής ταχύτητας
- Αυτοκινητόδρομος με ταχύτητες > 80 km/h
- Αεροπλάνο jet σε μικρή απόσταση
- Πηγές με κυρίως μεσαίες και υψηλές συχνότητες

C_{tr}[dB] Φασματικός διορθωτικός συντελεστής:
- Για την οδική κυκλοφορία εντός της πόλης
- Τρένα χαμηλής ταχύτητας
- Αεροπλάνα με έλικα
- Αεροπλάνο jet σε μεγάλη απόσταση
- Μουσική με sub woofer
- Πηγές με κυρίως χαμηλές και μεσαίες Συχνότητες

Το διαμέρισμα του γείτονα ως πηγή θορύβου και ενόχλησης περιγράφεται ως εξής:

V_1[m^3] Όγκος του χώρου της πηγής
T_1[sec] Χρόνος αντήχησης του χώρου της πηγής (μέση τιμή)

L_{wA}[dB(A)] Στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής θορύβου
L_{1A}[dB(A)] Ηχοστάθμη στον χώρο της πηγής
S[m^2] Εμβαδόν του χωρίσματος μεταξύ των γειτονικών χώρων

Το διαμέρισμα του δέκτη περιγράφεται ως εξής:

V_2[m^3] Όγκος του χώρου λήψης
T_2[sec] Χρόνος αντήχησης του χώρου λήψης (μέση τιμή)
$L_{Θ.B.}$[dB(A)] Στάθμη θορύβου βάθους του χώρου λήψης
L_{2A}[dB(A)] Ηχοστάθμη στον χώρο του δέκτη που δημιουργείται από την διπλανή πηγή

Γνωστό είναι ότι:

$$R'_w = D_{nTw} - 10 \log(V_2/S) + 5dB$$

$A = 0,16\ V/T$ Ισοδύναμη ηχοαπορροφητική επιφάνεια

Στο διάχυτο πεδίο του ήχου υπολογίζεται η ηχοστάθμη L_{pA} κατά προσέγγιση:

$$L_{pA} = L_{wA} - 10 \log(A/4)$$

Ακόμα πρέπει να ορίσουμε τον όρο της κάλυψης του ήχου (βαθμός διακριτικότητας) που έρχεται από την διπλανή πηγή (σήμα), με τον θόρυβο του περιβάλλοντος στον χώρο του δέκτη:

$$\Delta L = L_{Θ.B} - L_{2A}$$

Εδώ αρχίζει η εκτίμηση της απαιτούμενης ηχοπροστασίας μεταξύ χώρων. Την ονομάζουμε «αιτιολογημένη» γιατί κανονικά έπρεπε να υπολογίζουμε με φάσματα και όχι με σταθμισμένα μεγέθη.

Γράφουμε τον ορισμό του D_{nTw} με στάθμες dB(A) και για να γίνει αυτό προσθέτουμε το C για εσωτερικούς χώρους και το C_{tr} για την πρόσοψη ή για εσωτερικούς χώρους με πηγές ήχου χαμηλών συχνοτήτων.

$$D_{nTw} + C = L_{1A} - L_{2A} + 10 \log(T_2/T_0) \quad (2)$$

Το T_0 είναι για κατοικίες $T_0 = 0,5$ sec.

Η ηχοστάθμη στον χώρο της πηγής προκύπτει από την στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής:

$$L_{1A} = L_{wA} - 10 \log (A/4) = L_{wA} - 10 \log((0,16 * V_1)/(T_1 * 4))$$
$$L_{1A} = L_{wA} + 14dB + 10 \log(T_1/V_1)$$

$$L_{2A} = L_{Θ.B} - \Delta L$$

Και έτσι ή εξίσωση (2) γράφεται:

$$D_{nTw} + C = L_{wA} + 14dB + 10\log(T_1/V_1) - L_{\Theta.B} + \Delta L + 10\log(T_2/T_0) \quad (3)$$

Με
$10\log(T_2/T_0) = 10\log(T_2) - 10\log(0,5) = 10\log(T_2) + 3dB$

Γίνεται η εξίσωση (2)

$$D_{nTw} + C = L_{wA} + 17dB + 10\log(T_1/V_1) - L_{\Theta.B} + \Delta L + 10\log(T_2)$$

$$D_{nTw} + C = L_{wA} + 17dB + 10\log(T_1*T_2) - 10\log(V_1) - L_{\Theta.B} + \Delta L \quad (4)$$

Ο φασματικός διορθωτικός συντελεστής προκύπτει από μετρήσεις της κατασκευής και είναι περίπου:

Τοίχος ή οροφή από οπλισμένο σκυρόδεμα	C = -2 dB, C_{tr} = -6 dB
Σοβατισμένη τουβλοδομή	C = -2 dB, C_{tr} = -6 dB
Τοίχος ξηράς δόμησης	C = -3 έως -7 dB, C_{tr} = -5 έως -10 dB

Τα απαραίτητα στοιχεία για τη στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής θορύβου, και την στάθμη θορύβου βάθους στον χώρο λήψης φαίνονται στους Πίνακες 1 και 2.

Πίνακας 1 Στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής θορύβου

Στάθμη ακουστικής ισχύος της πηγής θορύβου		
Ψίθυροι	45	dB(A)
Χαμηλή φωνή	61	dB(A)
Μεσαία φωνή	68	dB(A)
Υψωμένη φωνή	74	dB(A)
Δυνατή φωνή	82	dB(A)
Κραυγή	90	dB(A)
Πιάνο	95	dB(A)
Δυνατή ομάδα παιδιών	85	dB(A)
Στερεοφωνικό συγκρότημα	85	dB(A)
Ομάδα εγχόρδων οργάνων	80	dB(A)

Πίνακας 2 Στάθμη θορύβου βάθους του χώρου λήψης

Στάθμη θορύβου βάθους		
Πολύ ήσυχος χώρος - νύχτα	15	dB(A)
Πολύ ήσυχος χώρος - ημέρα	20	dB(A)
Χώρος διαμονής προς ήσυχο δρόμο - παράθυρα κλειστά - ημέρα	25-30	dB(A)
Πολύ ήσυχο γραφείο	30	dB(A)
Γραφείο	40	dB(A)
Γραφείο πολλών θέσεων εργασίας	50	dB(A)

Με τα στοιχεία που δόθηκαν μπορεί να γίνει η περιγραφή του βαθμού διακριτικότητας σε σχέση με την απαιτούμενη σταθμισμένη τυποποιημένη διαφορά ηχοστάθμης D_{nTw}.

2. Εφαρμογή

2.1 Δωμάτια ξενοδοχείου

Η ακουστική άνεση σε δωμάτια ξενοδοχείου εξαρτάται από την στάθμη θορύβου του συστήματος κλιματισμού. Με μια υψηλή στάθμη θορύβου του fan coil δεν είναι εύκολο να κοιμάται κανείς. Δεν είναι όμως επιθυμητό να έχουμε πολύ χαμηλές στάθμες θορύβου κλιματισμού γιατί με τον θόρυβο του κλιματιστικού συστήματος καλύπτονται ήχοι από διπλανά δωμάτια. Την κατάσταση περιγράφει η ακόλουθη εφαρμογή της σχέσης (4).

Τα διπλανά δωμάτια ξενοδοχείου περιγράφονται ως εξής:

$V_1 = V_2 = 50$ m^3

$T_1 = T_2 = 0,5$ sec

Πηγή: δυνατή φωνή κατά την διάρκεια έκφρασης ιδιαίτερης χαράς

$L_{wA} = 82$ dB(A)

Το δωμάτιο λήψης έχει μια τοπική μονάδα κλιματισμού (fan coil) και η στάθμη θορύβου βάθους είναι $L_{Θ.Β.} = 35$ dB(A).

Για να μην ακούγεται η δυνατή φωνή σχεδόν καθόλου (ΔL=10 dB) στο δωμάτιο λήψης πρέπει να έχουμε $D_{nTw} + C = 51$ dB. Όταν η κατασκευή των διαχωριστικών τοίχων του ξενοδοχείου γίνεται με συστήματα ξηράς δόμησης, τότε το C είναι – 5 dB και το απαιτούμενο $D_{nTw} = 56$ dB.

Στην περίπτωση που το δωμάτιο του ξενοδοχείου δεν έχει κλιματισμό με τοπικές μονάδες αλά τροφοδοτείται από μια κεντρική μονάδα κλιματισμού (all air) ή στάθμη θορύβου βάθους μπορεί να είναι $L_{Θ.Β.} = 25$ dB(A). Για να μην ακούγεται η δυνατή φωνή σχεδόν καθόλου στο δωμάτιο λήψης πρέπει να έχουμε $D_{nTw} + C = 61$ dB και το απαιτούμενο $D_{nTw} = 66$ dB (C = -5 dB).

2.2 *Κατοικίες – οροφοδιαμερίσματα – νύχτα, με μουσική στο living room του γείτονα*

Τα οροφοδιαμερίσματα περιγράφονται ως εξής:

$V_1 = 120$ m^3 living room, $V_2 = 50$ m^3 υπνοδωμάτιο

$T_1 = 1,2$ sec, $T_2 = 0,5$ sec

Πηγή: στερεοφωνικό συγκρότημα με sub woover

L_{wA} = 85 dB(A)

Το δωμάτιο λήψης είναι πολύ ήσυχο την νύχτα $L_{Θ.Β.}$ = 15 dB(A).

Για να μην ακούγεται η μουσική από το living room του γείτονα στο υπνοδωμάτιο σχεδόν καθόλου (ΔL = 10 dB) πρέπει να έχουμε μια τιμή $D_{nTw} + C_{tr}$ = 74 dB.

Η κατασκευή της οροφής είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και το C_{tr} είναι – 6 dB και το απαιτούμενο D_{nTw} = 80 dB. Αυτό είναι εφικτό μόνο με κατασκευές «χώρο μέσα στον χώρο» με ιδιαίτερα απαιτητικές κατασκευές.

Τα πράγματα είναι πιο βατά όταν έχουμε ένα σύστημα κλιματισμού (η πολύ ησυχία βλάπτει τον κατασκευαστή) και έτσι έχουμε μια στάθμη θορύβου βάθους στον χώρο λήψης $L_{Θ.Β.}$ = 35 dB(A). Για να μην ακούγεται η μουσική σχεδόν καθόλου στο δωμάτιο λήψης (ΔL = 10 dB) πρέπει να έχουμε $D_{nTw} + C_{tr}$ = 54 dB. Η κατασκευή της οροφής είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και το C_{tr} είναι – 6 dB και το απαιτούμενο D_{nTw} = 60 dB.

2.3 Κατοικίες – οροφοδιαμερίσματα – ημέρα, με υψωμένη φωνή στο living room του γείτονα

Τα οροφοδιαμερίσματα περιγράφονται ως εξής:

V_1 = 120 m^3 living room, V_2 = 120 m^3 living room

T_1 = 1,2 sec, T_2 = 1,2 sec

Πηγή: υψωμένη φωνή

L_{wA} = 74 dB(A)

Η στάθμη θορύβου βάθους του χώρου λήψης την ημέρα είναι με κλειστά παράθυρα $L_{Θ.Β.}$ = 30 dB(A).

Για να ακούγεται ελάχιστα η φωνή στο δωμάτιο λήψης (ΔL = 7 dB) πρέπει να έχουμε D_{nTw} + C = 49 dB. Η κατασκευή της οροφής είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και το C είναι – 2 dB και το απαιτούμενο D_{nTw} = 51 dB.

3. Συμπεράσματα

Η αναφερόμενη σχέση (4) μας προσφέρει ένα ικανό εργαλείο για την πρόβλεψη της σταθμισμένης τυποποιημένης διαφοράς ηχοστάθμης D_{nTw} η οποία βασίζεται στην περιγραφή του βαθμού διακριτικότητας ΔL. Η συστηματική εφαρμογή των υπολογισμών δείχνει τις δυσκολίες μελέτης με το κριτήριο του πελάτη «δεν θέλω να ακούσω τίποτα από δίπλα» και τις οικονομικές επιπτώσεις των επιλογών. Παραμένει στο τέλος και στις καλύτερες κατασκευές η ανάγκη διακριτικότητας και κατανόησης μεταξύ των γειτόνων.

4. Αναφορές

[1] VDI 4100 *Noise control in dwellings – Criteria for planning and assessment* Γερμανική Οδηγία, 2007

[2] W. Moll & A. Moll *Schallschutz im Wohnungsbau* (Ηχοπροστασία στην κατασκευή διαμερισμάτων), Ernst & Sohn Berlin (2011)

[3] ΕΚΚΗ-2010 *Πρόταση επιτροπής του ΕΛΙΝΑ για την αναμόρφωση του Ελληνικού Κανονισμού Κτιριακής Ηχοπροστασίας*

http://www.helina.gr/images/stories/TECHNICAL_DOCS/HELINA_EKKH.pdf

Ηχομόνωση και Διαρρύθμισης της Νεοελληνικής Κατοικίας : οι δεκαετίες 20 - 30

Ρίκα Δεληγιαννίδου, διδάσκουσα ΠΔ407/80, υποψήφια διδάκτωρ ΤΑΜ-ΔΠΘ, email : rika_del5@yahoo.gr
Νίκος Μπάρκας, αναπλ. καθηγητής ΤΑΜ-ΔΠΘ, email : nbarkas@arch.duth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα ανακοίνωση αποτελεί τμήμα μιας υπό εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο πεδίο της κτιριακής ακουστικής με στόχο την αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης και της ηχομονωτικής ικανότητας των κτιρίων κατοικιών κατά τη διαχρονική εξέλιξη του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Η ανακοίνωση επικεντρώνεται στις δεκαετίες 1920-1930 και επιχειρεί την τεχνολογική αποτίμηση των επιμέρους λειτουργικών διευθετήσεων. Σε συνέχεια προηγούμενων δημοσιεύσεων σχετικά με την υπολογιστική διερεύνηση των επιμέρους οικοδομικών εφαρμογών σε ποικίλες περιπτώσεις γειτονικών οικιακών χρήσεων, στόχος της διαπραγμάτευσης είναι να καταγραφούν τα κοινά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των κτιρίων κατοικίας εκείνης της εποχής και να αξιολογηθούν σε αναφορά με τα κριτήρια εσωτερικής ησυχίας του Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12).

Sound isolation and layout of the modern Greek residences: the decades from 20 to 30

ABSTRACT

The present statement is a part of a doctoral thesis in the field of building acoustics which aims to study the evaluation of the acoustic comfort and the sound isolation ability of residential buildings as architectural design evolves. The statement concentrates on the decades 1920-1930 and attempts to research the technological assessment of individual functional regulations. Fallowing previous announcements relevant to calculating research of the building applications in various occasions, in relevant house hold uses; the aim of the negotiation is to identify the common characteristics of residential building design of that era, in relation to the imposed criteria of internal quietness of the building regulations (Article 12).

1.Εισαγωγή

Στην παρούσα ανακοίνωση επιχειρούμε να διερευνήσουμε τη διαρρύθμιση και την οργάνωση των κτιρίων κατοικίας κατά τις δεκαετίες 1920-1930, με στόχο την αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης και της ηχοπροστασίας των ενοίκων. Η έρευνα αναφέρεται σε ένα δείγμα χαρακτηριστικών αρχιτεκτονικών εφαρμογών της συγκεκριμένης ιστορικής περιόδου [1], [2] και διερευνά σε επίπεδο κάτοψης το χειρισμό των σύνθετων καθημερινών λειτουργιών (σάλο-κουζίνα), αλλά και τις διευθετήσεις του εσωτερικού χώρου για την επίλυση θεμάτων οικιακής αυτονομίας (προθάλαμος) και ιδιωτικότητας (διάδρομοι).

Η πλήρης διαπραγμάτευση του θέματος επιβάλλει την προσέγγιση των συνθηκών σχεδιασμού σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις του οικοδομικού κανονισμού της εποχής, τις κοινωνικές, πολιτικές και οικονομικές συνθήκες του μεσοπολέμου, καθώς επίσης και τη μετάγγιση των διεθνών αρχιτεκτονικών αντιλήψεων στον ελληνικό χώρο, δηλαδή ένα σύνολο ζητημάτων που επηρέασαν τον κύκλο παραγωγής των κτιρίων κατοικίας, αλλά δεν είναι εφικτό να αναλυθούν στο πλαίσιο της παρούσας ανακοίνωσης. Συνοπτικά, πρόκειται για ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων που περιλαμβάνει τις διαμορφούμενες κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες στην Ελλάδα του μεσοπολέμου, τις διαχειριστικές δυνατότητες του κρατικού μηχανισμού (αναφορικά με την εφαρμογή της οικιστικής πολιτικής και της τεχνικής νομοθεσίας), την πολεοδομική οργάνωση, τα δομικά υλικά και τις τεχνολογίες κατασκευής, τα οικοδομικά συνεργεία και τον κλάδο των μηχανικών καθώς και την επιρροή των ξένων αρχιτεκτονικών ρευμάτων. [3]

Η ανάγκη για κατασκευή πολυώροφων κτηρίων στα αστικά κέντρα προέκυψε από τη ραγδαία αύξηση αστικού πληθυσμού εξαιτίας της σταδιακής παλιννόστησης που ακολούθησε την πρώτη περίοδο της ανεξαρτησίας του ελληνικού κράτους και η οποία κορυφώθηκε την περίοδο μετά τη μικρασιατική καταστροφή, εξαιτίας της βίαιης μετεγκατάστασης μεγάλου αριθμού προσφύγων στον ελλαδικό χώρο. Η αρχική συνήθεια των εύπορων ομογενών της διασποράς να επενδύουν σε αστικά ακίνητα (μετά τη δημιουργία του σύγχρονου ελληνικού κράτους), εξελίχθηκε σε τάση κατά την περίοδο της νομισματικής αστάθειας (εξαιτίας και της συνεχούς διολίσθησης της δραχμής κατά την περίοδο 1919-1927), η κορύφωση της οποίας εκτίναξε τις τιμές των ενοικίων και διαμόρφωσε τις προϋποθέσεις για αποδοτικές επενδύσεις κεφαλαίου σε αστικά ακίνητα. [1] Αρχικά η χρηματοδότηση των οικοδομικών έργων γίνεται κατά βάση με ιδιωτικά κεφάλαια (ή σπάνια με μικρή συγχρηματοδότηση από την Τράπεζα της Ελλάδος). Δεδομένων λοιπόν των στενών ορίων του επενδυόμενου κεφαλαίου, ο νέος κτηριακός τύπος περιορίζεται συνήθως στις στεγαστικές ανάγκες της οικογενειακής μετεγκατάστασης των πλουσίων ομογενών ή στις οικονομικές δυνατότητες των επενδυτών - κατασκευαστών. [1], [2]

Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι, στο παραπάνω πλαίσιο του κύκλου παραγωγής κατοικίας, τα κτίρια της εποχής προορίζονται κυρίως για τα ανώτερα και μεσαία κοινωνικά στρώματα, με αποτέλεσμα η διαρρύθμιση και οργάνωση των εσωτερικών χώρων να προσαρμόζεται στην εξυπηρέτηση των συγκεκριμένων αναγκών τους. [1] Χαρακτηριστικό γνώρισμα της οργάνωσης των κατόψεων, σε όλους στους τυπικούς ορόφους των κτιρίων της εποχής είναι η διαμόρφωση εκτεταμένων βοηθητικών χώρων (δωμάτια εργασίας και ανάπαυσης του προσωπικού), μια οικιακή ζώνη που

συμπυκνώνει τους αντίστοιχους χώρους των παλιότερων αρχοντικών μονοκατοικιών και προορίζεται αποκλειστικά για τη λειτουργία του υπηρετικού προσωπικού.

Αξιοσημείωτο επίσης της ανοικοδόμησης των δεκαετιών που προηγήθηκαν, είναι η απουσία ενός ενιαίου θεσμικού πλαισίου, καθώς οι πόλεις χτίζονται με βάση ειδικά βασιλικά διατάγματα που περιορίζονται κυρίως σε καθορισμό του ύψους, σε θέματα υγιεινής, χρωμάτων και χρήσεων γης. Σταθμός, λοιπόν, στη διαμόρφωση των εθνικών κανόνων δόμησης της χώρας είναι η διατύπωση του πρώτου Γενικού Οικοδομικού Κανονισμού (1929), στα 142 άρθρα του οποίου καθορίζονται :
-η ασφάλεια και οι ανέσεις του κτιρίου (δομοστατικά, πυρασφάλεια, φωτισμός, αερισμός, θέα, Η/Μ εγκαταστάσεις),
-η επάρκεια των μελετών (τοπογραφικά, χάρτες, περιεχόμενα, δικαιολογητικά κλπ.),
-η θέση της οικοδομής στο οικόπεδο, η εμφάνιση και οι σχέσεις της με τα όμορα οικόπεδα (συνεχές - ασυνεχές ή πανταχόθεν ελεύθερο σύστημα, ακάλυπτοι χώροι, ελάχιστα όρια οικοπέδου κλπ.). [4]

Ειδικά ως προς τον εσωτερικό χώρο των διαμερισμάτων, ο ΓΟΚ 1929 αναφέρεται σε θέματα που αφορούν τον αερισμό, τη θέση, τη θέα και την ποσότητα φωτισμού των χώρων διημέρευσης / διανυκτέρευσης, τα ελάχιστα όρια επιφάνειας και όγκου των διαμερισμάτων, τον αριθμό και τη θέση των WC, τις εγκαταστάσεις πάσης φύσης αγωγών και σωληνώσεων. [4] Αντίθετα, ουδεμία αναφορά γίνεται σε θέματα ακουστικής άνεσης και ηχομόνωσης, τόσο στις οικοδομικές εφαρμογές (κέλυφος, οριζόντια και κατακόρυφα διαχωριστικά), όσο και στις μονώσεις ή τις Η/Μ εγκαταστάσεις (σωληνώσεις κλπ).

Κρίσιμη καμπή στην επίλυση του στεγαστικού προβλήματος ήταν η θεσμοθέτηση της οριζόντιας ιδιοκτησίας (αρχικά το 1927 για τις προσφυγικές πολυκατοικίες και στη συνέχεια το 1929 για κάθε είδους κτήριο, σε όλη την επικράτεια), που σε αντίθεση με τον προϋπάρχοντα θεσμό της αποκλειστικής ιδιοκτησίας (που περιόριζε την ανοικοδόμηση σε κτίρια μικρής κλίμακας) διευκόλυνε την κατοχή μιας οικοδομής από διάφορα φυσικά πρόσωπα, (με την απόλυτη κυριότητα σε ένα μόνο όροφο ή διαμέρισμα) και έδωσε το έναυσμα για την περεταίρω ανάπτυξη της αστικής πολυκατοικίας στην Ελλάδα.[1] Η κατασκευή πολυώροφων κτιρίων απέδωσε βαρύνουσα σπουδαιότητα στους τεχνικούς κλάδους της παραγωγής (πολιτικοί και αρχιτέκτονες μηχανικοί στη μελέτη / επίβλεψη και συνεργεία οικοδομικών εργασιών στην κατασκευή), η οποία ενισχύθηκε επίσης από τις τεχνολογικές δυνατότητες παραγωγής σκυροδέματος και σιδηρουργίας στον ελλαδικό χώρο. Παράλληλα, οι αρχιτέκτονες αντιμετωπίζουν θετικά το νέο τύπο κτιρίου (το ψηλό κτήριο) υιοθετώντας τις αρχές του μοντέρνου κινήματος. Οι επιδράσεις της μοντέρνας αρχιτεκτονικής γίνονται φανερές στον τρόπο εσωτερικής οργάνωσης των λειτουργικών ενοτήτων στα διαμερίσματα, αλλά και στην προσπάθεια εφαρμογής μιας αρχής «ελάχιστης κατοικίας» κατά το σχεδιασμό των επιμέρους χώρων τους. [1], [2]

2. Η μεθοδολογία της έρευνας

Η ανακοίνωση επικεντρώνεται στην ποιοτική αξιολόγηση της διαρρύθμισης και της οργάνωσης των εσωτερικών διευθετήσεων σε ένα δείγμα δεκατεσσάρων (14) διαμερισμάτων σε τυπικούς ορόφους αστικών πολυκατοικιών της περιόδου 20 - 30. Για τις ανάγκες της παρουσίασης οι επιλεγμένες κατόψεις αναλύθηκαν χρωματικά

σύμφωνα με την οργάνωση της εσωτερικής λειτουργίας των κατοικιών και το διαχωρισμό κάθε διαμερίσματος σε επιμέρους ζώνες, με σκοπό να κατανοηθεί η λογική του σχεδιασμού, αλλά και τα λειτουργικά δεδομένα των χρηστών στους οποίους απευθύνθηκε. Οι παράμετροι ελέγχου που τέθηκαν για την ποιοτική αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης των κτιρίων του δείγματος είναι :
-η διαμόρφωση κλειστού προθαλάμου, χολ και διαδρόμων,
-ο εξοπλισμός των παραπάνω διαχωριστικών με εσώθυρες,
-ο διαχωρισμός του σαλονιού από την τραπεζαρία και
-η θέση της κουζίνας σε σχέση με τους κύριους ή βοηθητικούς χώρους.

Στη συνέχεια τίθενται εκτιμήσεις, αναφορικά με την ποσοτική προσέγγιση του θέματος, ως προς τις πιθανές πηγές και τις στάθμες ηχητικής όχλησης (εσωτερικές / εξωτερικές), αποτιμώνται τεχνολογικά οι εφαρμοζόμενες οικοδομικές επιλύσεις της εποχής και συγκριτικά (με βάση αντίστοιχες προγενέστερες δημοσιεύσεις) [3], [5] επιχειρείται η αξιολόγηση της προσφερόμενης ακουστικής άνεσης των ενοίκων, σύμφωνα με τα κριτήρια του ισχύοντος Κτιριολογικού Κανονισμού (άρθρο 12).

3. Ανάλυση των ευρημάτων της έρευνας

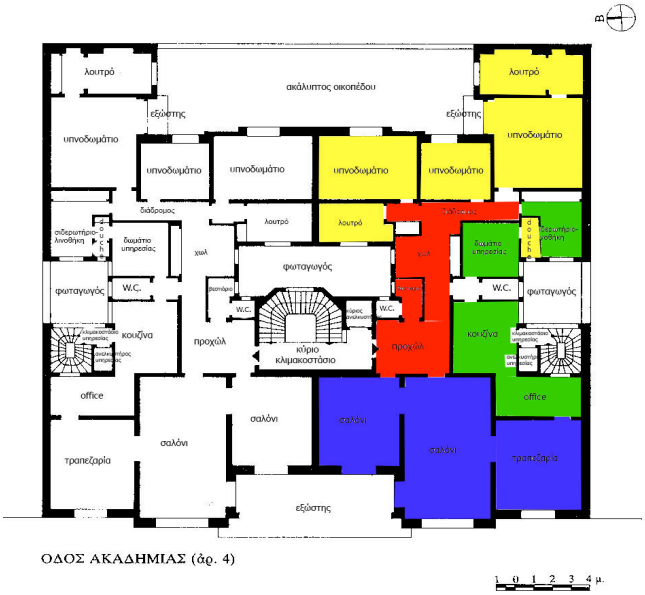
Για την οικονομία της δημοσίευσης παραθέτουμε και σχολιάζουμε δύο (2) χαρακτηριστικά παραδείγματα από το δείγμα της έρευνας (σχέδια 3.1 και 3.2).



Σχέδιο 3.1 Πολυκατοικία του Β. Κ. Δημητριάδη, Πλουτάρχου 24 και Αλωπεκής (Δημ. Φωτιάδης, 1928) [1]

Όπως φαίνεται στα σχέδια κατόψεων, η αρχιτεκτονική συλλογιστική εκείνης της εποχής έχει την τάση να ομαδοποιεί τους χώρους με συγγενή ή συμπληρωματική χρήση και να προσδιορίζει με ιδιαίτερη προσοχή τον τρόπο επικοινωνίας των επιμέρους ενοτήτων.
Αναλυτικά, οι κατοικίες διαχωρίζονται σε τέσσερεις (4) διαφορετικές λειτουργικές ενότητες:
-ενότητα Α : χώροι υποδοχής (κόκκινο χρώμα), προχώλ ή χωλ εισόδου, διάδρομος,

-ενότητα Β : χώροι κύριας χρήσης / διημέρευσης (μπλε χρώμα), σαλόνι, τραπεζαρία, γραφείο.
-ενότητα Γ: χώροι ύπνου / ανάπαυσης (κίτρινο χρώμα), υπνοδωμάτια (με ανεξάρτητο διάδρομο πρόσβασης) και λουτρό ή WC εξυπηρέτησής τους,
-ενότητα Δ: βοηθητικοί χώροι (πράσινο χρώμα), κουζίνα, δωμάτιο υπηρεσίας, office, αποθήκη, κάβα (συνήθως με ξεχωριστή είσοδο ή / και κλιμακοστάσιο πρόσβασης κατά περίπτωση).



Σχέδιο 3.2 Πολυκατοικία Ε. Θεολούρη, Ακαδημίας 4 (Δημ. Φωτιάδης, 1936)[1]

Παρά την ποικιλία των επιλύσεων, οι κατόψεις εμφανίζουν πολλά κοινά (ουσιαστικά και τυπικά) χαρακτηριστικά, αποκαλύπτοντας την κοινή στρατηγική του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού :
-σαφής διαχωρισμός των επιμέρους ενοτήτων,
-τυπική διαμόρφωση κλειστής εισόδου (διαχωριστικά με εσώθυρες) με προχώλ ή χωλ αξιοσημείωτων διαστάσεων,
-κουζίνα απομακρυσμένη από τους κύριους χώρους διημέρευσης και ενταγμένη στο σύμπλεγμα των βοηθητικών χώρων (συνήθως γειτονικά στο δωμάτιο υπηρεσίας),
-σαλόνι και τραπεζαρία ως διακεκριμένοι χώροι, είτε διαχωρισμένοι με θύρα, είτε με την παρεμβολή γραφείου.
Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι στα τέλη της δεκαετίας του ’30 διαφαίνεται μια νέα τάση χωροθέτησης της κουζίνας κοντά στους χώρους διημέρευσης.

Τα δεδομένα της ανάλυσης καταγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1 (με μαύρο κύκλο η θετική παρατήρηση, με κενό η έλλειψη), όπου οι οριζόντιες γραμμές αφορούν το σύνολο των κατοικιών του δείγματος :

1. *1925,* Γ. Γαλανάκης, Γ' Σεπτεμβρίου 130 και Κοδριγκώνος 28, Αθήνα

2. *1928,* Δ. Φωτιάδης, Πλουτάρχου 24 και Αλωπεκής, Αθήνα
3. *1929,* Δ. Φωτιάδης, Ηροδότου 11 και Νεοφ. Δούκα 12, Αθήνα
4. *1930*, Κυπρ. Μπίρης, Κουντουριώτη 2-6 και Μπουμπουλίνας, Αθήνα
5. *1931,* Ξ. Αγγελίδης, Παπαδιαμαντοπούλου 16, Αιγηνίτου και Σισίνη, Αθήνα
6. *1932,* Δ. Φωτιάδης, Βασ. Σοφίας 6-8 και Μουρούζη 7-9, Αθήνα
7. *1933*, Χ. Καζόγλου, Συγγρού 12, Αθήνα
8. *1933,* Κ. Παναγιωτάκος, Αραχώβης 61 και Θεμιστοκλέους 80, Αθήνα
9. *1934,* Ε. Κριεζής, Πατησίων 59 και Σκαραμαγκά, Αθήνα
10. *1934,* Α. Κριεζής, Ομήρου 54, Αθήνα
11. *1936,* Δ. Φωτιάδης, Ακαδημίας 4, Αθήνα
12. *1938,* Περ. Σακελλάριου, Παπαδήμα 2, Αθήνα
13. *1938,* Λ. Μπόνης, Επτανήσου 3 και Πιπίνου, Αθήνα
14. *1939,* Αλ. Φραγκίδης, Ηρακλείτου 16, Αθήνα

ενώ, οι κατακόρυφες στήλες τις παραμέτρους ελέγχου του δείγματος :

Α. ύπαρξη (ή έλλειψη) προθαλάμου,
Β. ύπαρξη (ή έλλειψη) χωλ,
Γ. διαχωρισμός προθαλάμου / χωλ με εσώθυρες,
Δ. διαχωρισμός σαλονιού από την τραπεζαρία,
Ε. διαμόρφωση ενιαίας σαλο-τραπεζαρίας,
ΣΤ. γειτνίαση της κουζίνας με το σαλόνι / την τραπεζαρία και
Ζ. ομαδοποίηση κουζίνας / βοηθητικών χώρων σε ανεξάρτητη ζώνη.

Πίνακας 3.1.
Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων της έρευνας (14 διαμερίσματα)

Δεκαετίες 1920-1930	Α	Β	Γ	Δ	Ε	ΣΤ	Ζ
1		●	●	●			●
2	●	●	●	●			●
3	●	●	●	●			●
4		●	●	●			●
5		●	●				●
6		●	●	●			●
7	●	●	●	●			●
8	●	●	●	●			●
9	●	●	●	●		●	
10	●	●	●	●			●
11	●	●	●	●		●	
12		●	●	●		●	
13	●	●	●	●			●
14	●	●	●	●		●	

4. Παραδοχές, εκτιμήσεις και συζήτηση

Ο προσδιορισμός της διαχρονικής ακουστικής άνεσης στο εσωτερικό ενός χώρου προκύπτει από το συνδυασμό τριών (3) βασικών παραμέτρων :
-το επιβεβλημένο κριτήριο εσωτερικής ησυχίας (μέγιστα επίπεδα θορύβου 30/35dB, κατά την ισχύουσα άνεση κατηγορίας Α' ή Β' ποιότητας),
-την ηχομονωτική ικανότητα του κελύφους και των εσωτερικών διαχωριστικών,
-τις αναμενόμενες πηγές θορύβου και περιστάσεις γειτνίασης.

Συγκροτώντας ένα κατάλογο ενδεχόμενων θορύβων από τέσσερις (4) αξιόπιστες βιβλιογραφικές βάσεις δεδομένων, σε σύνολο 117 πηγών μπορούμε να διακρίνουμε:
-34 εσωτερικοί θόρυβοι, αναμενόμενοι κατά τις δεκαετίες 20-30 (από 50 ως 70dB, με μέγιστο τα κλασικά μουσικά όργανα : 92dB),
-49 εσωτερικοί θόρυβοι, αναμενόμενοι αποκλειστικά κατά τις πρόσφατες δεκαετίες (από 70 ως 90dB, με μέγιστο τα στερεοφωνικά μηχανήματα : 103dB),
-34 σύγχρονοι εξωτερικοί θόρυβοι (από 80 ως 100dB). [6], [7], [8], [9], [10]
Διαπιστώνουμε λοιπόν την αδιαμφισβήτητη, διαχρονική αύξηση του επιπέδου των πηγών εσωτερικού θορύβου κατά περίπου 15 ως 20dB (εξαιτίας της μηχανοποίησης των οικιακών δραστηριοτήτων).

Σε προηγούμενη ανακοίνωση [5], μελετώντας σύγχρονα κτίρια κατοικίας διαπιστώσαμε ότι σε συνήθεις, τυπικές εκδοχές διαρρύθμισης οι αναμενόμενες περιστάσεις γειτνίασης εμφανίζουν τις παρακάτω ελλείψεις :
-όχληση χώρων διημέρευσης από διαρρύθμιση σαλο-κουζίνας 11dB,
-λειτουργία κοινόχρηστου WC γειτονικά σε υπνοδωμάτιο 12dB,
-επιρροή ανοικτού προθαλάμου και διαδρόμου από κλιμακοστάσιο 14dB.
Διερευνώντας συγκριτικά την ηχομονωτική ικανότητα των εσωτερικών διαχωριστικών τοιχωμάτων, διαπιστώνουμε τη διαχρονική συρρίκνωση της ηχομονωτικής ικανότητας τους :
-κατά περίπου 6dB εξαιτίας της μείωσης των τυπικών συμπαγών διατομών (2-3cm στα διαχωριστικά του ίδιου διαμερίσματος και 5-7cm μεταξύ διαμερισμάτων),
-κατ' ελάχιστο 14dB εξαιτίας της κατάργησης των κλειστών προθαλάμων και διαδρόμων (μείωση που στις περιπτώσεις των διπλών και επάλληλων κλειστών προθαλάμων / διαδρόμων των δεκαετιών 20 - 30, δύναται να φτάσει ακόμη και 28dB).

Υπογραμμίζουμε με έμφαση πως, κρίσιμο μέγεθος κατά την αξιολόγηση της εσωτερικής άνεσης αποτελεί και ο εξωτερικός θόρυβος του περιβάλλοντος (πολύπαραμετρική συνιστώσα που εξαρτάται από τη θέση του κτιρίου στον αστικό ιστό, από την αναλογία των ανοιγμάτων, αλλά κυρίως από την ποιότητα των εξωτερικών/ διαφανών κουφωμάτων), ενεργειακή συνιστώσα της ηχορρύπανσης που προσδιορίζει ουσιαστικά την υποκειμενική επίδραση των εσωτερικών θορύβων [10], [11], [12]. Προς τούτο, συγκρίνοντας τη διαχρονική εξέλιξη της ακουστικής άνεσης με τις αντίστοιχες οικοδομικές εφαρμογές στο κέλυφος, επισημαίνουμε ότι :
-η ωριαία ισοδύναμη ηχοστάθμη του αστικού θορύβου αυξάνει σταδιακά κατά περίπου 15dB (από 65dB κατά τις δεκαετίες 20 - 30 σε 80dB κατά τη σύγχρονη εποχή), εξαιτίας της πύκνωσης της κυκλοφορίας και της διάχυσης των Η/Μ εφαρμογών,
-σε αντιστάθμισμα, η ηχομονωτική ικανότητα των γυάλινων κουφωμάτων ισχυροποιείται τελικά κατά 6 ως 8dB (από 24 σε 32dB, χάρη στην προσπάθεια μείωσης των θερμικών απωλειών) και
-παράλληλα, διευρύνεται η συνήθης αναλογία των ανοιγμάτων στις κεντρικές προσόψεις των κτιρίων κατοικίας (από 1 : 4 ως 5, σε 1 : 2 ως 3), σύμφωνα με το κυρίαρχο αρχιτεκτονικό αίτημα της οικοδομικής διαφάνειας.[13]
Συνοπτικά, οι παραπάνω αντιφατικές εξελίξεις οδηγούν :
-στη διαχρονική εξασθένιση της ηχομονωτικής ικανότητας του συμπαγούς κελύφους εξαιτίας των ανοιγμάτων (από -17 ως -22dB κατά τις δεκαετίες 20-30, σε -25 ως -30dB κατά τη σύγχρονη εποχή) [8], με αποτέλεσμα
-την απομείωση της σύνθετης ηχομονωτικής ικανότητας του συγχρόνου κελύφους, κατ' ελάχιστο 5dB (από 35-40dB σε 30-35dB) και επομένως

-σε μια εκτιμώμενη διαχρονική πτώση της ακουστικής άνεσης των κατοικιών κατά 10 ως 15dB (από περίπου 30 / 35dB σε περίπου 45 / 50dB) και μάλιστα στο κρίσιμο μέγεθος των αποδεκτών ορίων εσωτερικής ησυχίας (NC-25/30).

Η παραπάνω συλλογιστική, σε πρώτο επίπεδο ανάλυσης, αναδεικνύει την βαρύνουσα σπουδαιότητα των εσωτερικών πηγών θορύβου (σε σχέση με την ηχορρύπανση των αστικών κέντρων) στα κτίρια κατοικίας των προηγούμενων δεκαετιών. Σύμφωνα λοιπόν με τις προαναφερόμενες παραδοχές και υποθέσεις, η συγκριτική αξιολόγηση της διαχρονικά προσφερόμενης ακουστικής άνεσης δείχνει :
-την υπερκάλυψη των ισχυόντων κριτηρίων ησυχίας κατά +6 ως +20dB στις κατοικίες του δείγματος των δεκαετιών 20-30,
-έναντι ελλείμματος -11 ως -14dB στο αντίστοιχο δείγμα της σύγχρονης εποχής [3].
Το εξαγόμενο συμπέρασμα ισχύει σε όλες τις εντοπισμένες περιστάσεις γειτνίασης, με εξαίρεση τη διατήρηση ενός ελλείμματος κατά το μέγιστο -4dB, στην δυσμενέστερη εκδοχή της γειτνίασης πολλών υπνοδωματίων με κοινόχρηστο WC, στη ζώνη ανάπαυσης.

5. Συμπεράσματα

Τα διαμερίσματα των αστικών πολυκατοικιών της μελετώμενης χρονικής περιόδου (δεκαετίες 1920-1930), μολονότι σχεδιάστηκαν χωρίς τις προδιαγραφές κάποιου σχετικού κανονισμού που θα επέβαλε συνθήκες εσωτερικής ησυχίας και εξειδικευμένες ηχομονωτικές παρεμβάσεις στις κατασκευές, αποδεικνύεται ότι πρόσφεραν στους ενοίκους άριστες συνθήκες ακουστικής άνεσης, χάρη στον συνήθη σχεδιασμό των εσωτερικών χώρων. Αντίθετα, όπως δείξαμε σε παλιότερη ανακοίνωση [5], το εξελισσόμενο κοινωνικά και τεχνολογικά, σύγχρονο μοντέλο κατοικίας (με βάση την αρχή «της ρευστότητας των ζωνών»), παρά τις προηγμένες τεχνικές / εφαρμογές ηχομόνωσης δεν καταφέρνει (ή ακόμη χειρότερα δείχνει να αδιαφορεί με) το στόχο της επιβεβλημένης ακουστικής άνεσης (κατά τις απαιτήσεις του Κτιριοδομικού Κανονισμού, άρθρο 12) : αρκείται σε λειτουργικές διευθετήσεις του εσωτερικού χώρου [2] και πιθανά προσανατολίζεται στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Μελλοντικός στόχος της έρευνας μας είναι η επέκταση της στις μεταπολεμικές δεκαετίες του 20ού αιώνα, η υπολογιστική διερεύνηση της ηχομονωτικής επάρκειας των οικοδομικών εφαρμογών κατά περίοδο και η διατύπωση διαχρονικών συμπερασμάτων αναφορικά με τις σχέσεις διαρρύθμισης και παθητικής ηχοπροστασίας.

Βιβλιογραφία

[1] Μαρμαράς, Μ. (1991), «Η Αστική Πολυκατοικία της Μεσοπολεμικής Αθήνας», εκδόσεις Θεμέλιο, Αθήνα

[2] Φιλιππίδης, Δ. (1984), «Νεοελληνική Αρχιτεκτονική», Μέλισσα, Αθήνα

[3] Δεληγιαννίδου, Ρ. - Μαυρίδου Δ. (2009), «Ηχομονωτικές Εκπτώσεις στη Διαρρύθμιση της Νεοελληνικής Κατοικίας», Πρακτικά 4ου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ : *Ακουστική 2008*, Ξάνθη

[4] ΓΟΚ 1929, Γενικός Οικοδομικός Κανονισμός

[5] Δεληγιαννίδου, Ρ. – Μπάρκας, Ν. (2012) «Ο Προθάλαμος, ο Διάδρομος και η Σαλοκουζίνα : υπολογιστική διερεύνηση της ηχομονωτικής ικανότητας των

εσωτερικών τοιχωμάτων της σύγχρονης κατοικίας», Πρακτικά 5ου Συνεδρίου ΕΛΙΝΑ : *Ακουστική 2010*, Αθήνα

[6] Αθανασόπουλος, Γ. Χ. (1991), «Προστασία κτιρίων», Αθήνα.

[7] Doelle L.L. (1972), «Environmental acoustics», Mc Graw-Hill, New York

[8] Τσινίκας, Ν. (1988), «Κτιριακή – Πολεοδομική Ηχοπροστασία», University Studio Press, Θεσσαλονίκη

[9] Everest A. F – Pohlmann K. C. (2009) «Master Handbook of Acoustics», Mc Graw-Hill, New York

[10] WHO (2011), «Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe», JRC European Commission, Denmark

[11] Μπάρκας, Ν. (2005) «Τεύχος Ηχομόνωσης» *Σημειώσεις Δομικής Φυσικής*, Ξάνθη εταιρεία αξιοποίησης και διαχείρισης περιουσίας Δ.Π.Θ.

[12] Βίττης, Ν. 2008, «Πηγές Θορύβου σο Σύγχρονο Περιβάλλον», Πρακτικά Ημερίδας ΤΕΕ : *Οι επιπτώσεις της ηχορρύπανσης στα αστικά κέντρα*, Αθήνα

[13] Μπάρκας, Ν. (2003), «Υπολογιστική Διερεύνηση του Σύνθετου Ηχομονωτικού Δείκτη μιας Πρόσοψης : οι δυσεπίλυτες εφαρμογές της οικοδομικής διαφάνειας. Πρακτικά 1ου Συνεδρίου *"Διαφάνεια & Αρχιτεκτονική: Κενά και Πλήρη*', Θεσσαλονίκη (2003), University Studio Press, Θεσσαλονίκη

Προβλήματα ακουστικής – ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας σε πολιτιστικά κτίρια μεσαίου και μικρού μεγέθους. Το παράδειγμα του Ιδρύματος «Μιχάλης Κακογιάννης»

Θεόδωρος Τιμαγένης
Αρχιτέκτων – Σύμβουλος Ακουστικής,
ΕΜΠ – MSc University of London
Κ. Παλαιολόγου 5, Πειραιάς τηλ. 210 4119545
www.timagenis-acoustics.com,
ttimagenis@hol.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την μελέτη και την κατασκευή πολιτιστικών κτιρίων μικρού και μεσαίου μεγέθους σε πολλές περιπτώσεις, παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα σε σχέση με την ακουστική, την ηχομόνωση και την ηχοπροστασία των ίδιων και των γειτονικών κτιρίων.

Κύρια αιτία για την «ακουστική» ιδιαιτερότητα αυτών των κτιρίων, σε σχέση με τα παρόμοια, μεγάλου μεγέθους, κτίρια είναι η έκταση, η θέση και ο συντελεστής δόμησης των διατιθεμένων οικοπέδων, που πολλές φορές δεν επαρκούν για την εξυπηρέτηση του κτιριολογικού προγράμματος, το οποίο συνήθως περιλαμβάνει πλήθος και ποικιλία χώρων, με αυστηρές προδιαγραφές, οι οποίες είναι απαραίτητες ώστε μέσα σε αυτά τα κτίρια να μπορούν να λαμβάνουν χώρα ποικίλες και υψηλού επιπέδου εκδηλώσεις και δραστηριότητες.

Τα ανωτέρω δυσχεραίνουν σημαντικά την μελέτη και την εφαρμογή των μέτρων που είναι απαραίτητα για την ικανοποίηση των προδιαγραφών και ιδιαίτερα αυτών, που αφορούν στην ακουστική, στην ηχομόνωση και στην ηχοπροστασία και των ίδιων αλλά και των γειτονικών κτιρίων.

Στην παρούσα εργασία με παράδειγμα το πολιτιστικό κέντρο του Ιδρύματος «Μιχάλης Κακογιάννης», εξετάζονται μερικά από τα («ακουστικά») προβλήματα, που προκύπτουν από την ανάγκη στέγασης πολλών και ποικίλων πολιτιστικών – καλλιτεχνικών υψηλού επιπέδου εκδηλώσεων και δραστηριοτήτων σε οικόπεδα, που βρίσκονται μέσα στον αστικό ιστό και με σχετικά περιορισμένο μέγεθος σε σχέση με τις απαιτήσεις του κτιριολογικού προγράμματος.

Acoustic problems in small and medium scale Cultural Centres. The example of Foundation «Mihalis Kakogiannis», Athens-Hellas

ABSTRACT

During the design and construction stages of small or medium scale cultural buildings, acoustic, sound insulation and sound proof problems can occur.

Such issues do not normally appear to similar, large scale projects, as due to the conditions, (substantially lager site, different plotting ratios, position etc) the design and integration of all the functions suggested by the schedule of accommodation are more simple.

A more restricted context can affect dramatically, not only the design process but also the acoustic study, which is not an isolated process limited to the unit itself but a part of a more holistic discourse including the response of the construction to its immediate context.

The scope of the present paper is to determine the main acoustic difficulties, occurred by gathering multiple cultural events in small scale plots of the urban context and their relation with the high functional requirements, using as a case study the «Mihalis Kakogiannis» Foundation located in Athens-Hellas.

Εισαγωγή

Πολιτιστικά κτίρια και εν γένει χώροι συνάθροισης κοινού, επιτρέπεται να ανεγερθούν στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδος. Αυτό σημαίνει, ότι ανάλογα με τις πολιτιστικές ανάγκες ή προθέσεις, οποιοδήποτε οικόπεδο, ανεξάρτητα από την θέση του, το μέγεθος του και τους όρους δόμησης της περιοχής, μπορεί να επιλεγεί προκειμένου σε αυτό να ανεγερθεί ένα κτίριο που θα εξυπηρετεί τις πολιτιστικές ανάγκες της τοπικής, αλλά σε πολλές ειδικές περιπτώσεις και της πολύ ευρύτερης κοινωνίας.

Το κτιριολογικό πρόγραμμα των πολιτιστικών κτιρίων κατά κανόνα περιλαμβάνει πλήθος και ποικιλία χώρων, με αυστηρές προδιαγραφές, οι οποίες είναι απαραίτητες ώστε μέσα σε αυτά να μπορούν να λαμβάνουν χώρα ποικίλες και υψηλού επιπέδου εκδηλώσεις και δραστηριότητες.

Όπως είναι ευνόητο, οι περιορισμοί που είναι δυνατόν να προκύπτουν από το μέγεθος και τους όρους δόμησης του κάθε οικοπέδου, δεν μπορούν να αποτελέσουν άλλοθι για την υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών αυτών των κτιρίων. Αυτός είναι ο βασικός λόγος, εξ αιτίας του οποίου κατά την μελέτη και την κατασκευή πολιτιστικών κτιρίων, υπό τις συνθήκες που περιγράφησαν προηγουμένως, παρουσιάζονται σημαντικά προβλήματα και σε ότι αφορά στην αρχιτεκτονική σύνθεση αυτή καθεαυτή, αλλά επίσης και στην ακουστική, στην ηχομόνωση και στην ηχοπροστασία των ίδιων των πολιτιστικών κτιρίων καθώς

επίσης και των γειτονικών τους κτιρίων, τα οποία πολλές φορές είναι κτίρια ευαίσθητα στον θόρυβο όπως π.χ. κτίρια κατοικιών.

1. Το νέο Πολιτιστικό κέντρο του ιδρύματος «Μιχάλης Κακογιάννης»

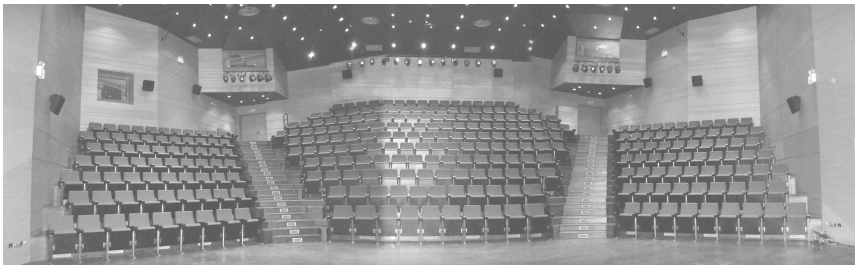
Με την ανέγερση του Νέου Πολιτιστικού Κέντρου [1] στην οδό Πειραιώς (Εικόνα 1.1) έγινε πραγματικότητα το όραμα του Μιχάλη Κακογιάννη και ο σκοπός του κοινωφελούς ιδρύματος με την επωνυμία «Ίδρυμα Μιχάλης Κακογιάννης», που είναι «η μελέτη, υποστήριξη και διάδοση των τεχνών του θεάτρου και του κινηματογράφου κάθε εποχής», «η καταγραφή και διαφύλαξη των δημιουργημάτων των τεχνών αυτών», και, «η ενίσχυση του ευρωπαϊκού κινηματογράφου με πρωτοβουλία και προτάσεις».



Εικόνα 1.1

Το κτίριο έχει συνολικό εμβαδόν 7.000 m² με 4 υπέργειους ορόφους και 2 υπόγεια. Περιλαμβάνει θέατρο 330 θέσεων (Εικόνα 1.2), κινηματογράφο 125 θέσεων (Εικόνα 1.3), πειραματικό κινηματογράφο 70 θέσεων (Εικόνα 1.4), εκθεσιακό χώρο (Εικόνα 1.5), εστιατόριο κλειστό (Εικόνα 1.6) και υπαίθριο, γραφεία και χώρους στάθμευσης δυο επιπέδων.

Στο θέατρο και τον κινηματογράφο έχουν γίνει προβλέψεις για την οργάνωση συνεδρίων, ομιλιών και γενικότερα ποικίλων καλλιτεχνικών εκδηλώσεων. Η αίθουσα του πειραματικού κινηματογράφου χρησιμοποιείται και για διδασκαλία, χορό και πρόβες.



Εικόνα 1.2 Θέατρο 330 θέσεων



Εικόνα 1.3 Κινηματογράφος 125 θέσεων



Εικόνα 1.4 Πειραματικός κινηματογράφος 70 θέσεων



Εικόνα 1.5 Εκθεσιακός χώρο



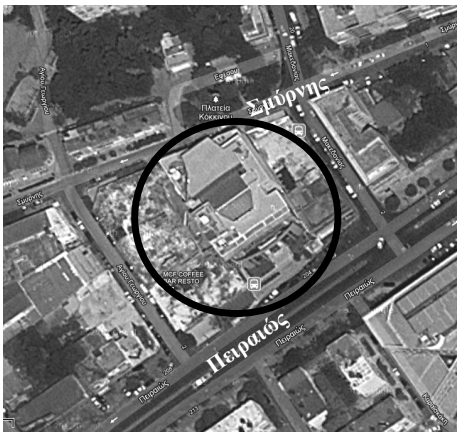
Εικόνα 1.6 Εστιατόριο

2. Τα προβλήματα ακουστικής – ηχομόνωσης – ηχοπροστασίας

Το οικόπεδο είναι διαμπερές (Εικόνα 2.1) με κύρια όψη προς την οδό Πειραιώς και πίσω όψη προς την οδό Σμύρνης.

Όπως είναι γνωστό, η στάθμη του κυκλοφοριακού θορύβου στην οδό Πειραιώς είναι πολύ υψηλή [Στην οικοδομική γραμμή $L_{A,eq,h}$ 75 dB (A), L_1 83 dB(A)]. Στην οδό Σμύρνης ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ χαμηλότερος από αυτόν της οδού Πειραιώς. Όμως επειδή και στην οδό αυτή κυκλοφορούν φορτηγά η στάθμη L_1 είναι της τάξεως του 75 dB (A) [$L_{Aeq,h}$ = 65 dB(A)].

Εκατέρωθεν του οικοπέδου (οικοδομικό σύστημα συνεχές) είναι εγκατεστημένες δυο βιοτεχνίες, οι οποίες παράγουν σχετικά υψηλό θόρυβο.



Εικόνα 2.1

Στο εσωτερικό του κτιρίου η αρχιτεκτονική πρόκληση ήταν να δημιουργηθούν χώροι οι οποίοι, ενώ θα έπρεπε να εξασφαλίζουν ο καθένας τον δικό του αυτόνομο λειτουργικό χαρακτήρα, θα έπρεπε ταυτόχρονα να αποτελούν μορφολογικά και λειτουργικά τμήματα ενός ενιαίου κτιρίου. Όλοι οι χώροι θα έπρεπε, επίσης, να μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα (ταυτόχρονα).

Η λύση δόθηκε με την δημιουργία τριωροφου κεντρικού αιθρίου – εισόδου, γύρω από το οποίο διευθετήθηκαν το θέατρο, οι κινηματογράφοι, οι εκθεσιακοί χώροι και το εστιατόριο.

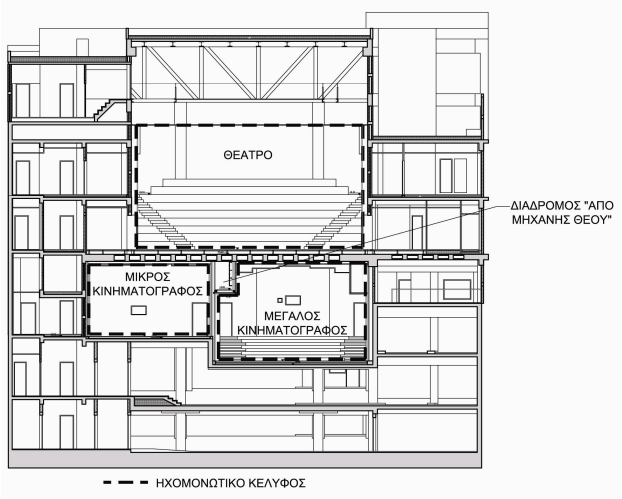
Με τις πιο πάνω επιλογές, υλοποιήθηκε η αρχιτεκτονική πρόθεση για την εσωτερική χωροταξία του κτιρίου. Ταυτόχρονα όμως αυξήθηκε και η δυσκολία της επίλυσης των ακουστικών προβλημάτων διότι η σχέση των χώρων έγινε πολύπλοκη (Σχ. 2.1 – Σχ. 2.5).

Για την επίλυση των ανωτέρω προβλημάτων το κτίριο κατασκευάσθηκε εν εσοχή και όχι επί της οικοδομικής γραμμής και χρησιμοποιήθησαν υαλοστάσια με υψηλό δείκτη ηχομείωσης. Στο εσωτερικό χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές μέθοδοι για τις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ηχομόνωση. Δηλ. λύσεις τύπου δωμάτιο μέσα σε δωμάτιο, ελαστικές στηρίξεις – αναρτήσεις, προθάλαμοι ηχοαπορρόφηση στους

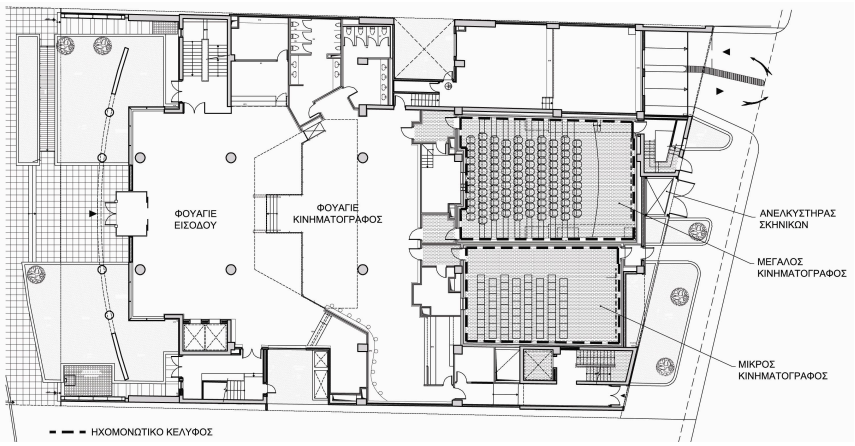
κοινόχρηστους χώρους κλπ. Λόγω της διάταξης των βασικών χώρων δεν ήταν η δυνατή δημιουργία αρμών διακοπής του φέροντος οργανισμού προκειμένου να διευκολυνθεί η επίτευξη υψηλής ηχομόνωσης μεταξύ αυτών των χώρων οι οποίοι παράγουν υψηλές στάθμες ήχου και ταυτόχρονα απαιτούν για την σωστή λειτουργία τους την εξασφάλιση πολύ χαμηλής στάθμης θορύβου βάθους. Στην ιδιαιτερότητα της γενικής διάταξης των χώρων, προστέθηκε μια ακόμη δυσκολία, δηλ. ο διάδρομος για την εμφάνιση του «από μηχανής θεού», ο οποίος κατασκευάσθηκε μεταξύ της οροφής του μικρού κινηματογράφου και του δαπέδου του θεάτρου και έπρεπε να έχει διατομή (ύψος – πλάτος) κατάλληλη για την διέλευση ηθοποιών και καταπακτή η οποία έπρεπε να ανοίγει με σχετική ευκολία (Σχ. 2.1)

Τέλος, ένα άλλο ευαίσθητο σημείο ήταν το φρέαρ του ανελκυστήρα, το οποίο είναι εξωτερικό, κατασκευάσθηκε από μεταλλικά τοιχώματα και συνέδεσε απ' ευθείας τον εξωτερικό χώρο φόρτωσης – εκφόρτωσης σκηνικών (στην οδό Σμύρνης) με τον χώρο που βρίσκεται ακριβώς πίσω από την σκηνή (Σχ. 2.1 & Σχ. 2.2).

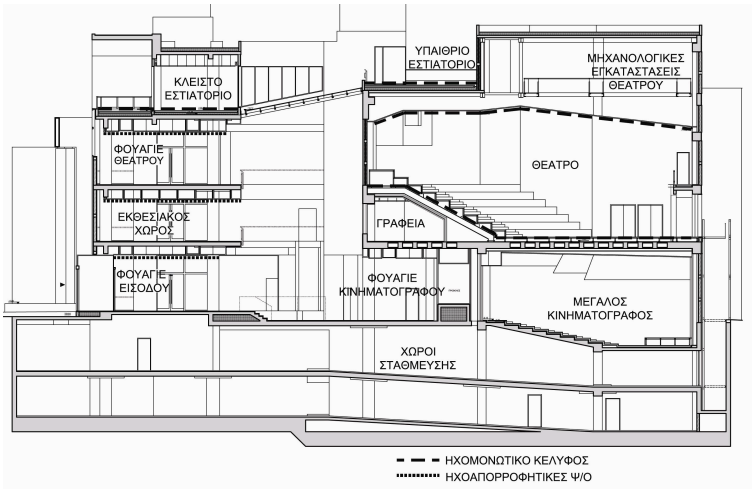
Σε αντίθεση με την ηχομόνωση και την ηχοπροστασία του κτιρίου, η ακουστική των χώρων του δεν παρουσίασε ιδιαίτερες δυσκολίες, διότι κάθε χώρος είχε πολύ συγκεκριμένη χρήση ή χρήσεις με πολύ κοντινές ακουστικές απαιτήσεις. Δηλ. η αίθουσα του θεάτρου προορίζεται μόνο για θεατρικές παραστάσεις, χορό και συνέδρια. Ο μεγάλος κινηματογράφος προορίζεται, αποκλειστικά, για κινηματογραφικές προβολές ομιλίες, διαλέξεις κλπ. Ο μικρός κινηματογράφος (με οριζόντιο δάπεδο και ελαφρά κινητά καθίσματα) προορίζεται για προβολές και άλλου είδους εκδηλώσεις για τις οποίες το μέγεθος και ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας είναι απόλυτα ικανοποιητικό (π.χ. δοκιμές). Οι υπόλοιποι κοινόχρηστοι χώροι χρησιμοποιούνται για εκθέσεις, και ανάλογες εκδηλώσεις.



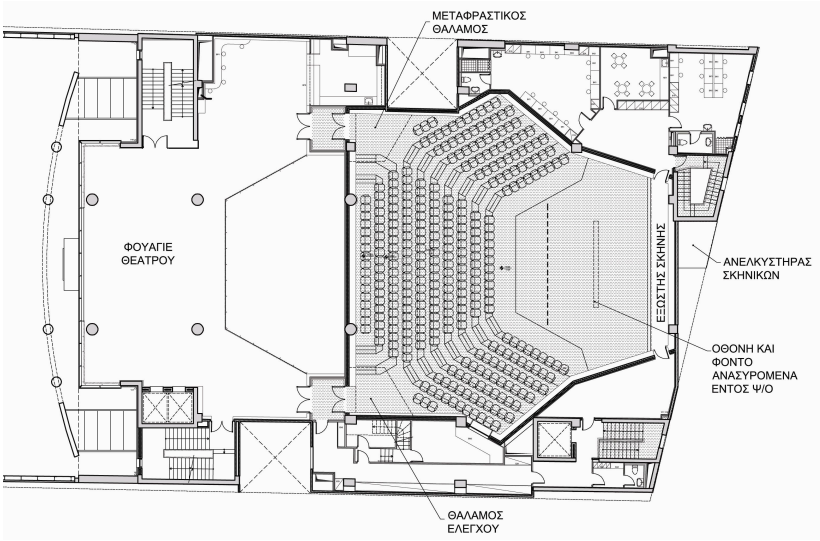
Σχ. 2.1 Εγκάρσια τομή



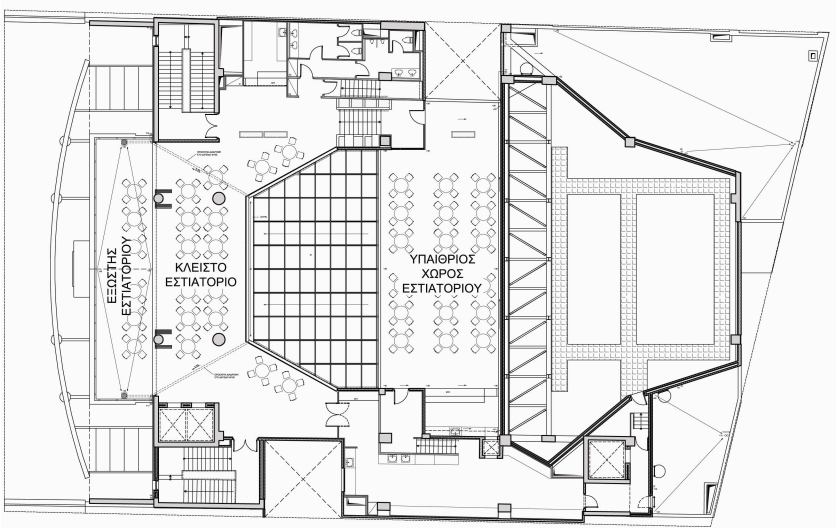
Σχ. 2.2 Κάτοψη ισογείου



Σχ. 2.3 Τομή κατά μήκος

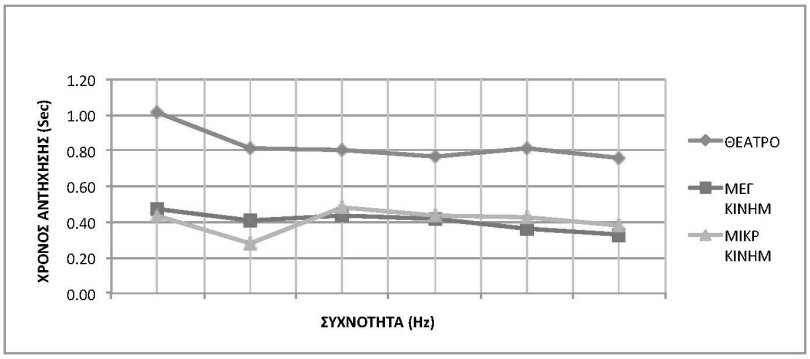


Σχ. 2.4 Κάτοψη Β' ορόφου



Σχ. 2.5 Κάτοψη Γ' ορόφου

3. Χρόνος αντήχησης αιθουσών



Σχ. 3.1 Χρόνος αντήχησης αιθουσών

4. Αερόφερτοι θόρυβοι

Μεταξύ κινηματογράφων : 65 dB
Μεταξύ κινηματογράφων και θεάτρου: 73 dB

5. Κτυπογενείς θόρυβοι (χρήση κτυπογενήτριας)

Μεταξύ κινηματογράφων: Μη μετρήσιμη στάθμη
Μεταξύ θεάτρου και κινηματογράφων (και αντιστρόφως) : Μη μετρήσιμη στάθμη

6. Ταυτότητα έργου

Αρχιτεκτονική μελέτη:	ΣΓΟΥΤΑΣ + ΣΓΟΥΤΑΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΕΣ
Στατική μελέτη:	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ
Η/Μ μελέτη:	ΤΕΚΕΜ Α.Ε.
Ακουστική μελέτη:	ΘΟΔΩΡΟΣ ΤΙΜΑΓΕΝΗΣ
Γεωτεχνική μελέτη:	ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ ΕΠΕ
Σύμβουλοι υποστήριξης	ΚΠΣ ΣΤΑΔΙΟΝ Α.Ε.
Κατασκευή:	ΠΡΟΕΤ (μέλος του ομίλου J&P ΑΒΑΞ)

7. Παραπομπές – βιβλιογραφία

[1] Βασίλης Σγούτας «Ελληνικές Κατασκευές» τευχ. 147, 5/2012

Ηχομονωτική ικανότητα κτιριακών προσόψεων σύγχρονης τεχνολογίας· Δικέλυφες όψεις

Ευαγγελία Καρνάρη [1], Ευθυμία Σοφία Αυγουστοπούλου [2], Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου [3], Γεώργιος Πουλάκος [4], Τηλέμαχος Καρατζάς [5]
[1] Μεταπτυχιακή Σπουδάστρια Ε.Μ.Π., Βαρβιτσιώτη 9, Αθήνα, 11744, eva.karnari@gmail.com,
[2] Μεταπτυχιακή Σπουδάστρια Ε.Μ.Π, Ανδριτσαίνης 23, Αθήνα, 11142, efi.avgoustopoulou@gmail.com
[3] Επικ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, alexia@central.ntua.gr
[4] Καθηγητής Ε.Μ.Π., Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, gpoulako@central.ntua.gr
[5] Υποψήφιος Διδάκτωρ, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, tilkar6@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με δεδομένο το σύγχρονο ενδιαφέρον για κτίρια ενεργειακά αποδοτικά, σημαντική είναι η απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο οι κατασκευές και τα υλικά τους συμβάλουν στην ηχομόνωση του κτιρίου. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον προσδιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας γυάλινων δικέλυφων όψεων, σε τρία κτίρια στην Αθήνα. Και τα τρία κτίρια με βάση τη γεωμετρία τους ανήκουν στις πολυώροφες συνεχείς όψεις, ενώ με βάση το μηχανισμό κίνησης της αέριας μάζας ανήκουν στην παθητική κίνηση. Βρίσκονται πάνω σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και μεγάλου αστικού κυκλοφοριακού θορύβου. Οι τρεις κατασκευές γυάλινων δικέλυφων όψεων βρέθηκαν να υπολείπονται στην σύγκρισή τους με την ηχομονωτική ικανότητα άλλων κατηγοριών δικέλυφων όψεων καθώς και με αυτή των συμβατικών κατασκευών. Αποτιμάται η ικανότητα των γυάλινων δικέλυφων όψεων να παρέχουν ηχοπροστασία στο κτίριο και διατυπώνονται προτάσεις βελτίωσης της κατασκευής των.

Λέξεις Κλειδιά: *Δικέλυφες, Ηχομονωτική ικανότητα, Αερόφερτος ήχος, Πρόσοψη*

Sound insulation of Double skin facades

ABSTRACT

Given the contemporary interest for energy efficient buildings, it is challenging to determine whether the construction and its structural materials have an impact on the sound proofing qualities of the building. Therefore, tests were made to determine the sound insulation of double skin facades, in three buildings in Athens.. All three buildings based on their geometry belong to the multistory facades, while based on the type of ventilation they belong to the passive motion type. They are located next

to major urban traffic. These three buildings with double skin facades, were found providing less sound insulation compared to other types of double sided as well as that of conventional construction. The ability of double skin facades to provide sound insulation has been evaluated and improvements have been suggested.

Key Words: *Double skin facades, Sound Insulation, Airborne sound*

Εισαγωγή

Οι γυάλινες δικέλυφες όψεις (ΓΔΟ) αποτελούν τα τελευταία χρόνια μία νέα πρόταση και τάση στη σύγχρονη βιοκλιματική αρχιτεκτονική. Οι κατασκευές αυτού του τύπου υπόσχονται:
- Αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων επιπέδων αστικού θορύβου
- Προστασία του βασικού κελύφους από τις εξωτερικές καιρικές επιδράσεις
- Φυσικό αερισμό των χώρων μέσω του διακένου μεταξύ των δύο κελυφών και
- Παθητική θέρμανση, φυσικό δροσισμό και φωτισμό των κτιρίων.

Η μικρή ηλικία των κτιρίων που έχουν ενσωματώσει στο κέλυφός τους ΓΔΟ δεν επέτρεψε μέχρι στιγμής την πλήρη αξιολόγησή τους ως προς τα παραπάνω υποσχόμενα, με αποτέλεσμα να διατυπώνονται αντικρουόμενες απόψεις μεταξύ των ερευνητών, οι οποίοι και βασίζουν τις θέσεις τους κυρίως σε μεθόδους προσομοίωσης και λιγότερο συχνά σε μετρήσεις σε ήδη κατασκευασμένα κτίρια. Με την εργασία αυτή επιδιώκεται να γίνει κατ' αρχάς σαφής ο μηχανισμός λειτουργίας των ΓΔΟ, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση και κριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τη διερεύνηση της ηχομονωτικής τους συμπεριφοράς.

1. Κατηγοριοποίηση δικέλυφων όψεων

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικά με τη κατηγοριοποίηση των ΓΔΟ. Η επικρατούσα αντίληψη διακρίνει τους τύπους των δικέλυφων όψεων σύμφωνα με τους τρείς πιο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία τους [4], [5]:

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση δικέλυφων όψεων

Γεωμετρία του κλωβού	Όψη κιβωτιοειδούς παραθύρου (box window)
	Όψη τύπου κιβωτιοειδούς αγωγού (shaft box)
	Όψη τύπου διαδρόμου (corridor façade)
	Πολυώροφη συνεχής όψη (multistory façade)
Μηχανισμός κίνησης της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό	Παθητική κίνηση (Natural)
	Ενεργητική κίνηση (Mechanical)
	Υβριδική κίνηση (Hubrid)
Φορά κίνησης	Εξωτερικής κυκλοφορίας (Outdoor air curtain)
	Εσωτερικής ανακυκλοφορίας (Indoor air curtain)
	Προσαγωγή του αέρα στο εσωτερικό (Air supply)
	Απαγωγή του αέρα από το εσωτερικό (Air exhaust)
	Ζώνη ανάσχεσης (Buffer zone)

Η γεωμετρία της πρόσοψης, η επιλογή των υαλοπινάκων και των συστημάτων σκίασης καθώς και το μέγεθος και η θέση των εσωτερικών και εξωτερικών ανοιγμάτων καθορίζουν τη χρήση των δικέλυφων όψεων, τη θέρμανση, τον αερισμό και τον κλιματισμό (HVAC) που πρέπει να ακολουθείται, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση του εσωτερικού περιβάλλοντος και μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

2. Βιβλιογραφική Αναδρομή

Τα τελευταία χρόνια εκδηλώνεται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα προβλήματα που αφορούν την ηχομόνωση των κτιρίων. Οι M.Blasco, C Crispin, B. Ingelaere το 2004 [1] στη μελέτη τους έκαναν σύγκριση μεταξύ τριών τύπων ΓΔΟ σε τρία διαφορετικά κτίρια, καθώς και σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με την ηχομονωτική ικανότητα συμβατικών προσόψεων.

Πίνακας 2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων της μελέτης των M.Blasco, C Crispin, B. Ingelaere

	Κίνηση	Εσωτερικά	Διάκενο	Εξωτερικά	$D_{ls,2m,n(T),w}$ (C,C_{tr})dB
Μονοώροφη	Ενεργητική	6mm	12.5cm	6/12/8	43(-2,-5)
Κιβωτιοειδές παράθυρο	Ενεργητική	7mm	7cm	6/12/8	47(-2,-5)
Πολυώροφη συνεχής όψη	Παθητική	6/12/8	70cm	6/12/8	53(-1,-2)

Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι ΓΔΟ έχουν καλύτερη ηχομονωτική ικανότητα (πάνω από 10 dB) σε σχέση με συμβατικές προσόψεις. Από την άλλη πλευρά, η ηχομονωτική τους ικανότητα όσον αφορά τη μεταφορά του ήχου μέσω του διάκενου της διπλής όψης μεταξύ των δωματίων (για διαφορετικούς ορόφους) είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με τα κτίρια με την ίδια εσωτερική κατασκευή, αλλά χωρίς διάκενο (τιμές έως 8 dB), κυρίως όταν δεν ληφθούν ιδιαίτερα μέτρα για την πρόληψη της εναέριας μετάδοσης του ήχου.

3. Σχεδιασμός πειραμάτων και μεθοδολογία

3.1 Κτίρια υπό μελέτη

Για την εργασία επιλέχθηκαν τρία κτίρια, τα οποία βρίσκονται στο Νομό Αττικής, δίπλα στον αστικό ιστό της πόλης. Τα τρία κτίρια με βάση τη γεωμετρία τους ανήκουν στις πολυώροφες συνεχείς όψεις, ενώ με βάση το μηχανισμό κίνησης της αέριας μάζας ανήκουν στην κατηγορία της παθητικής κίνησης.

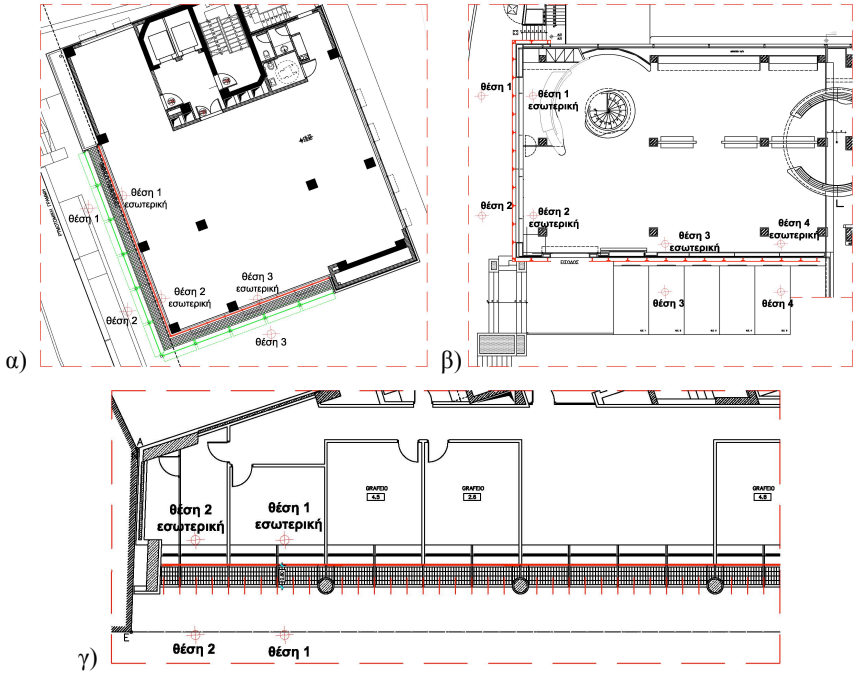
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά Κτιρίων

Α. Κτίριο Γραφείων Καταστήματος Toi –Moi (Εθνική Οδός, Νέα Φιλαδέλφεια)	
Α	1. Εσωτερικά: διπλοί μονωτικοί υαλοπίνακες 6/12/6

	2. Διάκενο 0,95m, με διάδρομο μη βατό
	3. Εξωτερικά: Συστήματα σκιασμού 5mm (περιστροφή οριζόντιου άξονα)
Β. Κατάστημα Ηλεκτρονικής (Οδός Κηφισίας 16, Μαρούσι)	
Β	1. Εσωτερικά: διπλοί υαλοπίνακες 5+5mm triplex
	2. Μεταλλικοί ορθοστάτες
	3. Βαμμένη τσιμεντοσανίδα πάχους 10mm
	4. Διάκενο 0,228m
	5. Εξωτερικά: Υαλοπίνακες 10mm
Γ. Γραφεία του Υ.Υ.Μ.Δ. (ΕΥΔ/ΕΠ-ΕΠ) (Οδός Κόνιαρη 15, Αθήνα)	
Γ	1. Εσωτερικά: διπλοί υαλοπίνακες 4/12/4
	2. Διάκενο 0,80m, με διάδρομο μη βατό
	3. Εξωτερικά: Συστ/τα σκιασμού 5+5mm (περ/φή κατακόρυφου άξονα)

3.2 Μετρήσεις στα κτίρια

Για τον προσδιορισμό της ηχομόνωσης των ΓΔΟ στα κτίρια πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από μετρήσεις:
α) μετρήσεις του θορύβου βάθους, β) μετρήσεις του χρόνου αντήχησης RT στις αίθουσες ηχητικής λήψης, γ) μετρήσεις της χωρικής μέσης ηχητικής πίεσης στις ορισμένες θέσεις στο εξωτερικό του κτιρίου L_1, δ) μετρήσεις της χωρικής μέσης ηχητικής πίεσης στις ορισμένες θέσεις στον εσωτερικό χώρο κάθε κτιρίου L_2 (χρονική διάρκεια 15 λεπτών για μετρήσεις γ), δ) ανά χαρακτηριστικό σημείο).



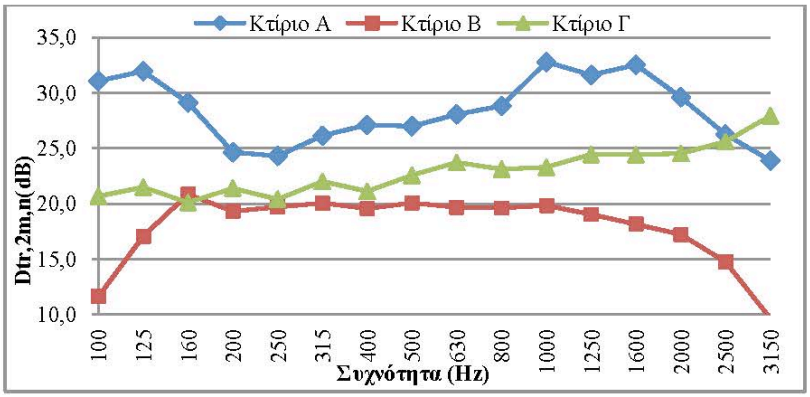
Σχήμα 1. α) Κάτοψη Κτιρίου Α, β) Κάτοψη Κτιρίου Β, γ) Κάτοψη Κτιρίου Γ

4. Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

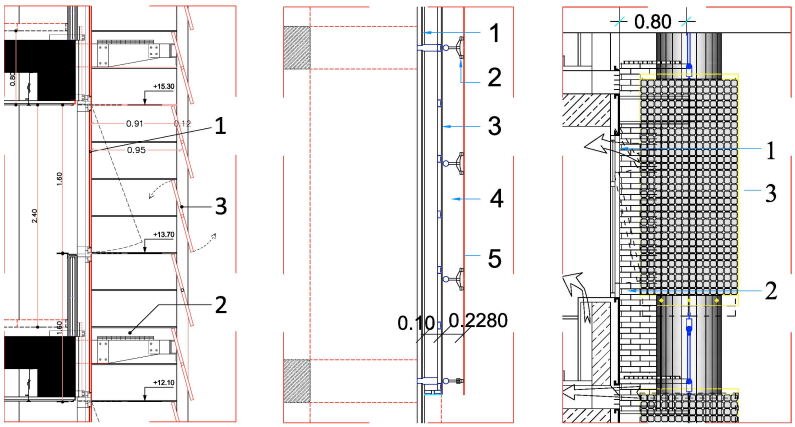
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 370.5(1982)[2]. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ηχόμετρο B&K 2270, με τριτοκταβικό φίλτρο, τοποθετημένο 1,20m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, 2,00m από την πρόσοψη των κτιρίων και 0,20m εσωτερικά. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων τόσο το εσωτερικό, όσο και το εξωτερικό κέλυφος παρέμειναν κλειστά. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 717-1(1997)[3].

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κτιρίων Α, Β και Γ

Κτίριο	Α	Β	Γ
$\mathbf{D_{tr,2m,n,w}}$ (C,C_{tr}) (dB)	34(-1,0)	17(-1,1)	24(0,-1)



Σχήμα 2. Αποτελέσματα μετρήσεων σε κτίριο Α, Β και Γ



Σχήμα 3. Οριζόντια Τομή Κτιρίου Α, Β και Γ αντίστοιχα

5. Σχολιασμός – Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Και στα τρία κτίρια, το εξωτερικό κέλυφος αποτελείται από ορθογώνια τμήματα υάλου, σχηματίζοντας ένα νοητό κάνναβο, με ενδιάμεσο κενό αέρα. Παρατηρείται μία ασυνέχεια της εξωτερικής κατασκευής με αρκετά διάκενα που επιτρέπουν την κίνηση του αέρα και επομένως προβάλλουν μικρή αντίσταση στους ανεπιθύμητους αερόφερτους θορύβους, κυρίως όταν τα συστήματα σκίασης είναι ανοιχτά. Ο παράγοντας αυτός συμβάλει καθοριστικά στην απόκλιση των αποτελεσμάτων με άλλες μελέτες, αφού ο αέρας μεταφέρεται ανάμεσα από τα διάκενα. Έχουμε επομένως πλευρικές διαρροές λόγω διαμπερών οπών επί της πρόσοψης.

6. Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις μας με μετρήσεις in situ άλλων δικέλυφων όψεων, τα αποτελέσματα δείχνουν μειωμένη ηχομονωτική ικανότητα. Αυτή οφείλεται μεταξύ άλλων στην ύπαρξη διάκενων αέρα στο εξωτερικό κέλυφος και των τριών κατασκευών και στην έλλειψη φραγμών περιμετρικά μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού κελύφους. Οι προσόψεις των κτιρίων Α, Β και Γ συγκαταλέγονται στις ελαφριές κατασκευές. Αυξάνοντας το επιφανειακό βάρος των επιμέρους στοιχείων της πρόσοψης δύναται μια βελτίωση της ηχομόνωσης. Βελτίωση μπορεί επίσης να επιφέρει η χρήση ηχοαπορροφητικών υλικών είτε στο εσωτερικό της κοιλότητας είτε στο εσωτερικό κέλυφος της κατασκευής.

7. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή κ. Σπύρο Ραυτόπουλο, Πρόεδρο της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη στήριξη στο έργο μας.

8. Αναφορές

[1] Blasco M., C. Crispin και B. Ingelaere, «Acoustical Performances of Double Ventilated Glass Facades» Inter Noise (2004)

[2] Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 370.5, Ακουστική –Μετρήσεις ηχομόνωσης κτιριακών στοιχείων- Επιτόπιες μετρήσεις ηχομόνωσης στοιχείων προσόψεων και προσόψεων στην περίπτωση αερόφερτου ήχου

[3] Ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 717-1, Ακουστική-Αξιολόγηση της ηχομόνωσης κτιρίων και κτιριακών στοιχείων- Μέρος 1: Ηχομόνωση για αερόφερτο ήχο

[4] Καραούλη Α., Γυάλινες δικέλυφες όψεις-Τυπολογία & οικονομική βιωσιμότητα, *ΚΤΙΡΙΟ* , σσ. 86-92 (2010, 02),

[5] Χρυσομαλλίδου Ν., Α. Καραούλη, Θ.Θεοδοσίου, «Θερμική απόκριση κτιρίων με γυάλινη δικέλυφη όψη: σύντομη επισκόπηση», HELECO '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου (2005)

Ηχομονωτική ικανότητα κτιριακών προσόψεων σύγχρονης τεχνολογίας˙ Ελαφρά πετάσματα

Ευθυμία Σοφία Αυγουστοπούλου[1], Ευαγγελία Καρνάρη[2],
Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου[3], Γεώργιος Πουλάκος[4],
Τηλέμαχος Καρατζάς[5]
[1] Μεταπτυχιακή σπουδάστρια / Ανδριτσαίνης 23, Αθήνα, 11142
efi.avgoustopoulou@gmail.com
[2] Μεταπτυχιακή σπουδάστρια / Βαρβιτσιώτη 9, Αθήνα, 11744
eva.karnari@gmail.com
[3] Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. / Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, alexia@central.ntua.gr
[4] Καθηγητής Ε.Μ.Π. / Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, gpoulako@central.ntua.gr
[5] Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π. / Πολυτεχνούπολη Ζωγράφου, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Αθήνα, 15780, tilkar6@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στον προσδιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας διπλού διαχωριστικού πετάσματος, ελαφρού τύπου, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ως εξωτερικό στοιχείο κάλυψης σύμμικτης μεταλλικής κατασκευής. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και επιτόπου στην κατασκευή. Το πέτασμα παρότι είναι ελαφρού τύπου παρουσιάζει σχετικά υψηλή ηχομονωτική ικανότητα (R_w=53dB), η οποία είναι συγκρίσιμη με αυτή των πετασμάτων βαρέως τύπου. Οι αποκλίσεις μεταξύ των εργαστηριακών και επιτόπιων μετρήσεων είναι της τάξεως των 3 έως 4dB και κρίνονται ικανοποιητικές.

Λέξεις Κλειδιά: Ελαφρό διαχωριστικό πέτασμα, μεταλλικές κατασκευές, πρόσοψη, ηχομονωτική ικανότητα, αερόφερτος ήχος.

Sound insulation of lightweight building facades

ABSTRACT

The paper deals with the determination of the sound insulation of a lightweight double partition, which has been used as a facade element of a composite metal construction. For this scope, measurements took place in the laboratory and in situ. Although the partition, is lightweight, it presents a relatively high sound insulation (R_w=53dB), which is comparable to the sound insulation of heavyweight walls. The resulting differences between the laboratory and the in situ measurements are in the range of 3 to 4dB and appears satisfactory.

Key Words: Lightweight partition, metal construction, facade, sound insulation, airborne sound

Εισαγωγή

Αποτελεί κοινό τόπο στις μέρες μας ότι ο θόρυβος είναι μια από τις σημαντικότερες αιτίες όχλησης των ανθρώπων και ιδιαίτερα αυτών που κατοικούν σε μεγάλα αστικά κέντρα. Η προφύλαξη ενός χώρου από τον θόρυβο αποτελεί βασικό παράγοντα για την βιωσιμότητα του.

Ένας από τους τρόπους ώστε να μειωθεί η ηχοενόχληση στο εσωτερικό ενός κτιρίου επιτυγχάνεται με την αύξηση της ηχομονωτικής ικανότητας του εξωτερικού του κελύφους, που παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής θορύβου (που βρίσκεται έξω από τον χώρο) και του δέκτη του θορύβου (που βρίσκεται μέσα σ' αυτόν). Για το λόγο αυτό επιδιώκεται η χρησιμοποίηση διαχωριστικών πετασμάτων με όσον δυνατόν αυξημένη, κατά περίπτωση, ηχομονωτική ικανότητα που να ανταποκρίνονται παράλληλα στις απαιτήσεις θερμομόνωσης και προστασίας από την υγρασία.

Η πρόοδος και η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει επιφέρει νέους τρόπους κατασκευής κτιρίων από μεταλλικό σκελετό, πέραν των συμβατικών από οπλισμένο σκυρόδεμα αλλά και νέους τρόπους εξωτερικών καλύψεων αυτών με ελαφρά διαχωριστικά πετάσματα (πέραν της συμβατικής οπτοπλινθοδομής), που έχουν ως στόχο την μείωση των νεκρών φορτίων, την αύξηση της ταχύτητας της κατασκευής, την μείωση του κόστους αυτής, τον περιορισμό της δαπανούμενης ενέργειας αλλά και την δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και επαναχρησιμοποίηση των υλικών.

Τα πετάσματα όμως του εμπορίου, που χρησιμοποιούνται ως διαχωριστικά, ελέγχονται και προσδιορίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις, σε ειδικά κατασκευασμένους θαλάμους εργαστηρίων ή υπολογιστικά από τους νόμους που διέπουν τα ακουστικά φυσικά φαινόμενα. Δυστυχώς, συχνά, πετάσματα των οποίων η ηχομονωτική τους ικανότητα είναι σύμφωνα με τις εργαστηριακές μετρήσεις καλή, η απόδοσή τους μέσα στο κτίριο υπολείπεται για διαφόρους λόγους.

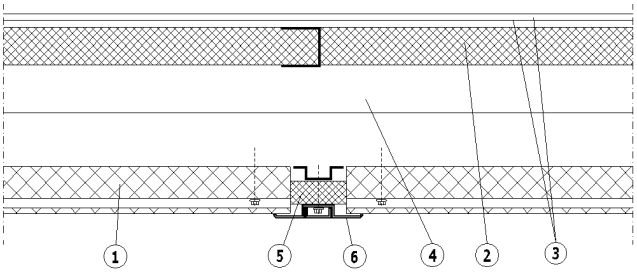
1. Βιβλιογραφική αναδρομή

Στο παρελθόν έχουν διεξαχθεί έρευνες που αφορούν την ηχομονωτική απόκριση των στοιχείων στην κατασκευή, οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις διερευνούν τα σφάλματα στην ηχομόνωση που οφείλονται στην κατασκευαστική και λειτουργική διαδικασία των στοιχείων. Πέρα των θεωρητικών υπολογισμών της ηχομονωτικής ικανότητας των πετασμάτων, η σύγκριση εργαστηριακών προδιαγραφών και επιτόπιων μετρήσεων έχει υπάρξει αντικείμενο άλλων μελετών που αφορούν τόσο απλά, διπλά και σύνθετα πετάσματα, ελαφρού και βαρέως τύπου. Τέτοιες μελέτες όπως των Lucia Taibo και Hilda Glasserman de Dayan [1], Marco Losso και Elvira Viveiros [2], Π. Στασινόπουλου και Ν. Σακελλαρόπουλου [3], Χ. Ταγαρά και Δ. Πίγκου [4] και της Ζ. Σαμούρη [5] οδηγούν σε αποτελέσματα όπου η ηχομονωτική ικανότητα των υπό εξέταση πετασμάτων σε κάθε περίπτωση στην κατασκευή υπολείπεται των εργαστηριακών προδιαγραφών. Συγκεκριμένα σε συμβατική κατασκευή για διπλό τοίχο βαρέως τύπου [3] η απόκλιση είναι 6dB, ενώ για διπλά ελαφρού τύπου πετάσματα [5] η διαφορά είναι της τάξεως των 4-11dB.

2. Σχεδιασμός πειράματος και μεθοδολογία

2.1 Περιγραφή δοκιμίου

Το υπό εξέταση διπλό διαχωριστικό πέτασμα είναι ελαφρού τύπου και έχει συνολικό πάχος 25,50cm. Το εξωτερικό του στοιχείο αποτελείται από πανέλο πολυουρεθάνης πάχους 6,00cm (1) και το εσωτερικό του από πετροβάμβακα πάχους 5,00cm (2) και διπλό φύλλο γυψοσανίδας συνολικού πάχους 2,50cm (3), με ενδιάμεσο κενό αέρα 12,00cm (4). Μεταξύ των πανέλων πολυουρεθάνης τοποθετούνται κατακόρυφοι αρμοί συναρμολόγησης εσωτερικά των οποίων εμπεριέχεται ηχοαπορροφητικό υλικό (5), (6).



Σχήμα 2.1 Τομή πετάσματος

2.2 Διαδικασία δοκιμής

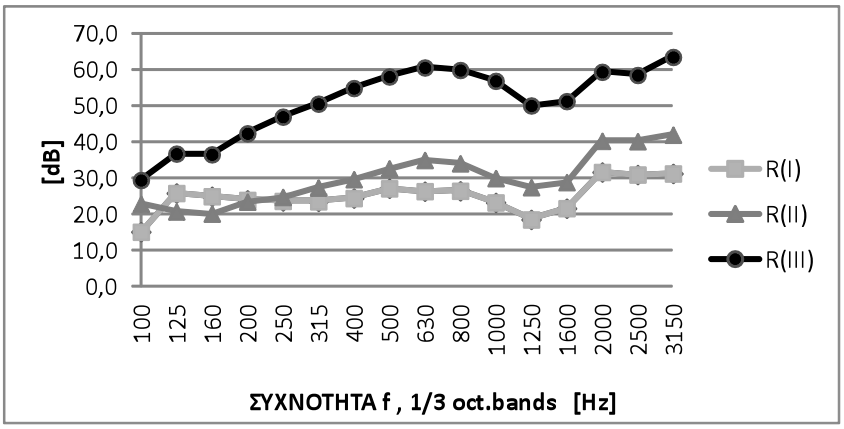
Για τον προσδιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας του πετάσματος μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο στο Εργαστήριο Ηχοτεχνίας της Σχολής Αρχιτεκτόνων, Ε.Μ.Π. αλλά και επιτόπου στην κατασκευή. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 140/III-1978 [6]. Οι επιτόπιες μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με το ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 140/V-1978 [7]. Στις επιτόπιες μετρήσεις η ηχομονωτική ικανότητα του διαχωριστικού πετάσματος εκφράζεται με τον δείκτη ηχομείωσης R_θ, με την μέθοδο του μεγαφώνου.

3. Πειραματική διαδικασία - Αποτελέσματα

3.1 Εργαστηριακές μετρήσεις

Οι μετρήσεις στο εργαστήριο έγιναν για τα τρία στάδια της κατασκευής του δοκιμίου και αποτελέσματα ελήφθησαν αρχικά για την ηχομονωτική ικανότητα του πανέλου πολυουρεθάνης (Ι), στην συνέχεια για το σύστημα πανέλο πολυουρεθάνης κενό αέρα και πετροβάμβακα (ΙΙ) και τελικά για το συνολικό διπλό διαχωριστικό πέτασμα, πανέλου πολυουρεθάνης, διακένου αέρα, πετροβάμβακα και διπλής γυψοσανίδας (ΙΙΙ).

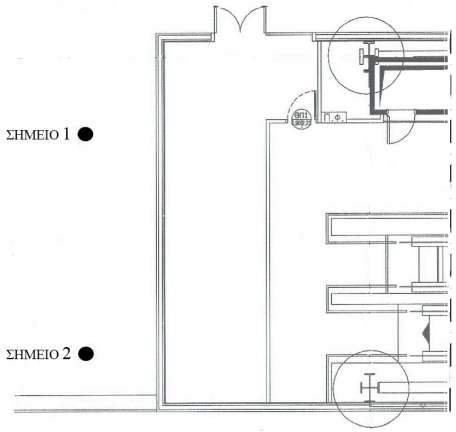
Διάγραμμα 3.1 Δείκτης ηχομείωσης R



Ο προσδιορισμός του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης R_w έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO 717/1-1982 [9] και προέκυψε, $\mathbf{R_{w(I)}=26dB}$, $\mathbf{R_{w(II)}=32dB}$, $\mathbf{R_{w(III)}=53dB}$.

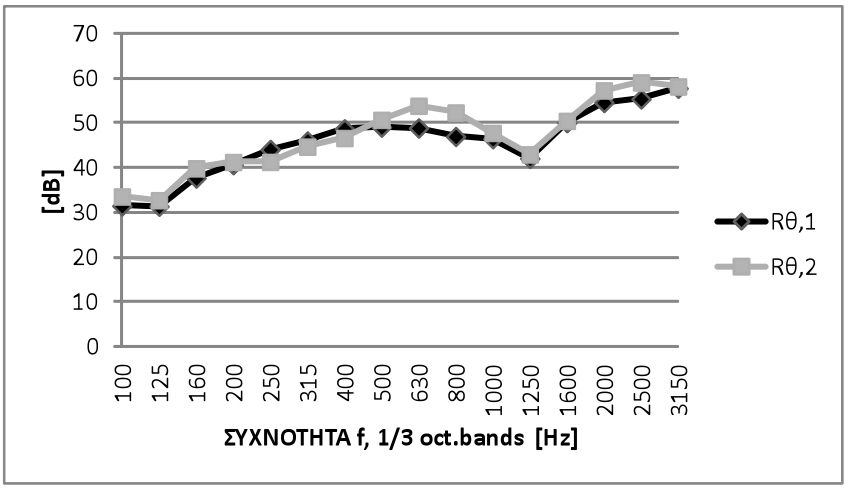
3.2 Επιτόπιες μετρήσεις

Οι επιτόπιες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σύμμικτη μεταλλική κατασκευή (χαλύβδινοι δοκοί και στύλοι, πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα) και στο πέμπτο επίπεδο του κτιρίου λόγο της μορφολογίας του πετάσματος, ενιαία επιφάνεια δίχως ανοίγματα (πόρτες, παράθυρα) γι' αυτό και χρησιμοποιήθηκε εξωτερική πηγή θορύβου (μεγάφωνο). Μετρήσεις έγιναν σε δύο σημεία του πετάσματος.



Εικόνα 3.2 Κάτοψη, σημεία μέτρησης

Διάγραμμα 3.2 Δείκτης ηχομείωσης R_θ, με τη μέθοδο του μεγαφώνου



Ο προσδιορισμός του σταθμισμένου δείκτη ηχομείωσης $R_{\theta,w}$ έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 717/3-1982 [9] και προέκυψε, $\mathbf{R_{\theta,w,1}=49dB}$ και $\mathbf{R_{\theta,w,2}=50dB}$.

4. Σχολιασμός και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Κατά τον προσδιορισμό της ηχομονωτικής ικανότητας του διαχωριστικού πετάσματος, που έχει επιτευχτεί στην κατασκευή, καταλήγουμε σε αποτελέσματα, που αποκλίνουν από τις εργαστηριακές μετρήσεις. Οι αποκλίσεις είναι ικανοποιητικές της τάξης των 3-4dB. Βασικός παράγοντας για αυτές τις αποκλίσεις είναι η ύπαρξη πλευρικών ηχομεταδόσεων που οφείλονται σε διαρροή ηχητικής ενέργειας. Αιτίες πλευρικής διαρροής του ήχου μέσω:
- της συναρμογής του πετάσματος και δαπέδου
- των αρμών συναρμογής του ίδιου του πετάσματος
- των γειτονικών κουφωμάτων.

5. Συμπεράσματα

Η μέριμνα για τα ευπαθή σημεία καθώς και η προσοχή στις κατασκευαστικές λεπτομέρειες είναι βασικές προϋποθέσεις για την μείωση των πλευρικών διαρροών του ήχου και την αύξηση της ηχομόνωσης, που μπορεί να προσφέρει το πέτασμα στο κτίριο. Το εξεταζόμενο πέτασμα ενώ είναι ελαφρού τύπου, μπορεί να προσφέρει ηχομόνωση συγκρίσιμη με αυτή των πετασμάτων βαρέως τύπου, μειώνοντας τα νεκρά φορτία της κατασκευής ενώ παράλληλα είναι θερμομονωτικό.

Η απόδοση του σε κτίριο από μεταλλικό σκελετό είναι καλή και ενώ θα αναμενόταν οι πλευρικές μεταδόσεις του ήχου να είναι αυξημένες στην αρθρωτή κατασκευή, αυτό δεν συνέβη. Καταλήγοντας το προς εξέταση ελαφρό, διπλό διαχωριστικό πέτασμα ενώ είναι χαμηλής μάζας προσφέρει υψηλή ηχητική και θερμική μόνωση.

6. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή κ. Σπύρο Ραυτόπουλο, Πρόεδρο της Σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη στήριξη στο έργο μας.

3. Αναφορές

[1] Lucia Taibo and Hilda Glasserman « Comparison of laboratory and field sound insulation measurement of party walls and facade elements » J.Acoust. Soc. Am. 75. pp 1522-1531 (1984).

[2] Marko Losso and Elvira Viveiros « Sound insulation of gypsum board in practice » The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering (07-10 August 2005-Rio de Janeiro-Brazil).

[3] Π. Στασινόπουλος και Ν. Σακελλαρόπουλος « Συγκριτική μελέτη μεταξύ μετρήσεων στο κτίριο και εργαστηριακών προδιαγραφών της ηχομονωτικής ικανότητας διαχωριστικών πετασμάτων βαρέως τύπου » Διπλωματική εργασία Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Αθήνα (2009).

[4] Χ. Ταγαράς, Δ. Πίγκος « Συγκριτική μελέτη μεταξύ εργαστηριακών προδιαγραφών και μετρήσεων στο κτίριο της ηχομονωτικής ικανότητας κουφωμάτων αλουμινίου » Διπλωματική εργασία Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Αθήνα (2009).

[5] Ζ. Σαμούρη « Συγκριτική μελέτη μεταξύ εργαστηριακών προδιαγραφών και μετρήσεων στο κτίριο της ηχομονωτικής ικανότητας διαχωριστικών πετασμάτων » Διπλωματική εργασία Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Αθήνα (2009).

[6] International Standard, ISO 140/III-1978. Acoustics- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part III : Laboratory measurement of airborne sound insulation of building elements

[7] International Standard, ISO 140/V-1978. Acoustics- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part V : Field measurement of airborne sound insulation of facade elements and facades.

[8] International Standard, ISO 717/1-1982. Acoustics- Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1 : Airborne sound insulation in buildings and of interior buildings elements.

[9] International Standard, ISO 717/3-1982. Acoustics- Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3 : Airborne sound insulation of facade elements and facades.

iReflectors – Έξυπνοι Ακουστικοί Ανακλαστήρες από Σύνθετα Υλικά

Διονύσιος Θ. Γ. Κατερέλος
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
dkaterel@teiion.gr

Κωνσταντίνος Δρόσος
Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
Κέρκυρα
kdrosos@ionio.gr

Αναστάσιος Κόκκινος
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
akokkin@gmail.com

Στυλιανός Ι. Μιμηλάκης
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
smimilak@teiion.gr

Ανδρέας Φλώρος
Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
Κέρκυρα
floros@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση ανακλαστήρων οροφής για τη βέλτιστη διάδοση του ήχου σε αίθουσες ακροάσεων αποτελεί σημαντικό στοιχείο του ακουστικού σχεδιασμού. Οι μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενοι ανακλαστήρες είναι σταθεροί ως προς τη θέση και το σχήμα και κατασκευάζονται από συμβατικά υλικά.Στο παρόν επιχειρείται η μελέτη της δυνατότητας αντικατάστασης των συμβατικών ανακλαστήρων από νέους, κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά. Στόχος είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός εύκαμπτων «έξυπνων» ανακλαστήρων με εμβαπτισμένα σύρματα από κράματα μνήμης σχήματος, τα οποία θα μπορούν να μεταβάλλουν το σχήμα του ανακλαστήρα κατά τις εκάστοτε ανάγκες. Η διαδικασία αλλαγής θα ελέγχεται από ηλεκτρονικό σύστημα ενεργοποίησης. Οι ανακλαστήρες θα διαθέτουν εμβαπτισμένο δίκτυο οπτικών ινών για τον έλεγχο της ανάπτυξης και διάδοσης βλάβης.

iReflectors – Smart Acoustical Composite Reflectors

ABSTRACT

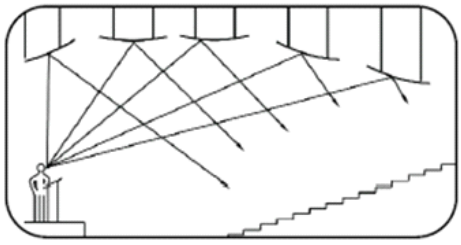
The use of reflectors for the optimal sound diffusion is a major issue in Room Acoustics. Up to now, the applied reflectors are stable, with certain shape and made by conventional materials. In the present is studied the possibility to replace the conventional reflectors by new, manufactured by composite materials. The aim is to

design flexible "intelligent" reflectors that will adapt their shape depending on the certain acoustical needs of a room. This change is planned to be actuated using embedded shape memory alloy (SMA) wires. The adaptation process will be controlled automatically by an electronic system. In order to control damage initiation and growth within the composite panel, an optical fibres network will be applied.

Λέξεις κλειδιά: Ανακλαστήρες, σύνθετα υλικά, έξυπνοι ανακλαστήρες

1. Εισαγωγή

Η παροχή φυσικής ενίσχυσης στο φυσικό ήχο είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο στους μικρούς χώρους, αίθουσες διδασκαλίας, συναντήσεων, κλπ, όσο και περισσότερο σε μεγάλους χώρους εκδηλώσεων, όπου η απόσταση ηχητικής πηγής και δέκτη είναι μεγάλη. Κοίλες, κυρτές ή επίπεδες επιφάνειες (ανακλαστήρες) χρησιμοποιούνται για τη φυσική ενίσχυση του ήχου και, γενικότερα, τη διαχείριση της ηχητικής ενέργειας [1]. Η διαχείριση της ηχητικής ενέργειας περιλαμβάνει την βέλτιστη ένταση και κατευθυντικότητα του ήχου καθώς και το συγχρονισμό των ανακλάσεών του από τις περιβάλλουσες επιφάνειες της αίθουσας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανακλαστήρων επιδεικνύουν συγκεκριμένες δυνατότητες ανά ζώνη συχνοτήτων. Σε κάθε περίπτωση, κάθε τέτοια διάταξη είναι στατική και δεν μπορεί να μεταβάλει το σχήμα της. Χαρακτηριστική διάταξη αίθουσας με ανακλαστήρες οροφής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.1. Οι εμφανιζόμενοι ανακλαστήρες έχουν καμπύλο (κυρτό σχήμα). Η διαχείριση της ενέργειας παρουσιάζεται απλουστευμένα ώστε να εντυπωθεί η γενική αρχή λειτουργίας των ανακλαστήρων.



Σχήμα 1.1 Αίθουσα εκδηλώσεων με ανακλαστήρες οροφής

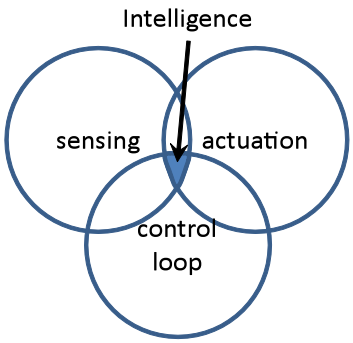
Το συνηθέστερο συμβατικό υλικό κατασκευής ανακλαστήρων είναι το συνθετικό ξύλο (κόντρα πλακέ) με επίστρωση gel coat ενισχυμένου με ίνες γυαλιού.

Οι ανακλώσες κυρτές επιφάνειες βοηθούν στη διάχυση του ήχου, ενώ οι κοίλες στην εστίαση αυτού. Η εστίαση του ήχου θεωρείται αποφευκτέα διότι ενώ ενισχύει τον ήχο στο χώρο της εστίας, εκτός του χώρου αυτού δεν έχει καμία επίδραση. Επομένως, η ένταση του ήχου θα διαφέρει σημαντικά εντός της αίθουσας. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς, χρησιμοποιούνται ως ανακλαστήρες, σχεδόν αποκλειστικά, κυρτές επιφάνειες. Στόχος της παρούσας, είναι η μετατροπή του

μειονεκτήματος που παρουσιάζουν οι κοίλες επιφάνειες σε πλεονέκτημα, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες της αίθουσας. Αναλυτικότερα, σε περιπτώσεις αιθουσών όπου το ακροατήριο δεν καταλαμβάνει όλο το χώρο, αλλά συγκεκριμένες περιοχές, η παραπάνω συμπεριφορά μπορεί να βοηθήσει ώστε η ηχητική ενέργεια να διαχέεται καλύτερα και περισσότερο στις περιοχές κοινού από τα κενά σημεία.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους, είναι ότι ο σχεδιασμός αρχίζει από το ίδιο το υλικό, έτσι ώστε να προσφέρει ακριβώς τις ιδιότητες που απαιτούνται. Επί πλέον εμφανίζουν μεγάλες τιμές ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή, κλπ) καθιστώντας τα ενδεικτικά σε εφαρμογές όπου το βάρος παίζει σημαντικό ρόλο.

Η εμφάνιση μεταλλικών κραμάτων με ξεχωριστές ιδιότητες, όπως η μνήμη σχήματος, η υπερελαστικότητα και η μεγάλη απόσβεση κατέστησε δυνατή την «ενεργοποίηση» κατασκευών κάτω από θερμικά, μηχανικά, μαγνητικά και ηλεκτρικά ερεθίσματα. Τα κράματα αυτά είναι γνωστά ως «κράματα με μνήμη σχήματος» - Shape Memory Alloys (SMA). Ο συνδυασμός των συνθέτων υλικών και των SMA οδήγησε στην κατασκευή υλικών που παρουσιάζουν «ευφυΐα». Οι Kelly κ.α. [2] ορίζουν την «ευφυΐα» όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.2 ως το σημείο τομής των ικανοτήτων αίσθησης, ενεργοποίησης και του ελέγχου αυτών:



Σχήμα 1.2 Το σημείο τομής των τριών κύκλων της αίσθησης, της ενεργοποίησης και του βρόγχου ελέγχου ορίζει την «ευφυΐα» [2]

Στο παρόν μελετάται η δυνατότητα σχεδιασμού ανακλαστήρων οροφής, οι οποίοι να διαθέτουν ευφυΐα, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό.

2. Ακουστικοί Ανακλαστήρες

Οποιοδήποτε φάτνωμα (panel) με λεία επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως ακουστικός ανακλαστήρας αν τηρούνται ορισμένες συνθήκες, οι οποίες είναι [3, 4]:

α) συντελεστής απορρόφησης επιφάνειας, $\alpha < 0.1$

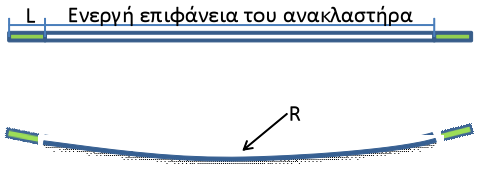
β) ανενεργό μήκος ανακλαστήρα, $2L > \lambda$ (βλ. Σχήμα 2.1)

γ) ακτίνα καμπυλότητας, $R > 2\lambda$

δ) η μικρότερη διάσταση του ανακλαστήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.5λ

ε) το βάρος του ανακλαστήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 9.79 kg/m^2 για

ομιλία και 19.58 kg/m^2 για μουσική



Σχήμα 2.1 Επίπεδος και καμπύλος ανακλαστήρας. Βασικά μεγέθη

Επιπλέον, ο ήχος ενισχύεται από ανακλάσεις που συμβάλλουν με τον απευθείας ήχο εντός 50 ms. Οι ανακλάσεις που φθάνουν μετά από αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να ακουστούν ως ηχώ και μειώνουν την καταληπτότητα. Το χρονικό διάστημα των 50 ms είναι όσο απαιτείται ώστε ο ήχος να ταξειδέψει σε απόσταση 17 m. Επομένως, μια παράμετρος σχεδιασμού τοποθέτησης των ανακλαστήρων είναι ότι ο ανακλώμενος ήχος δεν πρέπει να ταξειδεύει πάνω από 17 m έως ότου συμβάλλει με τον απευθείας στο σημείο του δέκτη. Γενικά προτείνεται κάλυψη οροφής από ανακλαστήρες από 50% – 70%. Τα κενά μεταξύ αυτών βοηθούν στη σύζευξη του όγκου του αέρα πάνω και κάτω από τους ανακλαστήρες. Πυκνότερη τοποθέτηση δε θα επέτρεπε την ακουστική σύζευξη με αρνητική επίδραση στην αντήχηση του χώρου. Η ανακλαστήρες πρέπει να είναι ακουστικά ορατοί από την ηχητική πηγή [3, 4].

3. Υλικά

Το συνηθέστερο συμβατικό υλικό κατασκευής ανακλαστήρων είναι το συνθετικό ξύλο (κόντρα πλακέ). Το υλικό αυτό είναι δύσκαμπτο και επομένως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή που προτείνεται στο παρόν. Σήμερα είναι διαθέσιμη πληθώρα υλικών που μπορεί να καλύψει της ανάγκες κατασκευών με ιδιαιτερότητες, παρέχοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού από το ίδιο το υλικό. Αυτό σημαίνει ότι είναι εφικτό να σχεδιαστεί υλικό που θα προσφέρει συγκεκριμένες απαιτούμενες θερμομηχανικές ιδιότητες.

Στην παρούσα εργασία, το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστούν οι ανακλαστήρες οφείλει να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες με βασικότερη την ανάκλαση του ήχου. Αφού εξασφαλιστεί η επιθυμητή ακουστική συμπεριφορά, αναζητείται η «ευφυΐα» στη δυνατότητα μεταβολής του σχήματός τους, ώστε να προσαρμόζονται στις εκάστοτε ανάγκες της αίθουσας. Επομένως, το βασικό υλικό απαιτείται να είναι εύκαμπτο. Επειδή η κατασκευή θα βρίσκεται συνεχώς υπό μηχανική τάση ελλοχεύει ο κίνδυνος ανάπτυξης βλάβης λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του υλικού και κόπωσης. Για τη μείωση του κινδύνου αυτού, το υλικό πρέπει να έχει υψηλή στερρότητα (toughness). Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Composite Materials) αποτελούν ομάδα υλικών η οποία κατάλληλα σχεδιαζόμενη μπορεί να ανταποκριθεί στις ως άνω απαιτήσεις. Ως πρώτη προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες Kevlar® και επικάλυψη από gel coat ενισχυμένο με ίνες γυαλιού ώστε να παρέχει τις απαιτούμενες ακουστικές ιδιότητες.

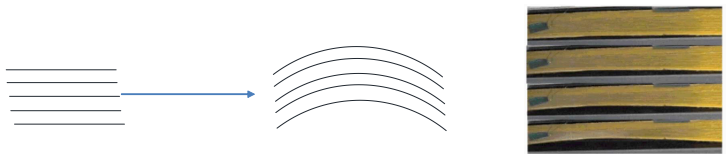
4. Σχεδιασμός

Λόγω της καμπτικής μορφής της φόρτισης που θα υφίστανται οι ανακλαστήρες, ώστε να καμπυλώνονται, η ακολουθία στρώσεων της πλακός θα είναι $[0_4/90_8]_s$. Αυτό σημαίνει ότι θα αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.125 mm η κάθε μία (συνολικό πάχος 3 mm) εκ των οποίων, οι μεν 8 εξωτερικές (4 στην πάνω πλευρά και 4 στην κάτω πλευρά) θα είναι προσανατολισμένες ώστε να μπορούν να φέρουν τα εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία που αναπτύσσονται στην πάνω και κάτω επιφάνεια της πλάκας, αντίστοιχα, ενώ οι 16 εσωτερικές θα είναι προσανατολισμένες κάθετα στις πρώτες, έτσι ώστε να μη φέρουν ιδιαίτερη αντίσταση κατά τη διαδικασία αλλαγής σχήματος της πλακός (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Ακολουθία στρώσεων ανακλαστήρα από σύνθετα υλικά (σχηματικά)

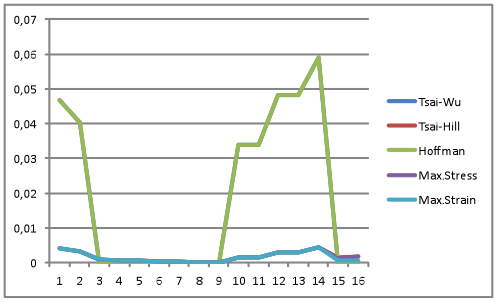
Η ενεργοποίηση του ανακλαστήρα, δηλ. η αλλαγή του σχήματός του, θα γίνεται με τη χρήση SMA στη μορφή συρμάτων, τα οποία θα είναι εμβαπτισμένα μέσα στο σώμα της κατασκευής, στο μέσο του πάχους της. Η αλλαγή που προκαλείται με τη θερμοκρασία στο σχήμα των SMA φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.2(α). Η αλλαγή σχήματος των SMA γίνεται με τη θερμοκρασία, η οποία μεταφέρεται στο σύνθετο ως ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιώντας την αντίσταση των συρμάτων μετατρέπεται σε θερμότητα. Στο σχήμα 4.2(β) φαίνεται η αλλαγή σχήματος που προκαλεί σε ένα σύνθετο από Kevlar®/Epoxy η ενεργοποίηση συρμάτων SMA.



Σχήμα 4.2 (α) Αλλαγή σχήματος συρμάτων από SMA. (β) ενεργοποίηση συνθέτου από Kevlar® με τη χρήση SMA [5]

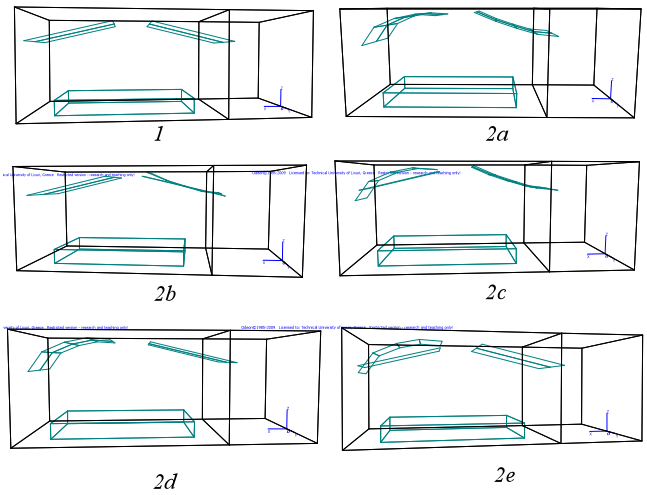
Το επόμενο στάδιο αφορά τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του συνθέτου. Ένας πρώτος έλεγχος μπορεί να γίνει με τη χρήση της Κλασσικής Θεωρίας Πολυστρώτων Πλακών (Classical Lamination Theory – CLT) [8] για πολύστρωτη

πλάκα η οποία υφίσταται φόρτιση υπό ροπή κάμψης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Πιθανότητα αστοχίας ανακλαστήρα από Kevlar®/Epoxy

Χρησιμοποιήθηκαν 5 κριτήρια αστοχίας για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του ανακλαστήρα. Η τιμή που ορίζεται από τα κριτήρια ώστε να θεωρείται αστοχία στην κατασκευή είναι 1. Από το σχήμα φαίνεται ότι κανένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν δεν προβλέπει αστοχία του ανακλαστήρα.



Σχήμα 4.3 Μελέτες περιπτώσεων: 1. Επίπεδοι ανακλαστήρες, 2a. Εμπρός κυρτοί – πίσω κοίλοι, 2b. Εμπρός ένας κυρτός, ένας επίπεδος – πίσω δύο επίπεδοι, 2c. Εμπρός κυρτοί – πίσω ένας κοίλος, ένας επίπεδος, 2d. Εμπρός επίπεδοι – πίσω κοίλοι, 2e. Εμπρός επίπεδοι – πίσω ένας κοίλος, ένας επίπεδος

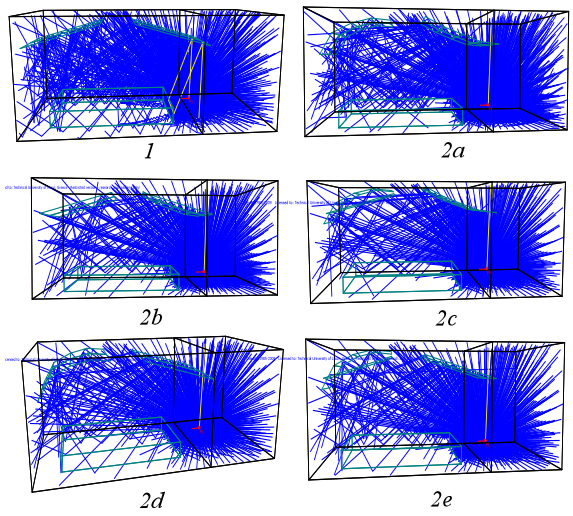
Η ακουστική της αίθουσας μελετήθηκε με προσομοίωση στο λογισμικό Odeon της Brüel & Kjaer [6]. Ως αίθουσα χρησιμοποιήθηκε κοινός ορθογώνιος χώρος διαστάσεων 20m × 10m × 7.5m και όγκου V = 1500 m^3. Για την πληρέστερη

κατανόηση της συμπεριφοράς των ανακλαστήρων, θεωρήθηκε ότι οι τοίχοι της αίθουσας είναι πλήρων απορροφητικοί (a = 1). Οι θέσεις του ακροατηρίου μοντελοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προγράμματος προσομοίωσης [7] ως ξύλινες θέσεις εμβαδού 1 m^2 (κωδικός 11003). Το χαμηλότερο σημείο των ανακλαστήρων βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις σε απόσταση 4.8 m από το δάπεδο της αίθουσας. Μελετήθηκαν έξι (6) διαφορετικοί συνδυασμοί ανακλαστήρων, οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

Το «ευφυές» της κατασκευής εξασφαλίζεται με την προσθήκη δικτύου οπτικών ινών μέσω των οποίων καταγράφεται η συμπεριφορά αυτής, καθώς και με κατάλληλους αισθητήρες τοποθετημένους σε προεπιλεγμένα σημεία της αίθουσας. Η πληροφορία από τα δύο δίκτυα μεταφέρεται σε σύστημα ελέγχου, μέσω του οποίου γίνεται η ενεργοποίηση των συρμάτων SMA και λειτουργεί η κατασκευή.

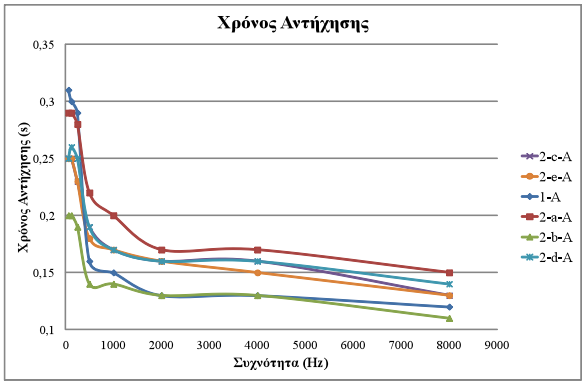
5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στο παρακάτω σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ακουστικής προσομοίωσης του χώρου για τις ως άνω (σχήμα 4.4) 6 μελέτες περίπτωσης.



Σχήμα 5.1 Αποτελέσματα ακουστικής μελέτης περιπτώσεων

Όπως φαίνεται από το πιο πάνω σχήμα εμφανίζεται διαφοροποίηση στην κατανομή της ηχητικής ενέργειας στο χώρο ανάλογα με το συνδυασμό ανακλαστήρων που χρησιμοποιούνται. Στο επόμενο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ο χρόνος αντήχησης στην αίθουσα για τις 6 μελέτες περίπτωσης στο εύρος συχνοτήτων από 0 έως 8kHz. Η μεταβολή του χρόνου αντήχησης δεν είναι ιδιαίτερα έντονη σε σχέση με το εκάστοτε σύστημα ανακλαστήρων. Αυτό είναι σημαντικό διότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή διαχείριση της ακουστικής ενέργειας, χωρίς την ουσιαστική μεταβολή της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας.



Σχήμα 5.2 Χρόνος αντήχησης αίθουσας ανά μελέτη περίπτωσης

Στο παρόν επιχειρείται η παρουσίαση συστήματος «έξυπνων» ανακλαστήρων με στόχο την καλύτερη διαχείριση της ακουστικής ενέργειας σε σχέση με τη χωροθέτηση του ακροατηρίου σε αίθουσα ακροάσεων. Οι ανακλαστήρες κατασκευάζονται ως πλάκες από εύκαμπτα σύνθετα υλικά (Kevlar®/Epoxy) ακολουθίας στρώσεων $[0_4/90_8]_s$ με εμβαπτισμένα σύρματα SMA για τη μεταβολή του σχήματός τους από επίπεδο σε καμπύλο (κυρτό ή κοίλο). Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται με δίκτυο οπτικών ινών όσον αφορά τη δομική τους ακεραιότητα και αισθητήρες θέσεων για το που πρέπει να διαχυθεί η ακουστική ενέργεια. Η προσομοίωση του συστήματος έδειξε ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την περεταίρω δυνατότητα κατασκευής και εφαρμογής του. Η ηχητική ενέργεια διαχέεται ελεγχόμενα στο χώρο χωρίς σημαντική μεταβολή της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας, ενώ δεν προβλέπεται η ανάπτυξη βλάβης, τουλάχιστον στα πρώτα στάδια λειτουργίας. Η πρόταση χρήζει περεταίρω έρευνας.

6. Αναφορές

[1] Δ. Ευθυμιάτος, «Ακουστική και Κτιριακές Εφαρμογές – Θεωρία και Πράξη,» Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2007

[2] A. Kelly, R. Davidson, K. Uchimo, «Smart composite materials systems» in *Comprehensive Composite Materials*, 5.20, 2000

[3] ASTM C423 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

[4] ASTM E795 Standard Practices for Mounting Test Specimens during Sound Absorption Tests

[5] G. C. Psarras, J. Parthenios, C. Galiotis, "Adaptive composite incorporating shape memory alloy wires", Journal of materials, 36, 535-546 (2001)

[6] Odeon version 10.1 Industrial. Odeon A/S, Denmark, 2009

[7] Claus Lynge Christensen, Odeon A/S, "Odeon Room Acoustics Program version 10.1 Industrial, Auditorium, Combined Editions Manual Paper", 2009

[8] R. M. Jones, Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis, 1999

Δυνατότητες Συλλογής και Μετατροπής Διάχυτης Ακουστικής Ενέργειας

Χαράλαμπος Παπαδάκος
Ερευνητής /Εργαστήριο Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
26504, Πανεπιστήμιο Πατρών
papadakos @ upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος
Καθηγητής /Εργαστήριο Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών
26504, Πανεπιστήμιο Πατρών
mourjop @ upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σημερινή εποχή παρατηρείται ραγδαία αύξηση των εφαρμογών που για τη λειτουργία τους απαιτείται ολοένα και πιο μικρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας. Εφαρμογές όπως οι αισθητήρες και τα ασύρματα δίκτυα, τα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος, οι βιοϊατρικές εφαρμογές κ.α. έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην αξιοποίηση πηγών ενέργειας από το περιβάλλον που προσφέρουν το απαραίτητο κατά περίπτωση ποσό ισχύος και κυρίως είναι διαθέσιμες στο εγγύς πεδίο της εκάστοτε εφαρμογής. Τέτοιες πηγές είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, τόσο απ΄ τον ήλιο όσο και από το υπέρυθρο φάσμα και τις ραδιοσυχνότητες, οι θερμικές πηγές, οι μηχανικές καταπονήσεις, οι δονήσεις και η βιοχημεία. Κάθε πηγή χαρακτηρίζεται από τη διαθέσιμη στο περιβάλλον πυκνότητα ισχύος της, ενώ η αξιοποίησή της εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της επιτόπιας εφαρμογής.

Η αξιοποίηση της ακουστικής ενέργειας, η οποία παράγεται σε συνεχή βάση και καθημερινά, από την ανθρώπινη δραστηριότητα διαμέσου της αναπαραγωγής ομιλίας και μουσικής, τις οικιακές συσκευές, τα μηχανήματα, τον βιομηχανικό, οδικό, σιδηροδρομικό και αεροπορικό θόρυβο κ.α., αποτελεί μια πρόσφατη εναλλακτική πρόταση και φαίνεται πως μπορεί να συμβάλλει σημαντικά προς αυτή την κατεύθυνση. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να αναδείξει το σχετικό ενδιαφέρον πραγματοποιώντας αρχικά μια ανασκόπηση των αιτημάτων για κατοχύρωση διπλωματος ευρεσιτεχνίας, που κατατέθηκαν διεθνώς από ερευνητικούς και βιομηχανικούς φορείς την περασμένη δεκαετία. Ακολούθως, επιχειρείται μια αξιολόγηση της δυναμικής της ακουστικής ενέργειας εκτιμώντας τη διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος στο περιβάλλον και συγκρίνοντάς την με εκείνη των πηγών ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω.

On Potential Of Harvesting And Transduction Of Ambient Acoustic Energy

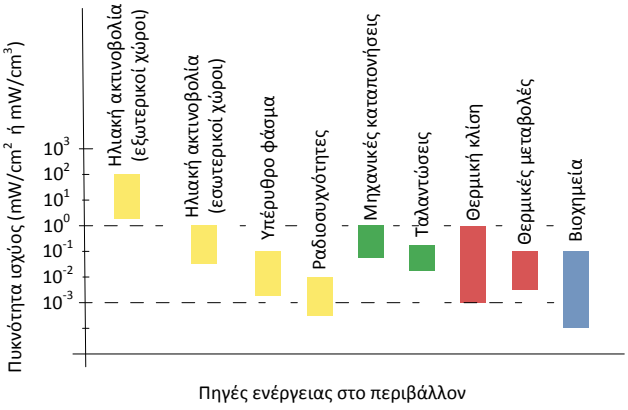
ABSTRACT

Nowadays there is a rapid increase of applications that require increasingly small amount of electrical energy to be operated. Applications such as sensors and wireless networks, low power electronics, biomedical applications etc. have turned the interest into exploiting ambient energy sources that offer the necessary amount of energy and mainly that are available in the near field of each application. Such sources are electromagnetic radiation, both from the sun and from the infrared and radio frequencies, thermal sources, mechanical stress, vibrations and biochemistry. Each source is characterized by its available power density and its exploitation is directly dependent on the application site.

Exploitation of acoustic energy, which is being produced almost continuously and in a daily basis, by the human activity via speech and music reproduction, household apparatuses, machinery, industrial, road, railway and airport noise etc, is a recent alternative approach and seems to be capable of contributing significantly in this direction. This work attempts to highlight the relevant interest by making an overview of the related patent applications submitted by researchers and industry worldwide in the past decade. Subsequently, attempts to assess the dynamics of acoustic energy considering the available acoustic power density in the environment and comparing it with that of the aforementioned energy sources.

1 Εισαγωγή

Κάθε πηγή ενέργειας στο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μια διαφορετική δυναμική ως προς τη διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος της και η αξιοποίησή της είναι σε



Σχήμα 1.1 *Διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος ανά πηγή ενέργειας.*

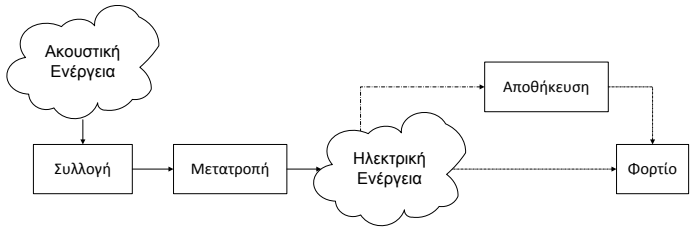
κάθε περίπτωση άμεση συνάρτηση της φύσης της εφαρμογής και των επιτόπιων χαρακτηριστικών της.

Σε ό,τι αφορά στην παραγωγή μικρής κλίμακας ηλεκτρικής ενέργειας, το Σχ. 1.1 απεικονίζει ενδεικτικά τη διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος των πηγών ενέργειας που αξιοποιούνται προς αυτή την κατεύθυνση [1]. Όπως γίνεται φανερό, η διαθέσιμη πυκνότητα ισχύος ενδέχεται να κυμαίνεται μεταξύ 100 $\frac{mW}{cm^2}$ και 0.1 $\frac{\mu W}{cm^2}$ υποδεικνύοντας μια σημαντική διαφορά στη δυναμική των διαφόρων πηγών ενέργειας, τάξης μεγέθους περίπου ίσης με 10^6.

2 Προτάσεις Για Συστήματα Συλλογής και Μετατροπής Ακουστικής Ενέργειας

Την περασμένη δεκαετία κατατέθηκε σε διεθνές επίπεδο ένας σημαντικός αριθμός αιτήσεων για κατοχύρωση διπλώματος ευρεσιτεχνίας με επίκεντρο την ακουστική ενέργεια και την αξιοποίησή της. Πιο συγκεκριμένα, μέσα από μια ποικιλία μεθόδων, διατάξεων και συσκευών, οι προτάσεις αυτές ανέδειξαν τις δυνατότητες για συλλογή και μετατροπή της ακουστικής ενέργειας σε μικρής κλίμακας ηλεκτρική ενέργεια. Μια επισκόπηση των προτάσεων αυτών θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Γενικά, μια διαδικασία συλλογής και μετατροπής της ακουστικής ενέργειας περιλαμβάνει τυπικά ένα σύνολο από επί μέρους διεργασίες όπως αυτές που απεικονίζονται στο μπλοκ διάγραμμα του Σχ. 2.1.



Σχήμα 2.1 *Διάγραμμα ροής διεργασιών για τη συλλογή και μετατροπή της ακουστικής ενέργειας.*

Το 2000, οι J.Michel kai B.Raaf γνωστοποίησαν εφεύρεση σχετική με την ασύρματη μεταφορά ακουστικών δεδομένων σε δέκτη με τη χρήση ενός παθητικού μικροφώνου. Η εφεύρεση περιλαμβάνει πιεζοηλεκτρικό στοιχείο υπεύθυνο για τη μετατροπή των λαμβανόμενων ακουστικών σημάτων σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία εν συνεχεία μεταδίδονταν ασύρματα στη μονάδα του δέκτη. Σύμφωνα με τους εφευρέτες η διάταξη είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για τηλεφωνικές εφαρμογές [2].

Το 2004, ο M. Masahiro γνωστοποίησε έναν μηχανισμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη σε συνδυασμό με πηνίο κατάλληλα τοποθετημένο εντός της μαγνητικής του ροής και επιφάνεια που υπόκειται σε ταλάντωση κατά την πρόσπτωση ακουστικών κυμάτων [3].

Το 2006, ο J. L. Schrader αποκάλυψε σχετική μέθοδο και συσκευή για τη μετατροπή της ακουστικής ενέργειας στο περιβάλλον σε ηλεκτρική τάση. Σε πρώτο στάδιο, η συσκευή πραγματοποιεί τη μετατροπή της ακουστικής ενέργειας

σε ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας μια διάταξη πηνίου και μαγνήτη που προαιρετικά μπορεί να συνδυαστεί με έναν κώνο, χωνί κτλ. Έπειτα, το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται σ΄ έναν μετατροπέα για την παραγωγή κατάλληλης ηλεκτρικής τάσης και μια δίοδος που είναι συνδεδεμένη με αυτόν παρέχει ενέργεια στον άξονα ενός σφονδύλου. Μαγνήτες που είναι ενσωματωμένοι σε αυτόν, δρώντας σαν ρότορας, αρχίζουν να περιστρέφονται επάγοντας ρεύμα σε ένα σύνολο περιελίξεων που αντιστοίχως δρουν σαν στάτορας. Η δίοδος επιταχύνει σταδιακά τον σφόνδυλο και όταν αυτός επιτυγχάνει τον ονομαστικό αριθμό στροφών του, δηλαδή μια πλήρη κατάσταση φόρτισης, είναι έτοιμος να εκφορτιστεί. Η εκφόρτιση μπορεί να είναι αυτόματη, ή διακοπτόμενη, ή σε ανταπόκριση με τη διακοπή ρεύματος σ΄ ένα υπάρχον σύστημα. Ο εφευρέτης ισχυρίζεται ότι η συσκευή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εφεδρικά όντας ενσωματωμένη σε μια υπάρχουσα πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως ηλιακή, αιολική, υδραυλική κ.α. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα σε απομακρυσμένες εφαρμογές όπως για σηματοδότηση σε ένα οδικό δίκτυο κ.α. [4].

Το 2006, οι J. K. Thurber and J. L. Thurber αποκάλυψαν, ανάμεσα σε άλλα, μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ακουστική ενέργεια, η οποία στη βασική της υλοποίηση περιλαμβάνει έναν ρότορα συνδεδεμένο ομοαξονικά τουλάχιστον με έναν ταλαντωτή χαμηλής συχνότητας, τον ταλαντωτή τοποθετημένο εφαπτομενικά σε έναν άξονα του ρότορα ώστε να προκαλεί την περιστροφή αυτού γύρω από τον άξονά του και τον στάτορα εντός του οποίου είναι τοποθετημένος ομοαξονικά ο ρότορας. Σε μια βελτιωμένη εκδοχή, ο ρότορας είναι ομοαξονικά τοποθετημένος στο εγγύς άκρο ενός στελέχους το απώτερο άκρο του οποίου βρίσκεται πάνω από τον ρότορα και τον στάτορα και στο οποίο τοποθετείται ο ταλαντωτής. Περαιτέρω βελτιώσεις περιλαμβάνουν δύο ταλαντωτές τοποθετημένους στο στέλεχος αντιδιαμετρικά, ή τρεις ή περισσότερους τοποθετημένους σε ίσες αποστάσεις [5].

Το 2007, οι J. D. Adamson and G. P. O'Brien, σε μια εκτενή περιγραφή της εφεύρεσής τους, αποκάλυψαν μια συνδεσμολογία ελαστικών με δυνατότητες μετατροπής ενέργειας. Η εν λόγω συνδεσμολογία περιλαμβάνει μια δομή ελαστικού και έναν ηλεκτροακουστικό μετατροπέα για τη μετατροπή της ακουστική ενέργειας που παράγεται κατά την κίνηση του ελαστικού σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο ηλεκτροακουστικός μετατροπέας δύναται να αφορά σε ένα ηλεκτροδυναμικού τύπου μικρόφωνο, ή σε άλλους τύπους μικροφώνου. Το πηνίο του ηλεκτροδυναμικού μικροφώνου συζευγνύεται με περαιτέρω στοιχεία όπως έναν ανορθωτή, μια συσκευή αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας π.χ. έναν πυκνωτή, ή μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, και έναν ρυθμιστή τάσης. Επαρκής συσσώρευση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί έπειτα να τροφοδοτεί τα ηλεκτρονικά του ελαστικού που ενδέχεται να περιλαμβάνουν διάφορους αισθητήρες, ένα στροφόμετρο, μια συσκευή λήψης και εκπομπής ραδιοσυχνοτήτων, μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ή κάποια διάταξη φωτισμού [6].

Το 2008, ο T. S. Lee γνωστοποίησε συσκευή η οποία συνδυάζει ένα πιεζοηλεκτρικό μικρόφωνο και ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της δημιουργίας ενός δονούμενου μαγνητικού πεδίου [7].

Το 2011, οι J. K. Thurber and J. L. Thurber αποκάλυψαν μέθοδο και συσκευή η οποία μπορεί να παράγει κινητική και ηλεκτρική ενέργεια από ακουστικά κύματα και η οποία πιθανώς να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες υψηλής

συχνότητας και ηλεκτρογεννήτριες. Ειδικότερα, τα ακουστικά κύματα σε ορισμένες συχνότητες διαδίδονται κατά μήκος της μια πλευράς ενός επίπεδου ή άλλου διαχωριστικού στοιχείου προκαλώντας ροή αέρα κατά μήκος της επιφάνειας του στοιχείου, το οποίο, με τη σειρά του, προκαλεί ελάττωση της πίεσης του αέρα κοντά στη επιφάνειά του. Από τη διαφορά της πίεσης εκατέρωθεν του επίπεδου στοιχείου παράγεται ώση και το στοιχείο κινείται. Η κίνηση αυτή φέρεται ότι μέσω μιας διάταξης τύπου ρότορα και στάτορα είναι σε θέση να παράγει κινητική και ηλεκτρική ενέργεια [8].

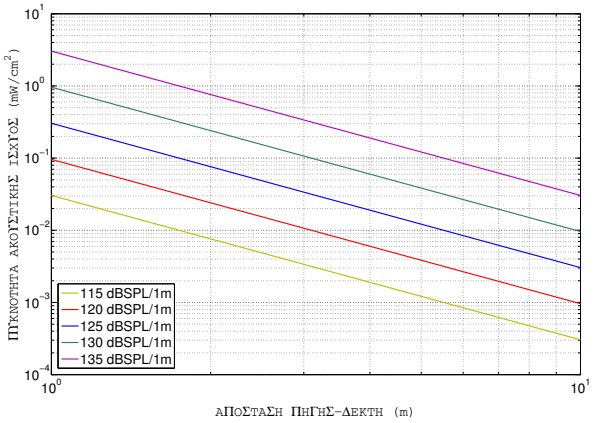
Το 2011, ο I.H. Jee γνωστοποίησε την εφεύρεσή του που αφορά σε μια γεννήτρια ακουστικών συντονισμών η οποία μπορεί να τοποθετηθεί σε χώρους όπου παράγεται σημαντική ποσότητα ακουστικής ενέργειας όπως στον υπόγειο σιδηρόδρομο και το μετρό, σε τούνελ του οδικού δικτύου και στην πίστα ενός αεροδρομίου, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη συσκευή περιλαμβάνει έναν σωλήνα τύπου κόρνας, στο εσωτερικό του οποίου σχηματίζεται ένα ελικοειδές προεξέχον μέρος για τη συλλογή των ήχων. Οι ήχοι που συλλέγονται οδηγούνται σε μια δεξαμενή συντονισμού που συνδέεται στην πίσω πλευρά του σωλήνα. Στην περιφέρεια αυτής τοποθετούνται συντονιστές οι οποίοι κατά τη λήψη των ήχων υποβάλλονται σε ταλάντωση. Στη μία πλευρά καθενός εξ΄ αυτών είναι τοποθετημένη μια διάταξη με μαγνήτες, που μεταξύ τους έχουν αντίθετη πολικότητα, και η οποία κατά την ταλάντωση του συντονιστή κινείται εντός των τυλιγμάτων ενός στάτορα επάγοντας σε αυτόν ηλεκτρεγερτική δύναμη. Αυτή με τη σειρά της οδηγείται σε κύκλωμα σταθεροποίησης και σε κύκλωμα ρύθμισης τάσης, ώστε να φορτίσει μια μπαταρία ή να οδηγήσει απευθείας ένα φορτίο. Επίσης, η συσκευή περιλαμβάνει μια θήκη τοποθετημένη εξωτερικά της δεξαμενής συντονισμού σε μια προκαθορισμένη απόσταση που χρησιμοποιείται για τη στήριξη των στατόρων. Η θήκη αυτή δημιουργεί έναν θάλαμο συντονισμού, ο οποίος κλείνει κατάλληλα σε κάθε μια από τις τερματικές του πλευρές με τη χρήση διαφραγμάτων που επιτρέπουν τη ροή αέρα κατά τους συντονισμούς. Τέλος, ένα επίπεδο τοποθετημένο στην πίσω πλευρά της δεξαμενής συντονισμού χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του όγκου της κι έτσι καθορίζει τον συντονισμό της [9].

3 Δυναμική της Ακουστικής Ενέργειας

Στην ενότητα που ακολουθεί επιχειρείται μια πρώτη εκτίμηση της δυναμικής της ακουστικής ενέργειας ως προς το διαθέσιμο ποσό πυκνότητας ακουστικής ισχύος στο περιβάλλον. Προς τούτο, εδώ κατηγοριοποιούμε τις πηγές ήχου με βάση τη στάθμη αναφοράς τους, δηλαδή τη στάθμη ηχητικής πίεσης που παράγουν σε απόσταση 1 m, και υποθέτοντας σφαιρική εκπομπή όπως φαίνεται παρακάτω.

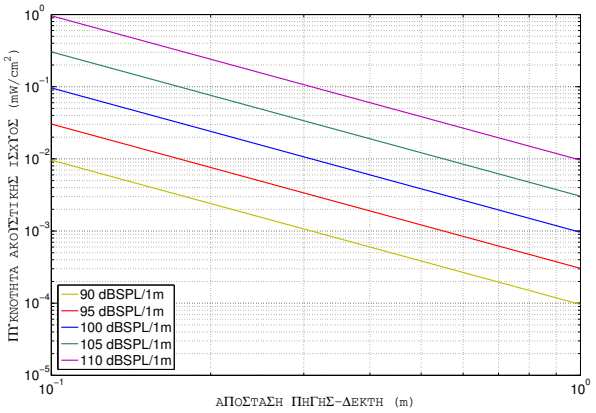
- Ισχυρές Πηγές (**I**) : κινητήρες, αεροσκάφη, οχήματα αγώνων ταχύτητας, κομπρεσέρ, σειρήνες κ.α.
- Μέτριες Πηγές (**M**) : χλοοκοπτικές μηχανές αερίου, εκχιονιστικά, τρυπάνια χειρός, μετρό, σιδηρόδρομος, κινούμενα οχήματα κ.α.
- Ασθενείς Πηγές (**A**) : Κυκλοφοριακή κίνηση, ηλεκτρικές σκούπες, ανθρώπινη δραστηριότητα κ.α.

Με βάση την παραπάνω διάκριση, είναι εφικτό να δοθεί μια πρώτη προσέγγιση της διαθέσιμης πυκνότητας ακουστικής ισχύος στο περιβάλλον συναρτήσει υποθετικών αποστάσεων πηγής - δέκτη, οι οποίες σε κάθε περίπτωση, επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε μια διαδικασία συλλογής και μετατροπής ακουστικής ενέργειας να έχει πρακτικά νόημα.



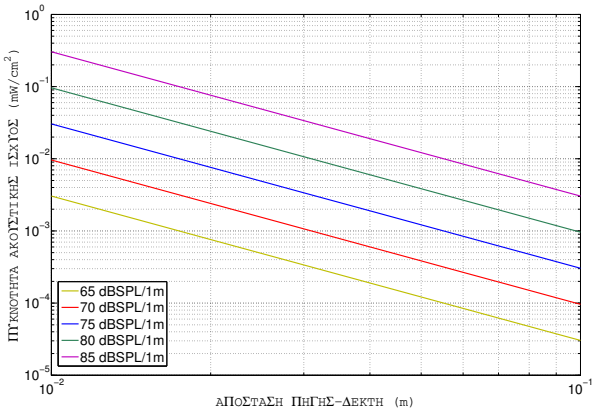
Σχήμα 3.1 *Διαθέσιμη πυκνότητας ακουστικής ισχύος συναρτήσει της απόστασης πηγής - δέκτη.*

Έτσι, σε περιβάλλοντα όπου δρουν ισχυρές πηγές ήχου, υποθέτουμε αποστάσεις πηγής - δέκτη που κυμαίνονται από 1 m μέχρι και 10 m . Γι΄ αυτό το εύρος



Σχήμα 3.2 *Διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος συναρτήσει της απόστασης πηγής - δέκτη.*

αποστάσεων εκτιμούμε τη διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος στη θέση του δέκτη, η οποία από το Σχ. 3.1 διαπιστώνουμε ότι ενδέχεται να κυμαίνεται μεταξύ 0.3 $\frac{\mu W}{cm^2}$ και 3 $\frac{mW}{cm^2}$ περίπου. Αντίστοιχα, στο Σχ. 3.2 παρατηρούμε ότι σε περιβάλλοντα όπου δρουν μέτριες πηγές ήχου, οι αποστάσεις πηγής - δέκτη θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερες, ώστε η διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος στη θέση του δέκτη να είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη που υπολογίστηκε πιο πάνω. Τέλος, από το Σχ. 3.3, σε περιβάλλοντα όπου λειτουργούν ασθενείς πηγές ήχου η διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος στη θέση του δέκτη ενδέχεται να κυμαίνεται από 0.03 $\frac{\mu W}{cm^2}$ μέχρι 0.3 $\frac{mW}{cm^2}$.



Σχήμα 3.3 *Διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος συναρτήσει της απόστασης πηγής - δέκτη.*

Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι μέθοδοι και συσκευές που αποσκοπούν στην εκμετάλλευση της ακουστικής ενέργειας ασθενών πηγών ήχου θα πρέπει να βρίσκονται τοποθετημένες σχεδόν εξ΄ επαφής ή εξαιρετικά κοντά στην εκάστοτε πηγή, ώστε μια διαδικασία συλλογής και μετατροπής της ακουστικής ενέργειας να έχει πρακτικά νόημα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να βρει ανταπόκριση σε μικρόφωνα, μεγάφωνα, κινητές εφαρμογές όπως για παράδειγμα ένα κινητό τηλέφωνο ή ένα tablet pc, ή άλλες φορητές συσκευές. Απ΄ την άλλη πλευρά, μέθοδοι και συσκευές που αποσκοπούν στην εκμετάλλευση μέτριων και ισχυρών πηγών ήχου μπορούν να τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις και σε πιο μακρινές αποστάσεις από την πηγή. Τέτοιες διατάξεις θα μπορούσαν για παράδειγμα να τοποθετηθούν στην πίστα ενός αεροδρομίου, σε ηχοπετάσματα οδικών αρτηριών με υψηλό κυκλοφοριακό φορτίο κ.α.

Όπως συμβαίνει με κάθε πηγή ενέργειας στο περιβάλλον, έτσι και η ακουστική ενέργεια ενδέχεται να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τόπο της επιτόπιας εφαρμογής και των επιμέρους χαρακτηριστικών της. Παρόλ΄ αυτά, η μέγιστη διαθέσιμη πυκνότητα ακουστικής ισχύος είναι συγκρίσιμη και σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να υπερβαίνει την αντίστοιχη των πηγών που φαίνονται στο Σχ. 1.1. Εξαίρεση αποτελεί η ηλιακή ενέργεια σε εξωτερικούς χώρους η οποία είναι μεγαλύτερη κατά μια τάξη μεγέθους ίση περίπου με 10^2.

4 Επίλογος

Σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση των προτάσεων που κατατέθηκαν διεθνώς την περασμένη δεκαετία για την απόκτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας σχετικά με την εκμετάλλευση της ακουστικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναδείχθηκε έτσι το ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη επιστημονική περιοχή και παράλληλα πως οι αισθητήρες, τα ηλεκτρονικά χαμηλής κατανάλωσης και τα ασύρματα δίκτυα είναι τα πλέον δημοφιλή πεδία εφαρμογής στις μέρες μας. Επίσης, αξιολογήθηκε η δυναμική της ακουστικής ενέργειας μέσα από την εκτίμηση της διαθέσιμης πυκνότητας ακουστικής ισχύος στο περιβάλλον και διαφάνηκε πως η ακουστική ενέργεια αποτελεί ένα σημαντικό προς αξιοποίηση ενεργειακό απόθεμα.

5 Ταυτότητα του έργου

Η έρευνα που κατέληξε στα αποτελέσματα αυτά χρηματοδοτήθηκε από Εθνικούς πόρους και από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2007-2013 βάσει της Σύμβ. Επιχορ. αριθ. ΜΙΚΡΟ2-38/Ε-ΙΙ-Α.

Αναφορές

[1] Sebastien Boisseau and Ghislain Despesse «Energy harvesting, wireless sensor networks and opportunities for industrial applications» EE-Times (2012).

[2] Jurgen Michel and Bernard Raaf «passive microphone with wireless transmission» WIPO Pub. No. WO/2000/042813 (2000).

[3] Matsunaga Masahiro «Power generating mechanism using vibration of sound-proof wall» EPO Pub. No. 2004088897 (2004).

[4] Jeffrey L. Schrader «Method and device for supplying power from acoustic energy» Pub. No. Pub. US 2006/0082158 A1 (2006).

[5] James K. Thurber and Jonathan L. Thurber «Acoustic production of useful work including propulsion, levitation and generation of electricity» WIPO Pub. No. WO 2006/113777 A2 (2006).

[6] John D. Adamson and George P. O'ABrien «System and method for harvesting electric power from a rotating tire'As acoustic energy» WIPO Pub. No. WO 2007/040536 A2 (2007).

[7] Tseng-Shen Lee «Using sound waves and photic energy for electric power» Pub. No. US 007358621 B2 (2008).

[8] James K. Thurber and Jonathan L. Thurber «Acoustic turbine» Pub. No. US 2011/0131972 A1 (2011).

[9] In-Ho Jee «Sound wave resonance generator» Pub. No. US 2011/0233941 A1 (2011).

Διαδικτυακή Πλατφόρμα Εκτίμησης Συναισθημάτων από Ηχητικά Δεδομένα

Κωνσταντίνος Δρόσος
Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
kdrosos@ionio.gr

Ανδρέας Γιαννακουλόπουλος
Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
agiannak@ionio.gr

Ανδρέας Φλώρος
Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
floros@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μία από τις κύριες διεργασίες στο πεδίο αναγνώρισης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα είναι η συλλογή της συναισθηματικής επισήμανσης. Λόγω της φύσης των δεδομένων αλλά και του πλήθους αυτών, κάθε τέτοια διεργασία μπορεί να είναι πολύπλοκη οργανωτικά και χρονοβόρος διαδικασία. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία διαδικτυακή πλατφόρμα για την συλλογή συναισθηματικών επισημάνσεων στην οποία γίνεται χρήση του ευρύτερα καθιερωμένου Self Assessment Manikin (SAM). Η πλατφόρμα επιτρέπει στον χρήση να αναπαράγει τους προς αξιολόγηση ήχους, καταγράφει τα αποτελέσματα και παρέχει επισημάνσεις σχετικά με κύρια σημεία της διεργασίας, όπως την επανάληψη του πειράματος από τον ίδιο χρήστη.

Web Based Platform for Emotion Evaluation from Audio Data

ABSTRACT

One of the main process in emotions estimation from audio data is the ground truth data collection from human listeners. Due to the nature of the data (sound data) and the amount of them, any such process may endure many hours. In the proposed paper, we present a web based platform for the collection of the ground truth data using the well-established self assessment manikin (SAM). The platform allows the user to reproduce the associated sounds on demand, records the answers and offers annotations related to key features, like the repeat of the process by the same user.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η έρευνα γύρω από την ανίχνευση συναισθημάτων τόσο σε μουσική, όσο και σε ηχητικά γεγονότα εν γένει. Ήδη υπάρχουν έρευνες σχετικά με την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων σε πληθώρα εφαρμογών, όπως μία νέα κατηγοριοποίηση της μουσικής που δεν θα ακολουθεί την παραδοσιακή βάσει καλλιτέχνη, είδους ή/και συγκροτήματος [1], ή η ''έξυπνη'' επιλογή μουσικών κομματιών βασισμένη σε συναισθήματα [2] ή, ακόμα, και εφαρμογές για ''έξυπνα'' σπίτια [3]. Κάτι που είναι κοινό σε όλες τις έρευνες σχετικά με την ανίχνευση συναισθημάτων είναι η επισήμανση του συναισθήματος στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται. Αυτή μπορεί είτε να είναι πρωτογενής, ερωτώντας απευθείας τους συμμετέχοντες σε τέτοια πειράματα, είτε δευτερογενής, βασισμένη σε ήδη επισημασμένα δεδομένα.

Στην περίπτωση της πρωτογενούς έρευνας, η διαδικασία της επισήμανσης των ηχητικών δεδομένων έχει ιδιαίτερη βαρύτητα μιας και θα αποτελέσει την βάση για την ομάδα δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του συστήματος αναγνώρισης. Λόγω της φύσης της διαδικασίας αυτής, απαιτείται χρόνος και φυσική παρουσία των συμμετεχόντων αλλά και των διοργανωτών. Έτσι, η συλλογή το μέγιστου δυνατού πλήθους απαντήσεων δυσχεραίνεται. Με την ανάπτυξη όμως νέων μεθόδων επισήμανσης των ηχητικών δεδομένων, αλλά και την χρήση των υφιστάμενων τεχνολογιών διαδικτύου, φαίνεται ότι είναι δυνατή η κατάργηση των ορίων που εισάγονται, κυρίως, από την απαίτηση για φυσική παρουσία. Όμως, αν και είναι χρήσιμη η διεξαγωγή ενός απομακρυσμένου πειράματος, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αντικατάσταση, στο μέτρο που είναι εφικτό και δυνατό, των διοργανωτών του πειράματος.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία διαδικτυακή πλατφόρμα για πειράματα εκτίμησης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα με την χρήση της μεθόδου Self Assessment Manikin (SAM). Η πλατφόρμα έχει όλες τις δυνατότητες ελέγχου των διαδικασιών του χρήστη που θα μπορούσαν, δυνητικά, να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα του πειράματος, αλλά και προσφέρει άμεση προσπέλαση των αποτελεσμάτων και αντικατάσταση των δεδομένων, σε περίπτωση επαναχρησιμοποίησης. Η υπόλοιπη εργασία είναι διαρθρωμένη ως εξής: στην Ενότητα 1 παρουσιάζονται οι μέθοδοι επισήμανσης ηχητικών δεδομένων καθώς και τα αντίστοιχα συναισθηματικά μοντέλα, ενώ στην Ενότητα 2 παρουσιάζεται η αναπτυχθείσα πλατφόρμα. Τέλος, στην Ενότητα 3 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα.

1 Διαδικασίες επισήμανσης ηχητικών δεδομένων και συναισθηματικά μοντέλα

Μία κοινή οργάνωση των ερευνών στο πεδίο της ανίχνευσης συναισθημάτων από ηχητικά μοντέλα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Όπως μπορεί να φανεί, τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την διαδικασία ανίχνευσης θα επισημανθούν, σε κάθε περίπτωση (εκπαίδευσης ή ελέγχου), για την εκμαίευση του συναισθήματος που εγείρουν στον ακροατή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρακαμφθεί εάν χρησιμοποιηθούν ήδη επισημασμένα δεδομένα. Όμως, αν και τέτοια δεδομένα θα μπορούσαν να επιταχύνουν την ολοκλήρωση του πειράματος, η υλοποίηση αυτού εξαρτάται από παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν από

τους διοργανωτές. Ο κυριότερος, ειδικά στην περίπτωση των ηχητικών γεγονότων, είναι η διαθεσιμότητα τέτοιων δεδομένων, όπου, ενδέχεται, να μην μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του πειράματος.



Σχήμα 1.1 *Η διαδικασία ανίχνευσης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα*

1.1 Διαδικασίες επισήμανσης

Η επισήμανση των ηχητικών δεδομένων πραγματοποιείται με την παρουσίαση, στον ακροατή, ενός πλήθους από διαθέσιμες επιλογές. Η επιλογή μίας εξ αυτών, ή και περισσότερων, αναλόγως το μοντέλο συναισθημάτων που χρησιμοποιείται, είναι και αυτή που χαρακτηρίζει το συναίσθημα που εγείρεται στον ακροατή από το προς εξέταση ηχητικό αρχείο. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο/οι διοργανωτής-ες του πειράματος θα πρέπει να καθοδηγήσουν τον χρήστη σχετικά με την σημασία των διαθέσιμων επιλογών.

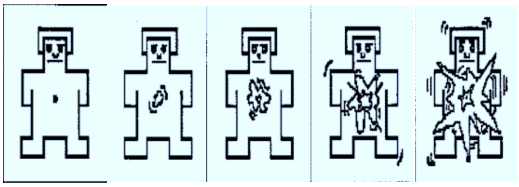
Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται απλές λεκτικές περιγραφές, η επεξήγηση είναι αρκετά απλή και μπορεί να μην χρειαστεί. Όμως αυτό σημαίνει την υιοθέτηση συγκεκριμένων μοντέλων συναισθημάτων με ό,τι περιορισμούς αυτό συνεπάγεται.

Έτσι, σε πειράματα από διάφορους κλάδους, όπως αυτός των νευροεπιστημών, μπορεί κανείς να συναντήσει λεκτικές περιγραφές όπως: Χαρά και Φόβος [4]. Ή σε αντίστοιχες έρευνες στο πεδίο του Music Emotion Recognition (MER) και της μουσικής ψυχολογίας (Music Psychology) απαντώνται τόσο οι προηγούμενες λεκτικές περιγραφές όσο και χρήση επιθέτων, όπως vigorous, graceful, soothing, dreaming [5].

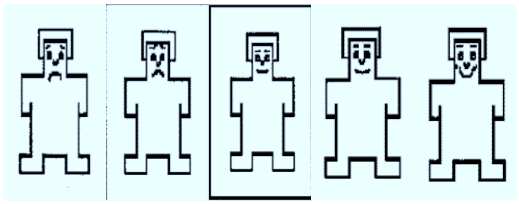
Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν κοινές λεκτικές περιγραφές για την επισήμανση. Γεγονός που συντελεί σε μία μη συνέχεια των αποτελεσμάτων μεταξύ των ερευνών, λόγω των διαφορετικών, έστω και σε ελάχιστο βαθμό, νοημάτων που υπάρχουν σε συνώνυμες λέξεις [6].

Στην εργασία [7] παρουσιάζεται ένας διαφορετικός τρόπος επισήμανσης. Αυτός ονομάζεται Self Assessment Manikin (SAM). Χρησιμοποιεί σειρές από κατάλληλες εικόνες, αντί για λεκτικές περιγραφές, και ο "χρήστης" καλείται να επιλέξει είτε μία από αυτές, είτε δύο συνεχόμενες, εάν η συναισθηματική του κατάσταση αντικατοπτρίζεται επακριβώς από μία ή είναι μεταξύ δύο εικόνων, αντιστοίχως.

Το SAM έχει χρησιμοποιηθεί ήδη σε μία πληθώρα ερευνών και μπορεί να παράγει επισημάνσεις ικανές να χρησιμοποιηθούν με πλήθος διαφορετικά μοντέλα συναισθημάτων. Οι εικόνες για τις δύο από τις τρεις σειρές, όπου είναι και αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στην πλατφόρμα που παρουσιάζεται, απεικονίζονται στα Σχήματα 1.2 και 1.3.



Σχήμα 1.2 *Η σειρά εικόνων του SAM για την κατηγορία απαντήσεων Arousal*



Σχήμα 1.3 *Η σειρά εικόνων του SAM για την κατηγορία απαντήσεων Valence*

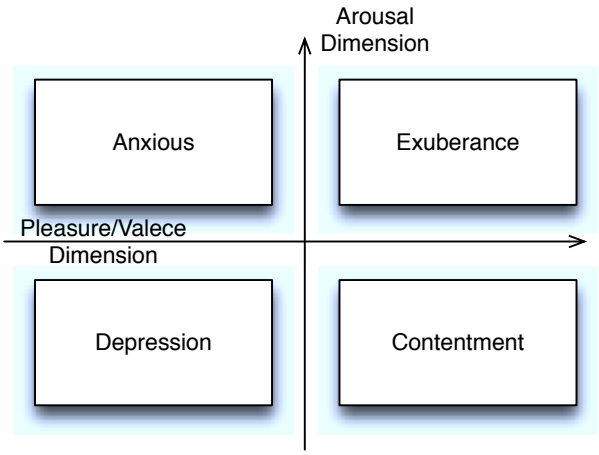
1.2 Συναισθηματικά μοντέλα

Τα συναισθηματικά μοντέλα μπορούν αν διαχωριστούν σε δύο "αφηρημένες" (abstract) κατηγορίες. Τα διακριτά και τα συνεχή [8]. Στα μεν πρώτα, ανήκουν μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν συγκεκριμένες λέξεις για την περιγραφή των συναισθημάτων, όπως το μοντέλο των βασικών συναισθημάτων (Basic Emotions) [9] ή το μοντέλο της λίστας επιθέτων (List of Adjectives) [10].

Όπως μπορεί να φανεί, τα μοντέλα αυτά συνάδουν με τις μεθόδους επισήμανσης που χρησιμοποιούν συγκεκριμένες λεκτικές περιγραφές, πράγμα που σημαίνει ότι το πρόβλημα της συνέχειας μεταξύ των αποτελεσμάτων από διαφορετικές έρευνες παραμένει. Εντούτοις, πολλές έρευνες, και ειδικά στο πεδίο των νευροεπιστημών, τείνουν να χρησιμοποιούν το μοντέλο των βασικών συναισθημάτων ενώ έρευνες στο πεδίο της μουσικής ψυχολογίας (Music Psychology) το μοντέλο της λίστας επιθέτων.

Στον αντίποδα των διακριτών μοντέλων βρίσκονται τα συνεχή. Σε αυτά, γίνεται χρήση ενός ν-διάστατου χώρου με κάθε διάσταση να αντιπροσωπεύει μία συναισθηματική συνιστώσα της τελικής συναισθηματικής κατάστασης. Κάθε συναίσθημα, αναπαρίσταται ως ένα σημείο στο χώρο αυτό. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες διαστάσεις είναι της ευχαρίστησης και της διέγερσης αν και σε έρευνες χρησιμοποιούνται και περισσότερες διαστάσεις, όπως αυτή της επικράτησης [8, 11].

Λόγω της συνεχούς απεικόνισης των συναισθημάτων ως σημεία σε ένα χώρο, παρέχεται η δυνατότητα για δημιουργία περιοχών που αντιστοιχούν σε λεκτικές περιγραφές συναισθημάτων από τα διακριτά μοντέλα. Μία τέτοια αντιστοίχιση φαίνεται και στο Σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4 *Το επίπεδο AV με ομαδοποίηση περιοχών και αντιστοίχηση διακριτών συναισθημάτων*

2 Η προτεινόμενη πλατφόρμα

Η πλατφόρμα που παρουσιάζεται αναπτύχθηκε με την χρήση των τεχνολογιών - γλωσσών προγραμματισμού Java Script, PHP, MySQL και HTML. Αναγνωρίζει τις ενέργειες που έχει εκτελέσει ο χρήστης (client) μέσω της χρήσης cookies, σε συνδυασμό με την γλώσσα προγραμματισμού Java Script, και την χρήση του μηχανισμού των sessions. Επίσης, και λόγω της εκτεταμένης χρήσης της γλώσσας Java Script, έχει προβλεφθεί η περίπτωση να μην έχει ενεργοποιηθεί η χρήση αυτής της γλώσσας στον browser του χρήστη, όπου και τυπώνεται σχετικό μήνυμα. Έτσι, ο χρήστης δεν μπορεί να εκτελέσει ‘‘ανανέωση’’ (refresh) και ‘‘επιστροφή’’ (back) κατά το δοκούν, διασφαλίζοντας την ελεγχόμενη, και μη επιβλεπόμενη από άνθρωπο, ροή του πειράματος.

2.1 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας, σε επίπεδο προγραμματισμού και οργάνωσης της λειτουργικότητας, ακολουθεί τη λογική των συσχετίσεων που έχουν αποτυπωθεί κατά τον σχεδιασμό στην υποκείμενη σχεσιακή βάση δεδομένων. Παρά το γεγονός ότι στη διεπαφή χρήστη (UI) η πλατφόρμα εμφανίζει ένα γραμμικό μοντέλο ακολουθίας ενεργειών, η αρχιτεκτονική δομή είναι αμιγώς προσαρμοσμένη στον πρωταρχικό στόχο της δημιουργίας της που είναι η διεξαγωγή του πειράματος κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο σύμφωνα με τις πειραματικές προδιαγραφές. Ο στόχος αυτός εξυπηρετείται από τον σχεδιασμό της βάσης δεδομένων και των συσχετίσεων ανάμεσα στις επιμέρους οντότητες.

Στο επίκεντρο του σχεδιασμού βρίσκεται ο συμμετέχοντας που εκτελεί το πείραμα το οποίο στην ουσία αποτελείται από μια συλλογή ήχων η οποία παρουσιάζεται γραμμικά, στο UI , ως μια βηματική ακολουθία σε κάθε στάδιο της οποίας ο ''χρήστης" καλείται να ακούσει έναν ήχο από τη συλλογή και να επιλέξει τα εικονίδια που εκφράζουν το συναίσθημα που βίωσε. Η σύνδεση του πρώτου με τη συλλογή επιτυγχάνεται με τη συσχέτιση του μοναδικού προσδιοριστικού κάθε συλλογής με τον αντίστοιχο συμμετέχοντα μέσω ένα ξένου κλειδιού στον πίνακα των συμμετεχόντων. Η γραμμική ακολουθία που αντιστοιχεί στο UI εμφανίζεται στον σχεδιασμό της βάσης δεδομένων, επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου πειράματος ακόμα και αν για οποιονδήποτε λόγο διακοπεί, ακριβώς από το σημείο της διακοπής. Το πεδίο αυτό αποτελεί το σημείο τομής ανάμεσα στη γραμμική απεικόνιση του UI και στη σχεσιακή οργάνωση της αρχιτεκτονικής δομής της πλατφόρμας. Με την ολοκλήρωση του πειράματος τα αποτελέσματα αναλύονται σε ξεχωριστές γραμμές που περιλαμβάνουν το μοναδικό προσδιοριστικό του ήχου και τις επιλογές που έκανε ο συμμετέχοντας από κάθε σύνολο εικονιδίων για τον συγκεκριμένο ήχο και αποθηκεύονται υπό μορφή νέας εγγραφής στον πίνακα. Η τελευταία αυτή μετεγγραφή και επαναποθήκευση των αποτελεσμάτων επιτρέπει την πολλαπλή στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, ως προς τους συμμετέχοντες, τις συλλογές των ήχων και, κυρίως, τον κάθε ήχο ξεχωριστά.

2.2 Διαδικασία αρχικοποίησης πειράματος

Η διαδικασία της αρχικοποίησης μπορεί να χωριστεί σε δύο υπο-διαδικασίες. Σε αυτή που σχετίζεται με την πλατφόρμα και σε αυτή που προετοιμάζει κάθε χρήστη για την επιτυχημένη συμμετοχή του στο πείραμα.

Αναφορικά με την πλατφόρμα, κατά την είσοδο έκαστου χρήστη ζητείται ένα email, τόσο για λόγους επικοινωνίας, όσο και για ταυτοποίηση. Εάν ο χρήστης εισέρχεται για πρώτη φορά στην πλατφόρμα, τότε δημιουργείται αυτόματα μία λίστα με τους ήχους που θα κληθεί να επισημάνει και γίνεται η μετάβαση στο στάδιο της προετοιμασίας του χρήστη. Στην περίπτωση που ο ίδιος χρήστης επανέρχεται στην πλατφόρμα, τότε είτε πραγματοποιείται η μετάβαση στο στάδιο όπου υπήρχε η προηγούμενη διακοπή ή, και στην περίπτωση που έχει ολοκληρωθεί το πείραμα σε παρελθόντα χρόνο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι επισημάνσεις που έχει πραγματοποιήσει.

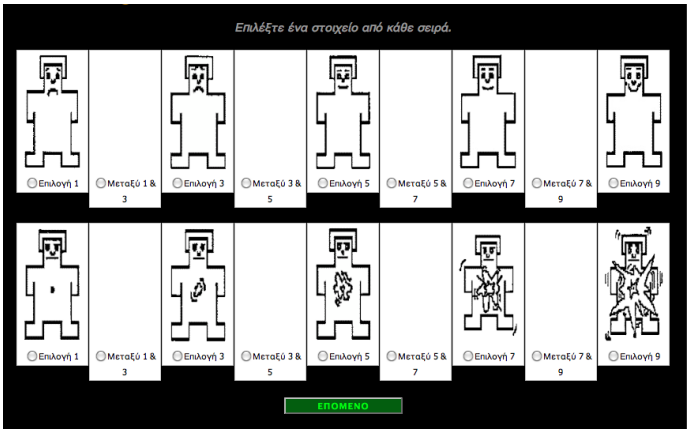
Η προετοιμασία του χρήστη περιλαμβάνει την αναπαραγωγή ενός video με την ενδεικνυόμενη χρήση της πλατφόρμας καθώς και την διαδικασία στάθμισης του επιπέδου αναπαραγωγής ήχου των ακουστικών. Η στάθμιση των ακουστικών γίνεται βάσει του μέγιστου ανεκτού, από τον χρήστη, επιπέδου αναπαραγωγής ήχου. για τον σκοπό αυτό γίνεται η αναπαραγωγή ενός τόνου συχνότητας 1kHz και ζητείται από τον χρήστη η ρύθμιση της στάθμης αναπαραγωγής στο μέγιστο ανεκτό επίπεδο.

2.3 Διαδικασία ακρόασης & επισήμανσης

Η διαδικασία ακρόασης βασίζεται στην τεχνολογία των sessions, διασφαλίζοντας ότι κάθε αναπαραγωγή ηχητικού αρχείου θα πραγματοποιηθεί μόνο μία φορά ανά χρήστη. Χρησιμοποιείται ο JW Player, έκδοση 5.10 [12], ως ένας media player ευρείας αποδοχής από όλους τους browsers. Ως διεπαφή στον χρήση παρουσιάζεται μόνο η επιλογή για την έναρξη της αναπαραγωγής.

Κατά την έναρξη και ολοκλήρωση της αναπαραγωγής, αποθηκεύεται η ενέργεια του χρήστη σε cookie, με αποτέλεσμα να είναι γνωστό, κάθε στιγμή, το στάδιο του πειράματος που έχει τελεστεί. Η επεξεργασία των cookies υλοποιείται με Java Script στον Η/Υ του χρήστη (client-side), ενώ η ανάγνωση αυτών στον εξυπηρετητή (server-side). Αναλόγως τα στοιχεία που υπάρχουν στο cookie, τυπώνονται τα αντίστοιχα μηνύματα στον browser του χρήστη, καθοδηγώντας τον για την συνέχεια του πειράματος.

Την ακρόαση του ηχητικού αρχείου ακολουθεί η διαδικασία επισήμανσης με την χρήση του SAM. Οι διαθέσιμες επιλογές φαίνονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 *Οι διαθέσιμες επιλογές για την επισήμανση του ηχητικού αρχείου*

Για κάθε ηχητικό αρχείο μπορεί να επιλεγεί μόνο μία επισήμανση για κάθε διαθέσιμη συναισθηματική κατάσταση - συνιστώσα. Οι επιλογές κάθε χρήστη αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων της πλατφόρμας για την εξαγωγή τους κατά το πέρας ολόκληρου του πειράματος. Σε κάθε επιλογή του χρήστη, αποστέλλεται στον server η επιλογή, ή οι επιλογές, όπου και αποθηκεύονται στην βάση

δεδομένων.

3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μία διαδικτυακή πλατφόρμα για την υλοποίηση πειραμάτων συναισθηματικής επισήμανσης ηχητικών δεδομένων. Η πλατφόρμα αυτή προσφέρει την δυνατότητα ελέγχου της ροής του πειράματος, την επισήμανση των ηχητικών δεδομένων με την χρήση του SAM καθώς και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε εύκολα επεξεργάσιμη μορφή. Βάσει του σχεδιασμού αλλά και της εγγενούς δυσκολίας, από την σκοπιά της οργάνωσης και του χρόνου που απαιτείται για την διεξαγωγή πειραμάτων συναισθηματικής επισήμανσης, η πλατφόρμα αναμένεται να προσφέρει την δυνατότητα για την αυτοματοποιημένη πραγματοποίηση τέτοιων πειραμάτων.

4 Αναφορές

[1] Z. Shiliang, et al., "Affective MTV analysis based on arousal and valence features" IEEE International Conference on Multimedia and Expo, pp. 1369-1372 (2008)

[2] D. Casacuberta, "DJ el Niño: expressing synthetic emotions with music" AI Soc. **18**, pp. 257-263 (2004)

[3] K. Drossos et al., "Emergency Voice/Stress-level Combined Recognition for Intelligent House Applications" Audio Engineering Society 132nd Convention (2012)

[4] M. Murugappan, et al., "Time-Frequency Analysis of EEG Signals for Human Emotion Detection" BIOMED 2008 (2008)

[5] Y. Cheng, et al., "Study on Music Emotion Cognition Model Based on Applying the Improved Gene Expression Programming" Digital Media and its Application in Museum & Heritages, Second Workshop,pp. 344-351 (2007)

[6] P. N. Juslin and P. Laukka, "Communication of emotions in vocal expression and music performance: different channels, same code?" Psychological Bulletin **129**, pp. 770-814 (2003)

[7] M. M. Bradley and P. J. Lang, "Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential" Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry **25**, pp. 49-59 (1994)

[8] M. M. Bradley and P. J. Lang, "Affective reactions to acoustic stimuli" Psychophysiology **37**, pp. 204-215 (2000)

[9] R. R. Cornelius, "Theoretical approaches to emotion" International Speech Communication Association (ISCA) Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Speech and Emotion (2000)

[10] Hevner, K., "Experimental studies of the elements of expression in music" American Journal of Psychology **48**, pp. 246-268 (1936)

[11] C. A. Smith and P. C. Ellsworth, "Patterns of cognitive appraisal in emotion" Journal of Personality & Social Psychology **48**, pp. 813-838 (1985)

[12] JW Player: Download | LongTail Video | Home of thw JW Player, available at http://www.longtailvideo.com/players/jw-flv- player/, accessed at 20/08/2012

Σχεδιασμός συστήματος ηχοτροφοδοσίας γραμμικής συστοιχίας σε μεγάλη αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, χρησιμοποιώντας προσομοίωση σε υπολογιστή και μετρήσεις εκθετικής σάρωσης ημιτόνου

Μάριος Γιουβανάκης
προπτυχιακός φοιτητής
του Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών[1]
mgiouvan@auth.gr
Χρήστος Σεβαστιάδης
Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός[1]
csevast@auth.gr
Γεώργιος Παπανικολάου[1]
Καθηγητής
pap@eng.auth.gr
[1] Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση σε μια μεγάλη αίθουσα πολλαπλών χρήσεων ενός συστήματος ηχοτροφοδοσίας τεχνολογίας γραμμικών συστοιχιών μεγαφώνων. Πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις για τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας και του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας εφαρμόζοντας μεθόδους με σήματα διέγερσης ροζ θόρυβο και σάρωσης ημιτόνου. Με τη βοήθεια λογισμικού εκτελέστηκαν αντίστοιχες ακουστικές προσομοιώσεις και σχεδιάστηκε το νέο σύστημα ηχοτροφοδοσίας, εφαρμόζοντας μεθόδους στατιστικής και γεωμετρικής ακουστικής. Η βελτίωση των ακουστικών μεγεθών της αίθουσας με το προτεινόμενο σύστημα ηχοτροφοδοσίας καταδεικνύεται σε σύγκριση με το υπάρχον.

Designing a linear array sound system in big multi-use theatre, using exponential sweep sine measurements and computer simulations

ABSTRACT

The project deals with the design of a new electroacoustic sound system of linear loudspeaker array technology in a big hall of multipurpose use. Measurements for the investigation of the hall's acoustical behavior and the current sound system were carried out, using methods involving pink noise and sine sweep excitation signals. By means of computer software the respective simulations conducted and the new sound system designed, using methods of statistical and geometrical acoustics. The improvement of the hall's acoustical parameters with the new proposed sound system is showed in comparison with the ones of the existing sound system.

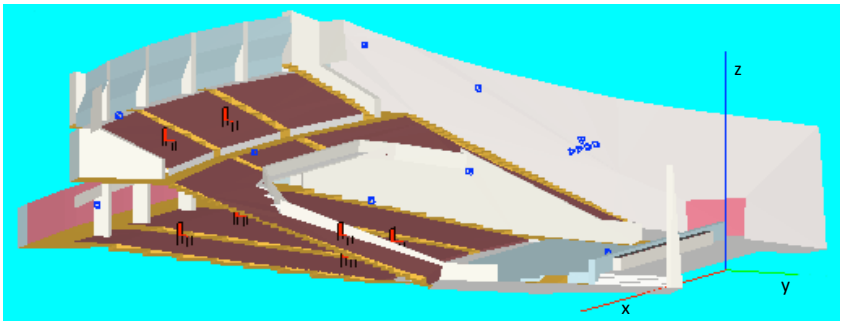
Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας στο εργαστήριο Ηλεκτρακουστικής & Τηλεοπτικών Συστημάτων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ. Πραγματεύεται τη μελέτη εγκατάστασης ενός νέου συστήματος ηχοτροφοδοσίας με γραμμικές συστοιχίες μεγαφώνων στην Κεντρική Αίθουσα Τελετών του Α.Π.Θ. Η συγκεκριμένη αίθουσα είναι χτισμένη το 1960 και είναι πολλαπλών χρήσεων. Το υπάρχον σύστημα ηχοτροφοδοσίας της αίθουσας είναι τεχνολογίας οριζόντιας συστοιχίας και εγκαταστάθηκε κατά τη δεκαετία του 1980. Λόγω παλαιότητας θεωρήθηκε αναγκαίο να αντικατασταθεί με ένα νέο ώστε να εξυπηρετεί ικανοποιητικότερα τις ανάγκες χρήσης της αίθουσας.

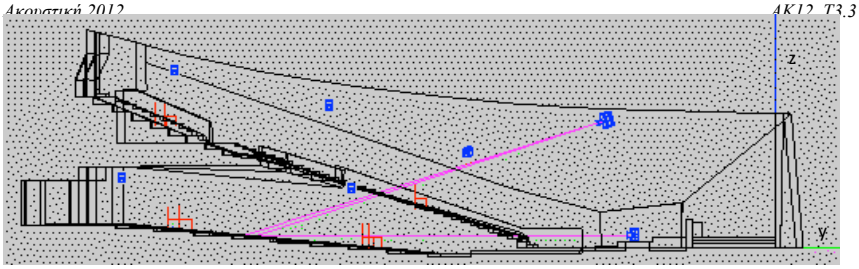
Για τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας και του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ακουστικές μετρήσεις σε διάφορα σημεία της αίθουσας για την εξαγωγή του χρόνου αντήχησης, της καταληπτότητας της ομιλίας και της κατανομής ηχητικής στάθμης. Προσομοιώθηκε η ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας σε υπολογιστή, χρησιμοποιώντας λογισμικό εφαρμογής μεθόδων της στατιστικής και της γεωμετρικής ακουστικής. Διορθώθηκε όσο το δυνατόν περισσότερο η ακουστική συμπεριφορά του κελύφους του ομοιώματος στον υπολογιστή μελετώντας τις διαφορές των αποτελεσμάτων μεταξύ μετρήσεων και προσομοιώσεων. Στη συνέχεια υπολογίστηκε στο ομοίωμα η ακουστική συμπεριφορά του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων ακουστικών μετρήσεων. Υπολογίστηκαν με προσομοιώσεις ακουστικά μεγέθη της αίθουσας χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο σύστημα ηχοτροφοδοσίας, συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υπάρχοντος συστήματος και εξήχθησαν τα συμπεράσματα.

1. Η αίθουσα και το υπάρχον σύστημα ηχοτροφοδοσίας

Η αίθουσα είναι μεγάλη ακουστικά και έχει όγκο περίπου 6.200 m^3. Έχει 950 καθήμενους στην πλατεία και 470 καθήμενους στον εξώστη που περιβάλει σαν



Εικόνα 1-1 Τρισδιάστατη όψη του ομοιώματος στον υπολογιστή. Τα μπλε σύμβολα είναι οι πηγές διέγερσης, ενώ τα κόκκινα τα σημεία παρατήρησης.



Εικόνα 1-2 Πλάγια όψη του ομοιώματος στον υπολογιστή. Τα μπλε σύμβολα είναι οι πηγές διέγερσης, ενώ τα κόκκινα είναι τα σημεία παρατήρησης.

πέταλο την πλατεία, σύνολο 1420 καθήμενους. Η σκηνή έχει επιφάνεια 155 m^2 και είναι κατασκευασμένη από ένα ελαφρώς υπερυψωμένο ξύλινο δάπεδο. Το υπόλοιπο δάπεδο, τα διαζώματα στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι θέσεις καθώς και όλα τα σκαλοπάτια είναι από μάρμαρο, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος τους καλύπτονται από λεπτό χαλί. Τα καθίσματα στο ακροατήριο είναι ξύλινα ημιεπενδυμένα με αφρώδες υλικό και ύφασμα. Οι τοίχοι αποτελούνται κύρια από επιχρισμένο και μη σκυρόδεμα. Τέλος, η οροφή καλύπτεται από εναλλαγές λωρίδων και αυλακώσεων από σκυρόδεμα και «ηρακλείτη», με γραμμικό μεταβαλλόμενο πλάτος κατά μήκος του άξονα μεταξύ της σκηνής και του ακροατηρίου, εφαρμόζοντας λιγότερη ηχοαπορρόφηση άνωθεν της σκηνής και περισσότερη άνωθεν του εξώστη.

Στις Εικόνες 1-1 και 1-2 φαίνεται το ομοίωμα που δημιουργήθηκε στον υπολογιστή, όπου η οροφή, ως η πιο ιδιαίτερη και σύνθετη ακουστική προσαρμογή της αίθουσας, προσομοιώθηκε ενοποιώντας την εναλλαγή των λωρίδων στον άξονα των X σε ένα ενιαίο υλικό, αυξάνοντας ομαλά την ηχοαπορροφητική συμπεριφορά του από τη σκηνή προς το ακροατήριο. Το κέλυφος της αίθουσας αποτελείται κύρια από κεκλιμένες επιφάνειες, με κύριο χαρακτηριστικό την ελλειπτική καμπύλη της οροφής.

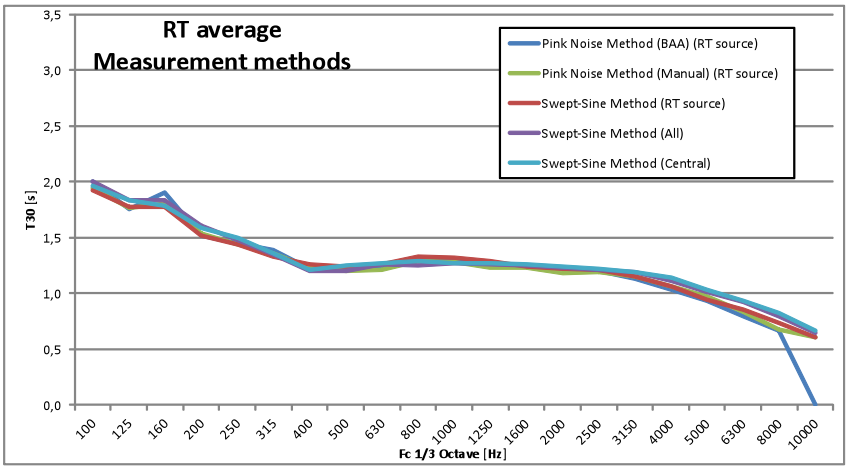
Το υπάρχον σύστημα ηχοτροφοδοσίας στην αίθουσα αποτελείται από 4 κεντρικά ηχεία Dynacord D15-3 αναρτημένα από την οροφή, περίπου 5m άνωθεν της σκηνής, και από άλλα 10, περιφερειακά του ακροατηρίου, ηχεία ElectroVoice Zx1i-90 αναρτημένα επί των πλευρικών τοίχων. Κατά τη συνήθη χρήση της αίθουσας όλες οι πηγές ήταν ενεργές, ενώ για την αποτύπωση της απόδοσης του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο με το σύνολο των δεκατεσσάρων πηγών (ένδειξη All), όσο και με τις τέσσερις κεντρικές πηγές (ένδειξη Central).

2. Οι διαδικασίες μετρήσεων και προσομοιώσεων

Όλες οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς ακροατήριο. Εκτελέστηκαν μετρήσεις σε επτά (7) σημεία παρατήρησης κατανεμημένα ομοιόμορφα και συμμετρικά στο ακροατήριο. Για τη διέγερση του χώρου εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνδυασμού πηγών, η πρώτη με μία μόνο πηγή μετρήσεων (RT Source) τοποθετημένη στη σκηνή, η δεύτερη με ενεργές μόνο τις κεντρικές πηγές (Central) του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας και

η τρίτη με ενεργές όλες τις πηγές (All) του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας.

Με την πρώτη περίπτωση διέγερσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου αντήχησης με δύο μεθόδους. Την κλασική, με καταγραφή της αποσβενύμενης στάθμης διακοπτόμενου ροζ Θορύβου (Pink Noise Method) [1], και τη νέα, με την επεξεργασία κρουστικών αποκρίσεων που εξήχθησαν με τη μέθοδο εκθετικής σάρωσης ημιτόνου (Swept-sine Method) [2]. Ο σκοπός της εφαρμογής των δύο μεθόδων ήταν να διασφαλιστεί η πιστότητα των αποτελεσμάτων της νέας μεθόδου. Για την κλασσική μέθοδο εφαρμόστηκε η αυτοματοποιημένη μέτρηση με συσκευή Building Acoustics Analyzer (BAA), και η χειροκίνητη (Manual) μέσω φορητού υπολογιστή με κατάλληλο λογισμικό και περιφερειακών συσκευών αναπαραγωγής και εγγραφής ήχου. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο διαδικασιών είναι ότι στην πρώτη ο θόρυβος περιορίζεται ανά τριτοκτάβα κατά την αναπαραγωγή και εγγραφή, ενώ στη δεύτερη μόνο κατά την ανάλυση των εγγραφών, που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εμπορικών λογισμικών εφαρμογής. Για τη δεύτερη μέθοδο ακολουθήθηκε η διαδικασία της πρακτικής εφαρμογής του Farina [3], κατά την οποία με διέγερση του χώρου με σήμα εκθετικής σάρωσης ημιτόνου και κατόπιν επεξεργασίας του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο του χρόνου, εξάγεται η κρουστική απόκριση του συστήματος ηχοτροφοδοσίας, αίθουσας και συστήματος ηχοληψίας. Από την κρουστική απόκριση σε κάθε σημείο παρατήρησης εξάχθηκε ο χρόνος αντήχησης με τη μέθοδο ανάστροφης ολοκλήρωσης στο χρόνο κατά Schroeder [4]. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο *Διάγραμμα 2-1* όπου η σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων πιστοποιούν τη μέθοδο σάρωσης ημιτόνου. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένη μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν για αναφορά, ως μετρούμενα ακουστικά μεγέθη της αίθουσας (ένδειξη Measurements).

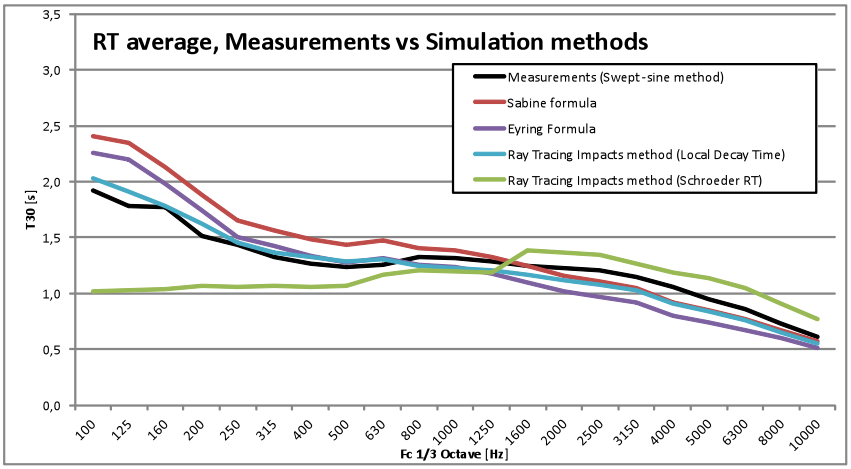


Διάγραμμα 2-1 Μέσος όρος του χρόνου αντήχησης T_{30} επί όλων των σημείων παρατήρησης. Το RT source αντιστοιχεί για τη μία πηγή επί της σκηνής, το All για όλες τις πηγές του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας και το Central μόνο για τις κεντρικές πηγές άνωθεν της σκηνής του υπάρχοντος συστήματος.

Η μέθοδος σάρωσης ημιτόνου εφαρμόστηκε με όλες τις περιπτώσεις διέγερσης (RT Source, Central και All) για την εξαγωγή των ακουστικών μεγεθών της καταληπτότητας της ομιλίας στα σημεία παρατήρησης. Τα συγκεκριμένα μεγέθη εξήχθησαν από τις αντίστοιχες κρουστικές αποκρίσεις.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κατανομής της ηχητικής στάθμης στα σημεία παρατήρησης στο ακροατήριο χρησιμοποιώντας τη δεύτερη (Central) και την τρίτη (All) περίπτωση συνδυασμού πηγών διέγερσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση λογισμικού εφαρμογής σε υπολογιστή για Αναλυτή Πραγματικού Χρόνου (Real Time Analyzer, RTA), το οποίο εφαρμόζει επεξεργασία με Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (FFT) σε πραγματικό χρόνο, και αφού βαθμονομήθηκε το σύστημα ηχοληψίας και καταγραφής του υπολογιστή.

Με το λογισμικό προσομοίωσης [5, 6], δημιουργήθηκε το ομοίωμα της αίθουσας στον υπολογιστή από το οποίο υπολογίστηκε απευθείας ο χρόνος αντήχησης κατά Sabine και Eyring. Εφαρμόζοντας την υβριδική Μέθοδο Ειδώλων Πηγών με Ακτινική Ανίχνευση (Ray Tracing Impacts) δημιουργήθηκαν διαγράμματα ανακλάσεων σε κάθε σημείο παρατήρησης. Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα εξάχθηκε ο χρόνος αντήχησης και στη συνέχεια εξάχθηκε το μέγεθος της καταληπτότητας της ομιλίας. Τα αποτελέσματα για τους χρόνους αντήχησης χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εντοπιστούν προβλήματα στο ομοίωμα και στις προσομοιώσεις στον υπολογιστή. Τα σημαντικότερα προβλήματα ήταν η προσομοίωση της ηχοαπορρόφησης, της ελλειπτικής καμπυλότητας και των ανάγλυφων αυλακιών της οροφής. Ειδικά για το δεύτερο και το τρίτο, επειδή η προσομοίωση μη επίπεδων επιφανειών είναι εν γένει προβληματική στις μεθόδους της γεωμετρικής ακουστικής [4], αλλά και η δημιουργία ιδιαίτερων λεπτομερειών που προκαλούν διάχυση στο ομοίωμα είναι προβληματική, εφαρμόστηκε επιπλέον της ηχοαπορρόφησης διαχυτική ανάκλαση (diffuse reflection) κατά το νόμο του Lambert [4, 7]. Δυστυχώς, στα σημεία παρατήρησης όπου οι προσπίπτουσες ακτίνες που ανακλώνται από την οροφή κατά πρώτη τάξη (πρώτες ανακλάσεις), καθώς και άλλες ανακλάσεις από την οροφή με μεγαλύτερη τάξη ανάκλασης, στις οποίες οι

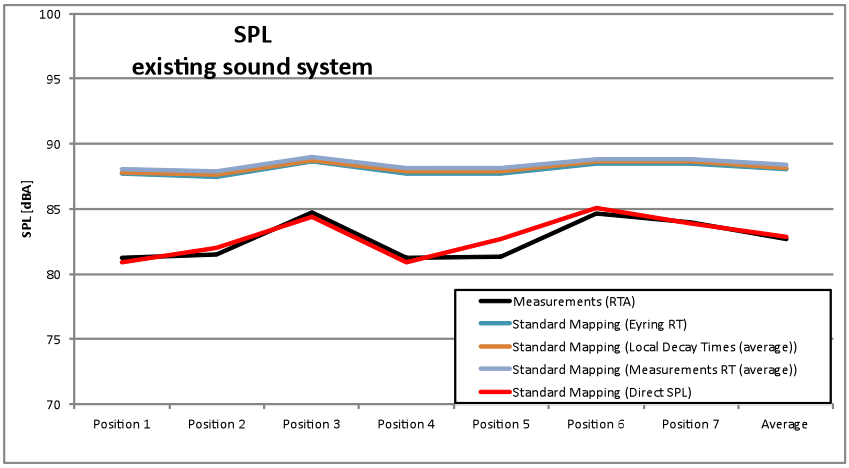


Διάγραμμα 2-2 Σύγκριση χρόνου αντήχησης μετρήσεων και προσομοιώσεων.

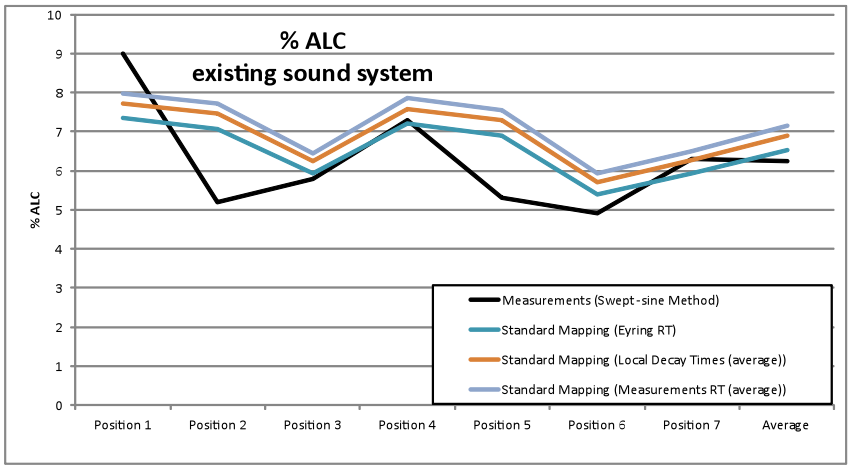
προηγούμενες ανακλάσεις προκαλούν μικρή μείωση της ενέργειάς τους, οι αποκρίσεις ήταν προβληματικές με αντίστοιχο αποτέλεσμα στον εξαγόμενο κατά Schoeder χρόνο αντήχησης. Παρ' όλα αυτά, η εξαγωγή των χρόνων αντήχησης ως Τοπικοί Χρόνοι Απόσβεσης (Local Decay Time) από το λογισμικό ήταν καλύτερη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σε σύγκριση με αυτά των μετρήσεων παρουσιάζονται στο *Διάγραμμα 2.2*. Οι χρόνοι αντήχησης από τους γενικούς τύπους κατά Sabine και Eyring υπερτιμούν λίγο το χρόνο αντήχησης στις χαμηλότερες συχνότητες ενώ τον υποτιμούν λιγότερο στις υψηλότερες. Με τη μέθοδο των Ειδώλων Πηγών με Ακτινική Ανίχνευση ο μέσος όρος των Τοπικών Χρόνων Απόσβεσης εμφανίζουν την καλύτερη σχέση με τον μέσο όρο των μετρήσεων, με μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα ανά θέση, ενώ οι μεγάλες διαφορές στα επιμέρους αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης κατά Schroeder έχει αποτέλεσμα και τον κακό μέσο όρο τους. Κατά συνέπεια εμπιστευτήκαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατά περίπτωση.

3. Αποτελέσματα μετρήσεων και προσομοιώσεων με το υπάρχον σύστημα ηχοτροφοδοσίας

Για τη ρύθμιση των πηγών στο ομοίωμα χρησιμοποιήθηκε η προσομοίωση τυπικής αποτύπωσης (Standard Mapping) για την εξαγωγή της απευθείας στάθμης ηχητικής πίεσης (Direct SPL) συγκρίνοντάς τα αποτελέσματα με αυτά των μετρήσεων με τον Φασματικό Αναλυτή Πραγματικού Χρόνου (Measurements (RTA)) ανά σημείο. Αρχικά ρυθμίστηκαν μόνο οι κεντρικές πηγές (Central) και κατόπιν όλες μαζί (All). Για τον υπολογισμό στα σημεία παρατήρησης και στις αποτυπώσεις στις περιοχές του ακροατηρίου των μεγεθών της κατανομής της ηχητικής στάθμης πίεσης και της καταληπτότητας της ομιλίας εφαρμόστηκαν στατιστικοί τύποι που υπολογίζουν τις ανακλώμενες ηχητικές στάθμες από τις στάθμες του απευθείας ήχου και τους χρόνους αντήχησης που εξήχθησαν από: (α) τον τύπο κατά Eyring (Eyring RT), (β) τη Μέθοδο Ειδώλων με Ακτινική Ανίχνευση



Διάγραμμα 3-1 Ηχητική στάθμη πίεσης ανά σημείο παρατήρησης



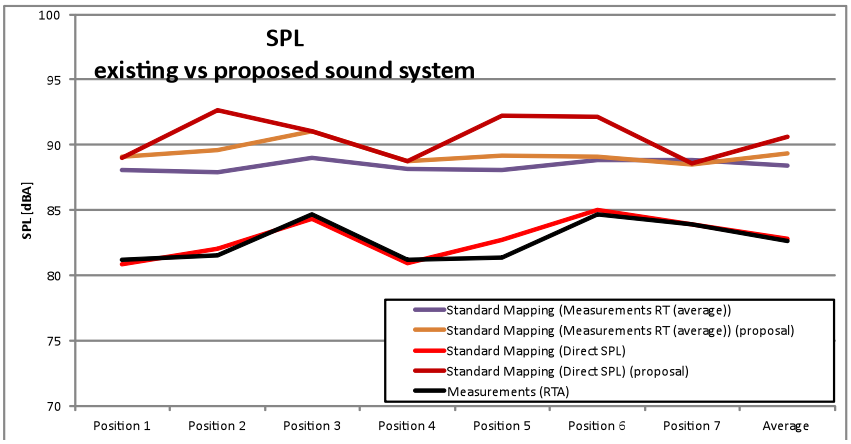
Διάγραμμα 3-2 Καταληπτότητα της ομιλίας κατά % ALC κατά RaSTI.

(Ray Tracing Impacts Method) ως μέσος όρος στα σημεία παρατήρησης (Local Decay Times (average)), (γ) τις μετρήσεις ως μέσος όρος στα σημεία παρατήρησης (Measurements RT (average)). Τα αποτελέσματα για την ηχητική στάθμη πίεσης παρουσιάζονται στο *Διάγραμμα 3-1,* όπου φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της απευθείας στάθμης ηχητικής πίεσης (Direct SPL) ταιριάζουν σχεδόν άψογα στα αντίστοιχα των μετρήσεων, αλλά όταν υπεισέρχεται στην προσομοίωση ο παράγοντας του χρόνου αντήχησης οι διαφορές μεταξύ των σημείων παρατήρησης αμβλύνονται πολύ.

Στο *Διάγραμμα 3-2* παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την καταληπτότητα της ομιλίας κατά το μέγεθος % Articulation Loss (% ALC) κατά RaSTI [4]. Η χρήση των χρόνων αντήχησης από τους γενικούς τύπους και τους μέσους όρους επί των θέσεων παράγει μικτά αποτελέσματα ως προς την πιστότητά τους με αυτά των μετρήσεων. Είναι επόμενο να συμβαίνει αυτό, γιατί η διαφοροποίηση φασματικά του χρόνου αντήχησης ανά σημείο παρατήρησης επηρεάζει σημαντικά στην εμφάνιση διαφορετικών αποτελεσμάτων την καταληπτότητα της ομιλίας. Παρ' όλα αυτά οι προσομοιώσεις συμφωνούν μεταξύ τους, δείχνοντας το πόσο σημαντικό είναι για την καταληπτότητα της ομιλίας η προσομοίωση των πηγών.

4. Το νέο σύστημα ηχοτροφοδοσίας

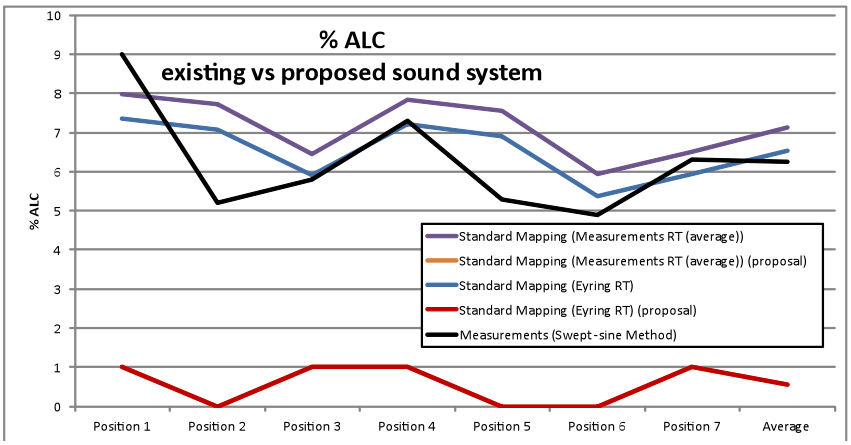
Προς αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος ηχοτροφοδοσίας προτείνεται η εγκατάσταση πηγών τεχνολογίας γραμμικής συστοιχίας μεγαφώνων (linear loudspeaker array) [4]. Οι γραμμικές συστοιχίες, σε σχέση με τις συμβατικές πηγές, διαμορφώνουν στενότερο λοβό εκπομπής προς την κάθετη κατεύθυνση επί του γραμμικού άξονά τους. Επιπλέον, ο λοβός είναι ρυθμιζόμενος αφού εξαρτάται από τη γεωμετρική στοίχιση των πηγών που απαρτίζουν τη συστοιχία. Με αυτόν τον τρόπο εστιάζουν με καλύτερο τρόπο προς το ακροατήριο και διανέμουν τον ήχο μέχρι και τον τελευταίο ακροατή χωρίς να είναι απαγορευτική η ένταση τους για τους ακροατές των μπροστινών θέσεων.



Διάγραμμα 4-1 Σύγκριση υπάρχοντος και νέου συστήματος ηχοτροφοδοσίας για την κατανομή της ηχητικής στάθμης πίεσης

Για το προτεινόμενο σύστημα επιλέχθηκαν οι συστοιχίες DV-DOSC της L-Acoustics. Η επιλογή της βέλτιστης θέσης των 2 συστοιχιών στο χώρο καθώς και των βέλτιστων γωνιών κλίσης μεταξύ των ηχείων κάθε συστοιχίας, επιτεύχθηκε εφαρμόζοντας τη μέθοδο της δοκιμής και πλάνης. Εφαρμόστηκε η προσομοίωση της κατανομής της απευθείας στάθμης ηχητικής πίεσης (Direct SPL) επί των περιοχών του ακροατηρίου με σκοπό τυπική απόκλιση να είναι 3dBA. Η ανάρτηση των δύο συστοιχιών κατά τον άξονα των Y έγινε στην ίδια θέση με αυτή των υπαρχόντων κεντρικών πηγών, ενώ μεταξύ τους οι δύο συστοιχίες απέχουν 10m.

Με το προτεινόμενο σύστημα ηχοτροφοδοσίας εκτελέστηκαν αντίστοιχες με το υπάρχον σύστημα προσομοιώσεις, δηλαδή για τη στάθμη ηχητικής πίεσης και την



Διάγραμμα 4-2 Σύγκριση υπάρχοντος και νέου συστήματος ηχοτροφοδοσίας καταληπτότητα της ομιλίας κατά % ALC κατά RaSTI.

καταληπτότητα τη ομιλίας. Στο *Διάγραμμα 4-1* φαίνεται ότι για τις γραμμικές συστοιχίες εξαλείφεται η διαφορά μεταξύ των προσομοιώσεων που χρησιμοποιούν μόνο την απευθείας στάθμη ηχητικής πίεσης και αυτών που χρησιμοποιούν επίσης τον χρόνο αντήχησης. Είναι φανερό ότι η αυξημένη κατευθυντικότητά τους περιορίζει πάρα πολύ την επίδραση του χρόνου αντήχησης στον προσλαμβανόμενο ήχο με θεαματικά αποτελέσματα στην καταληπτότητα της ομιλίας όπως φαίνεται στο *Διάγραμμα 4-2*.

5. Συμπεράσματα

Με τη χρήση των προτεινόμενων γραμμικών συστοιχιών μεγαφώνων βελτιώνεται θεαματικά η καταληπτότητα της ομιλίας στην αίθουσα. Τόσο η μεγάλη κατευθυντικότητά τους, όσο και η εστίασή τους κύρια στην περιοχή του κοινού, όπου τα καθίσματα και το κοινό μπορούν να απορροφήσουν πολύ ηχητική ενέργεια, δείχνουν ότι ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας δεν μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την καταληπτότητα της ομιλίας.

Από τις διάφορες γεωμετρικές μεθόδους ακουστικής προσομοίωσης της αίθουσας φάνηκε ότι οι καμπύλες και οι ανάγλυφες διαχυτικές επιφάνειες είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσομοιωθούν. Παρ' όλα αυτά, η μικρή επίδραση του χρόνου αντήχησης στην περίπτωση των γραμμικών συστοιχιών μεγαφώνων επιτρέπει την παράκαμψή τους και τη χρήση απλούστερων και συνάμα ταχύτερων μεθόδων προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα την εξαγωγή των ακουστικών μεγεθών με τους στατιστικούς τύπους που υπολογίζουν τις ανακλώμενες ηχητικές στάθμες από τις στάθμες του απευθείας ήχου και τους χρόνους αντήχησης. Παραμένει η επαλήθευση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με μετρήσεις, αφού εγκατασταθεί το νέο σύστημα.

6. Αναφορές

[1] ISO 3382: Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters (2000).

[2] ISO 18233: Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics (2006).

[3] A. Farina, «Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique» in *AES 108th Convention 2000 February 19-22 Paris, France* [preprint 5093] (2000).

[4] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Fourth Edition, Spon Press (2000).

[5] *EASE Version 4.3 Users Guide & Tutorial*, Renkus-Heinz & Acoustic Design Ahnert, Germany, (2009).

[6] *EASE 4.3 Users Manual*, Acoustic Design Ahnert, Berlin.

[7] T.J. Cox, P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Spon Press (2004).

Η Επαυξημένη Ηχητική Πραγματικότητα ως Φορέας Ανάπτυξης Ηχητικών Παιχνιδιών

Νίκος Μουστάκας
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7, 49 100 Κέρκυρα
E-mail: a11mous@ionio.gr

Ανδρέας Φλώρος
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7, 49 100 Κέρκυρα
E-mail: floros@ionio.gr

Νικόλαος – Γρηγόριος Κανελλόπουλος
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7, 49 100 Κέρκυρα
E-mail: kane@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με τον όρο επαυξημένη ηχητική πραγματικότητα, ορίζεται η επαύξηση ενός πραγματικού ηχητικού περιβάλλοντος με μία αντίστοιχη, επιθυμητή εικονική συνιστώσα. Η τρέχουσα στάθμη της τεχνικής στον τομέα της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, έχει οδηγήσει στην υλοποίηση συγκεκριμένων εφαρμογών, ενδεικτικά στον χώρο της ψυχαγωγίας, της πληροφόρησης και της τέχνης. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται η επέκταση του παραπάνω πλαισίου μέσα από τρεις συνιστώσες: α) την διάδραση με αντικείμενα, φαινόμενα και καταστάσεις του πραγματικού κόσμου, β) την δυναμική σύνθεση των ηχητικών δεδομένων, γ) τον εμπλουτισμό της εικονικής ηχητικής συνιστώσας, μέσα από τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης ή μηχανικής μάθησης, δημιουργώντας μια ρεαλιστικότερη εικόνα των ηχητικών μοντέλων και κατ' επέκταση και της συνολικής εικονικής συνιστώσας. Οι παραπάνω συνιστώσες, καταγράφονται μέσα από το παράδειγμα ενός ηχητικού παιχνιδιού επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας και εκτιμάται ότι στο μέλλον θα αποτελέσουν το υπόβαθρο για την ανάπτυξη περισσότερο σύνθετων και ρεαλιστικών εφαρμογών.

Augmented Reality Audio as a Developing Tool for Audio-only Games

ABSTRACT

The term of audio augmented reality is consisted of the mixture and the reproduction of a real audio environment with the desirable virtual audio component. The state of the art in audio augmented reality has led to the realization of specific applications, for instance in use on entertainment, informatics and art. In this work, a new audio augmented reality framework is presented through three components: a) the component that describes the interaction through (physical) objects, phenomena and circumstances of real world, b) the dynamic composition of audio data and c) the enrichment of the virtual audio component, through computational intelligence techniques or via machine learning, in a way that a more realistic reproduction of the virtual audio component is constructed. These components are presented through the production of an audio game and it is believed/estimated that will consist the setting for the further development of more sophisticated and realistic applications.

Εισαγωγή

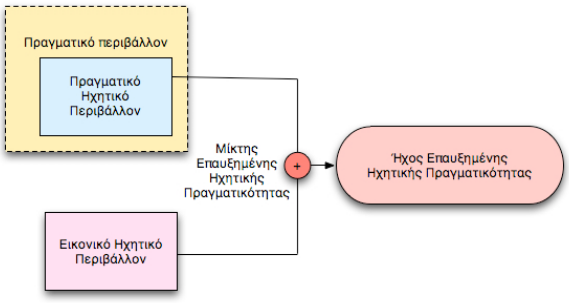
Στις μέρες μας, ο τομέας της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας (Augmented Reality Audio, ARA), δείχνει να παρουσιάζει πλέον μία ισόρροπη ερευνητική (κυρίως) ανάπτυξη σε σχέση με εκείνον της επαυξημένης πραγματικότητας γενικά, ο οποίος είναι πιο διαδεδομένος και χρησιμοποιείται ήδη σε ποικιλία εφαρμογών. Συγκεκριμένα, σε ερευνητικό επίπεδο, στο επιστημονικό πεδίο της ARA, έχει δοθεί μεγαλύτερο βάρος σε τεχνολογικά ζητήματα, όπως π.χ. στα μέσα μετάδοσης του επαυξημένου ήχου [1], στις τεχνικές αναπαραγωγής του στις τρεις διαστάσεις [2], στην μίξη του εικονικού με τον πραγματικό ακουστικό κόσμο [3], καθώς και σε πιο παραδοσιακά τεχνικά ζητήματα, όπως αυτό της ισοστάθμισης [3]. Παράλληλα, ενώ κανείς μπορεί να παρατηρήσει αρκετές εφαρμογές επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, δεν έχει ακόμα οριστεί κάποιο συγκεκριμένο πλαίσιο υλοποίησης, συμπεριλαμβανομένης και της αξιολόγησης αυτών.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται το ηχητικό παιχνίδι επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας «Eidola» [4]. Μέσα από την παρουσίαση αυτή, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα επέκτασης του υφιστάμενου πλαισίου επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας μέσα από τρεις συνιστώσες. Η πρώτη περιλαμβάνει την διάδραση του θεατή με αντικείμενα, φαινόμενα και καταστάσεις του πραγματικού κόσμου, η δεύτερη στοχεύει στην δυναμική σύνθεση της εικονικής πληροφορίας και, τέλος, η τρίτη συνίσταται στον εμπλουτισμό της εικονικής ηχητικής συνιστώσας μέσω τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, δημιουργώντας ακριβέστερα εικονικά ηχητικά μοντέλα και, κατά συνέπεια, έναν ρεαλιστικότερο εικονικό ηχητικό κόσμο.

1. Επαυξημένη Ηχητική Πραγματικότητα

Το γενικό πλαίσιο με βάση το οποίο ορίζεται η επαυξημένη ηχητική πραγματικότητα εμφανίζεται γραφικά στο σχήμα 1.1. Το πραγματικό ηχητικό περιβάλλον, συνδυάζεται με το εικονικό - συνθετικό, δημιουργώντας το αντίστοιχο επαυξημένο. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την τρέχουσα στάθμη τεχνικής, για την καταγραφή του πραγματικού ηχητικού περιβάλλοντος, τοποθετείται ένα μικρόφωνο εσωτερικού αυτιού (in-ear) στο κάθε αυτί του χρήστη. Για την σύνθεση του εικονικού ηχητικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιείται μια μηχανή σύνθεσης, συνήθως αμφιωτικού σήματος, η οποία συνθέτει το εικονικό ηχητικό σήμα. Για την μίξη των δύο ηχητικών σημάτων, χρησιμοποιείται ένας μίκτης επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας [3], ο οποίος στοχεύει στην πιο φυσική επικάλυψη του πραγματικού κόσμου από τον εικονικό για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής εμβύθισης του θεατή.

Η επαυξημένη πραγματικότητα, πλέον έχει αρχίσει να εμφανίζεται στην καθημερινή ζωή, υπό μορφή εφαρμογών που προορίζονται π.χ. για έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Αυτές οι εφαρμογές όμως, κατά κανόνα εστιάζουν στο κομμάτι της εικόνας (ακολουθώντας το ίδιο μοντέλο μίξης του πραγματικού οπτικού κόσμου με τον αντίστοιχο εικονικό), αφήνοντας σε δεύτερο πλάνο την συνιστώσα του ήχου.



Σχήμα 1.1: το γενικό πλαίσιο επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας

Εστιάζοντας και πάλι στο ερευνητικό επίπεδο, οι εξελίξεις στον τομέα της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας εστιάζουν κυρίως σε: α) Τεχνικές ηχητικής κωδικοποίησης και αναπαράστασης του τρισδιάστατου ηχητικού πεδίου σε προσωποποιημένο επίπεδο (π.χ. με χρήση αμφιωτικής τεχνολογίας). Παράδειγμα τέτοιων τεχνικών αποτελεί ένα πρότυπο σύστημα ακουστικών που προορίζεται για χρήση σε περιβάλλοντα επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας [1]. β) Αποδοτική μίξη του πραγματικού ηχητικού περιβάλλοντος με το εικονικό. Παράδειγμα τέτοιας προσπάθειας αποτελεί η υλοποίηση ενός μίκτη επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας και η ισοστάθμιση που χρειάζεται για την ρεαλιστικότερη απόδοση της εικονικής συνιστώσας [3]. γ) Βελτιστοποίηση του βαθμού εμβύθισης του θεατή στον επαυξημένο ηχητικό κόσμο. Για παράδειγμα, στα πλαίσια της εργασίας [5] έχει υλοποιηθεί ένα σύστημα ψυχοακουστικής αξιολόγησης συστημάτων που αναπαράγουν τρισδιάστατο ήχο σε περιβάλλοντα επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας.

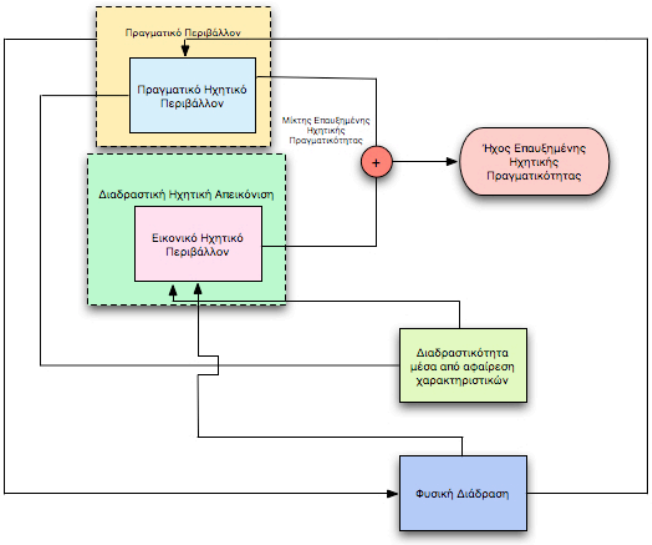
Το παραπάνω πλαίσιο, χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι τα εξής: Η εφαρμογή «Navinko» [6], η οποία προσφέρει ένα σύστημα πλοήγησης επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας για ποδηλάτες. Άλλο ένα παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή «Hackney Hear» [7], η οποία ενσωματώνει ηχητικές ιστορίες σε συγκεκριμένα σημεία του Λονδίνου, δίνοντας στον θεατή την δυνατότητα να τα ψάξει και να τα εντοπίσει με την βοήθεια ενός έξυπνου κινητού τηλεφώνου (smartphone). Στη συνέχεια, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, θα αναλυθεί και η περίπτωση του ηχητικού παιχνιδιού επαυξημένης πραγματικότητας «Eidola», μέσω της οποίας θα αιτιολογηθεί και η ανάγκη επέκτασης του υφιστάμενου τεχνολογικού πλαισίου ανάπτυξης εφαρμογών ARA.

2. Προτεινόμενο πλαίσιο επέκτασης της ARA

Όπως προαναφέρθηκε, το γενικό πλαίσιο που ισχύει στον τομέα της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, στηρίζεται κατά βάση σε έναν μείκτη επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας (σχήμα 1.1) ο οποίος συνδυάζει το εικονικό με το πραγματικό ηχητικό περιβάλλον. Η μίξη αυτή, δεν λαμβάνει υπόψη άλλες παραμέτρους, οι οποίες φαίνεται ότι μπορούν να επιδράσουν στην υποκειμενική απόδοση τέτοιου είδους εφαρμογών. Έτσι, ενδεικτικά, σε επίπεδο διάδρασης, οι υφιστάμενες εφαρμογές περιορίζονται σε τεχνικές εντοπισμού του θεατή στον χώρο,

χωρίς να υπάρχει η διάσταση της διάδρασης με αντικείμενα, φαινόμενα ή καταστάσεις του πραγματικού κόσμου, τα οποία σημειωτέον μπορούν να είναι και ορατά. Η σύνθεση της εικονικής ηχητικής συνιστώσας δεν λαμβάνει υπόψη επίσης την διάδραση με τον χρήστη, καθιστώντας αυτήν στατική παράμετρο του περιβάλλοντος, χωρίς δυναμικό χαρακτήρα. Τέλος, η σύνθεση της εικονικής ηχητικής πληροφορίας, βασίζεται κυρίως σε αλγοριθμικές μεθοδολογίες ελέγχου συγκεκριμένων παραμέτρων, όπως π.χ. η θέση του θεατή. Συνεπώς, υπάρχει σημαντική έλλειψη ρεαλιστικής απεικόνισης των συνιστωσών του εικονικού κόσμου. Το παραπάνω πρόβλημα, θα μπορούσε να λυθεί μέσω της χρήσης τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης καθώς και μηχανικής μάθησης, οι οποίες δίνουν την δυνατότητα νοήμονος συμπεριφοράς στην εικονική ηχητική συνιστώσα.

Οι παραπάνω συνοπτικά δοθείσες παρατηρήσεις, οδήγησαν στον σχεδιασμό ενός νέου πλαισίου επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, το οποίο να ανταποκρίνεται στις νέες προκλήσεις που δημιουργούνται. Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.1), φαίνεται η δομή του νέου προτεινόμενου πλαισίου. Το πλαίσιο αυτό στηρίχτηκε στο υφιστάμενο (σχήμα 1.1), αλλά εμπλουτίστηκε με το στοιχείο της διάδρασης, το οποίο αναλύεται σε δύο σκέλη. Σε αυτό της φυσικής διάδρασης, δηλαδή της διάδρασης του θεατή με τον φυσικό κόσμο και το πως την αντιλαμβάνεται ένα σύστημα επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, και την διαδραστικότητα μέσα από την αφαίρεση χαρακτηριστικών τα οποία μπορεί να προέρχονται από ηχητικά δείγματα του πραγματικού κόσμου. Επίσης η έννοια της υπολογιστικής νοημοσύνης, μπορεί να υπάρχει σε κάθε μονοπάτι σύνδεσης μεταξύ των διάφορων τμημάτων του νέου πλαισίου. Ο λόγος ένταξης της υπολογιστικής νοημοσύνης μέσα σε αυτό το πλαίσιο, αποτελεί κυρίως η ανάγκη επίτευξης ρεαλιστικότερου τελικού αποτελέσματος, καθώς και υψηλού βαθμού εμβύθισης του χρήστη.



Σχήμα 2.1: το προτεινόμενο πλαίσιο επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας

3. Μελέτη περίπτωσης: το ηχητικό παιχνίδι Eidola

Το ηχητικό παιχνίδι «Eidola» [4] αποτελεί ένα πρότυπο παιχνίδι επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας. Ο τίτλος του, περιγράφει τις αόρατες οντότητες που αποτελούν βασικό στοιχείο της εικονικής ηχητικής συνιστώσας του παιχνιδιού. Το παιχνίδι εκτυλίσσεται μέσα στα πλαίσια μιας διαδραστικής εγκατάστασης. Ο χώρος οριοθετείται από ένα δωμάτιο μέσα στο οποίο ο θεατής εισέρχεται και έχει σαν στόχο να εξοντώσει τα αόρατα είδωλα με το όπλο που του έχει δοθεί και τον κατάλληλο εξοπλισμό με τον οποίο τα ακούει να κινούνται μέσα στον εικονικό χώρο. Επέκταση του παραπάνω παιχνιδιού αποτελεί το παιχνίδι «Eidola multiplayer» [8]. Σε αυτό το παιχνίδι, έγινε εισαγωγή και ενός δεύτερου παίκτη ως αντίπαλος του πρώτου. Στόχος ήταν η εξόντωση ή του αντιπάλου, ή των περισσότερων Ειδώλων. Για την επίτευξη του τελικού αποτελέσματος, χρειάστηκαν δύο διαφορετικά δωμάτια μέσα στα οποία λάμβανε χώρα κοινή κίνηση των Ειδώλων και, επιπλέον, απεικονιζόταν ηχητικά και η κίνηση του αντίπαλου παίκτη.

Το συγκεκριμένο παιχνίδι, και στις δύο του εκδόσεις, υλοποιήθηκε πάνω στο τυπικό πλαίσιο επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας. Πέραν όμως αυτού του πλαισίου, λόγω του είδους του, χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν και τεχνικές διάδρασης, ώστε να γίνει εφικτή η υλοποίηση του – σχετικά απλού - σεναρίου. Μέσα από την υλοποίηση ενός τέτοιου παιχνιδιού, δημιουργήθηκε και η ανάγκη δημιουργίας του νέου πλαισίου. Σε αυτό το παιχνίδι, η διάδραση στηριζόταν σε κριτήρια θέσης του θεατή και των ηχητικών πηγών. Η εξουδετέρωση των ηχητικών πηγών γινόταν με ένα όπλο που είχε δοθεί στον χρήστη, χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα στα αόρατα όντα να μπορούν να αποφύγουν το χτύπημα. Η σύνθεση των ήχων ήταν στατική, χωρίς να υπάρχει δυναμική σύνθεση αυτών, δίνοντάς τους τον κατάλληλο χαρακτήρα που αναλογούσε κάθε στιγμή του παιχνιδιού. Συνεπώς, το παιχνίδι θα μπορούσε να έχει έναν περισσότερο προσαρμοστικό χαρακτήρα, ανάλογα με τον θεατή και της καταστάσεις που θα προκαλούσε. Σε αυτό βοηθάει άμεσα και η ύπαρξη νοημοσύνης μέσα σε ένα τέτοιο παιχνίδι, η οποία θα το έκανε να έχει διαφορετικό χαρακτήρα κάθε φορά, αυξάνοντας τον επιτυγχανόμενο βαθμό ποιότητας της εμπειρίας (Quality of Experience, QoE) ενός τέτοιου παιχνιδιού.

Σημαντικό κομμάτι σε μια τέτοια εφαρμογή αποτελεί επίσης και ο τρόπος αξιολόγησης της ποιότητας της εμπειρίας του χρήστη μέσα σε αυτή. Η υπάρχουσα ερευνητική δουλειά στον τομέα αξιολόγησης της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας, περιορίζεται σε θέματα αξιολόγησης του εξοπλισμού μεταφοράς των επαυξημένων ηχητικών σημάτων [5, 9]. Δεν έχει γίνει ακόμα έρευνα πάνω σε θέματα διάδρασης μέσα σε εφαρμογές επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας και δεν έχουν οριστεί κάποιοι συγκεκριμένοι, ποσοτικοί ή υποκειμενικοί δείκτες, οι οποίοι να μετράνε συγκεκριμένα μεγέθη μέσα σε εφαρμογές αυτού του είδους που να σχετίζονται με την επιτυγχανόμενη εμπειρία του χρήστη. Συγκεκριμένα, παράδειγμα τέτοιων δεικτών είναι ο βαθμός εμβύθισης του χρήστη μέσα σε ένα περιβάλλον επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας. Έτσι, στο παιχνίδι «Eidola multiplayer» για παράδειγμα, έγινε αξιολόγηση από ένα σύνολο παικτών. Ο τρόπος αξιολόγησης ήταν, μέσα από ερωτηματολόγια που μοιράστηκαν στον τέλος του παιχνιδιού. Οι ερωτήσεις ήταν κλειστού τύπου και οι παίκτες έπρεπε να απαντήσουν μέσα από μια κλίμακα από το 1 μέχρι το 5. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης δημοσιεύτηκαν σε προηγούμενη εργασία [8].

4. Συμπεράσματα

Η επαυξημένη ηχητική πραγματικότητα, προσφέρει ένα σύνολο νέων δυνατοτήτων στον τομέα των ηχητικών παιχνιδιών. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως για την αξιοποίηση τους σε νέα, σύνθετα σενάρια εφαρμογών είναι η επέκταση του υφιστάμενου τεχνολογικού πλαισίου της ARA, το οποίο στηρίζεται στην υποκειμενικά αποδοτική σύνθεση / μίξη του πραγματικού ακουστικού περιβάλλοντος με το αντίστοιχο εικονικό.

Προς την κατεύθυνση αυτή, στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα νέο, διευρυμένο τεχνολογικό πλαίσιο για την ARA, το οποίο, μέσα από στοιχεία διάδρασης υπολογιστικής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, μπορεί να οριοθετήσει νέες δυνατότητες στον τομέα της επαυξημένης ηχητικής πραγματικότητας και των ηχητικών παιχνιδιών, δημιουργώντας σοβαρές προοπτικές ένταξης αυτών στην βιομηχανία των ηλεκτρονικών παιχνιδιών.

5. Αναφορές

[1] Miikka Tikander; Matti Karjalainen; Ville Riikonen, "An Augmented Reality Audio Headset," presented at the DAFx '08, Espoo, Finland, 2008.

[2] Conway Fionnuala; Paterson Natasa, "Spatial Audio and Reverberation in an Augmented Reality Game Sound Design," presented at the AES 40th Conference, Tokyo, Japan, 2010.

[3] Ville Riikonen; Miikka Tikander; Matti Karjalainen, "An Augmented Reality Audio Mixer and Equalizer," presented at the AES 124th Convention, Amsterdam,, 2008.

[4] Nikos Moustakas, A. Floros, and N.-G. Kanellopoulos, "Eidola: An interactive Augmented Reality Audio-Game Prototype," presented at the AES 127th, New York, USA, 2009.

[5] C. J. Aengus Martin and A. V. Schaik, "Psychoacoustic Evaluation of Systems for Delivering Spatialized Augmented-Reality Audio," *JAES,* vol. 57, 2009.

[6] Mantell J., Rod J., Kage Y., Delmotte F., and Leu J., "NAVINKO: Audio Augmented Reality-Enabled Social Navigation for City Cyclists," presented at the Workshop Pervasive 2010, 2010.

[7] *Hackney Hear, Audio Augmented Reality for the London Olympic Games.* Available: http://www.hackneyhear.com/, 2011

[8] Nikos Moustakas, A. Floros, and N. Grigoriou, "Interactive Audio Realitites: An Augmented / Mixed Reality Audio Game prototype," presented at the AES 130th, London, UK, 2011.

[9] Miika Tikander, "Usability Issues in Listening to Natural Sounds with an Augmented Reality Audio Headset," *AES,* vol. 57, pp. 430-431, 2009.

Ηχοτοπία της Κεφαλονιάς: ψηφιακή καταγραφή και διεπιστημονική μελέτη κατά την εκπαιδευτική διαδικασία

Απόστολος Λουφόπουλος
Επιστημονικός. Συνεργάτης / Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων, Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου, Ληξούρι
myrapo@yahoo.com

Μηνάς Εμμανουήλ
Εργαστηριακός Συνεργάτης / Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων, Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου, Ληξούρι
minas_e@yahoo.com

Θεοφάνης Μαραγκός
Εργαστηριακός Συνεργάτης / Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων, Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου, Ληξούρι
fanismaragkos@yahoo.gr

Διονύσιος Κατερέλος
Επίκουρος Καθηγητής / Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου & Μουσικών Οργάνων, Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου, Ληξούρι
dkaterel@teiion.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το άρθρο αυτό αφορά την καταγραφή και μελέτη Ελληνικών ηχοτοπίων ως κοινό σημείο αναφοράς κατά την υλοποίηση διαφορετικών μαθημάτων ανώτατης εκπαίδευσης. Στα πλαίσια μιας συνολικής, διεπιστημονικής προσέγγισης, οι καταγραφές ηχοτοπίων της Κεφαλονιάς περιγράφονται ως προς το περιεχόμενο και τις μεθοδολογίες εφαρμογών και σκιαγραφούνται συμπεράσματα και προοπτικές αξιοποίησης του περιεχομένου από διαφορετικές επιστημονικές οπτικές.

Soundscapes of Cephalonia: digital recording and interdisciplinary study during the educational process

ABSTRACT

This paper refers to the recording and studying of Greek soundscapes as a common ground for different academic modules in higher education. Through a interdisciplinary approach, the recording of Cephalonia soundscapes are described in terms of context and recording methodology, and a number of conclusions and possible applications are highlighted through different scientific perspectives.

Εισαγωγή

Η Κεφαλονιά αποτελεί ένα πλούσιο περιβάλλον, προσφέροντας διαφορετικά και μεταβαλλόμενα ανά εποχή τοπία, αστικά και μη αστικά, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την ανθρώπινη παρουσία, το υψόμετρο, την εγγύτητα προς την θάλασσα και κατ' επέκταση ως προς την ποικιλομορφία των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που περιέχουν. Σπουδαία παραδείγματα αποτελούν το αστικό περιβάλλον Ληξουρίου και Αργοστολίου, αλλά και φυσικά τοπία όπως η ορεινή ζώνη του Αίνου, οι ακτογραμμές αλλά και φυσικοί χώροι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως οι σπηλιές.

Τα τελευταία χρόνια στο Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου και Μουσικών Οργάνων του ΤΕΙ Ιονίων Νήσων έχει ξεκινήσει μια συντονισμένη προσπάθεια καταγραφής των χώρων αυτών από διδάσκοντες και φοιτητές του τμήματος, στα πλαίσια της εκπαιδευτικής διαδικασίας αλλά και ερευνητικών δράσεων. Στόχος είναι η βελτίωση της εκπαιδευτικής διαδικασίας μέσα από τη συνδυαστική διδασκαλία μαθημάτων με κοινό στοιχείο τον ήχο, όπως η ακουστική, η ηχοληψία, η μουσική, και η περαιτέρω επιστημονική μελέτη και ανάπτυξη πιθανών εφαρμογών που αφορούν τους διαφορετικούς τομείς.

1. Ακουστική οικολογία και εκπαιδευτική διαδικασία

Στις καταγραφές της Κεφαλονιάς, για την ανάπτυξη σχέσεων με το ηχητικό περιβάλλον και την αξιοποίησή του από πολύπλευρη σκοπιά, η ακουστική οικολογία [1] χρησιμοποιείται ως κοινή εκπαιδευτική-φιλοσοφική βάση, λόγω της πλατιάς επιστημονικής και καλλιτεχνικής της διάστασης[1].

Η καταγραφή του ηχοτοπίου με τεχνολογικά μέσα (ηχογράφηση, ηχομέτρηση) αναπτύχθηκε ως ανάγκη για μια πιο αντικειμενική παρατήρηση[2], η οποία μπορεί να προκύψει από το συνδυασμό ή την αντιπαράθεση με τη βιωματική μας εμπειρία ως παρατηρητές-"επισκέπτες" ενός ηχητικού περιβάλλοντος. Με παράδειγμα τις δραστηριότητες του *World Soundscape Project*[3] η ψηφιακή καταγραφή ηχοτοπίων μπορεί να έχει πλήθος εφαρμογών ως προς την ανάλυση και σύγκριση με αντικειμενικά κριτήρια, αλλά και ως προς την καλλιτεχνική αξιοποίηση (σύνθεση ηχοτοπίων, επένδυση εγκαταστάσεων, εφαρμογές πολυμέσων κ.α.)

Στην Ελλάδα, με αφετηρία τις καταγραφές στη λιμνοθάλασσα Αντινιότη το 2006 στην Κέρκυρα[4], η ακουστική οικολογία δραστηριοποιείται ως προς την ηχητική χαρτογράφηση και μελέτη ελληνικών περιοχών και πλέον αποτελεί ακαδημαϊκό τομέα και εκπαιδευτική πλατφόρμα για αντικείμενα που αφορούν την

[1] Η ακουστική οικολογία χρησιμοποιεί την έννοια "ηχοτοπίο" (soundscape) [2] για να περιγράψει τον ήχο ενός χώρου, όπως αυτός γίνεται αντιληπτός από τη σύνθεση της αναδυόμενης πληροφορίας που προέρχεται από το συνδυασμό πολλαπλών ηχητικών πηγών. Το ηχοτοπίο, εκτός του ότι το αντιλαμβανόμαστε μέσω της ακοής στο φυσικό ακουστικό περιβάλλον, μπορούμε να το καταγράψουμε και να το ανασυνθέσουμε, μεταφέροντάς το σε διαφορετικούς ακουστικούς χώρους.

[2] Κατά τον B. Truax, όπως περιγράφεται στο '*Acoustic Communication*', ο παρατηρητής του ηχοτοπίου αποτελεί μέρος αυτού, καθώς εντάσσεται σε ένα δυναμικό σύστημα ανταλλαγής πληροφοριών [3]. Έτσι, η αντίληψη του ηχοτοπίου ουσιαστικά συντίθεται από τον παρατηρητή και είναι υποκειμενική.

[3] Σημαντική δραστηριότητα του World Soundscape Project αποτελεί η ηχογράφηση ακουστικών χώρων με στοιχεία φυσικού και πολιτισμικού χαρακτήρα, η οποία ξεκινώντας τη δεκαετία του 1970 από τις καταγραφές του Vancouver (The Vancouver Soundscape) έχει εως σήμερα επεκταθεί παγκοσμίως [4].

[4] Οι καταγραφές έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Πυθαγόρας ΙΙ», συντονιζόμενο από το Ιόνιο Πανεπιστήμιο, το οποίο αφορούσε την ηχητική χαρτογράφηση της λιμνοθάλασσας Αντινιότη, και το οποίο έφερε σε επαφή σύνολο ερευνητών από διαφορετικά επιστημονικά και καλλιτεχνικά πεδία.

περιβαλλοντική εκπαίδευση, σε τριτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαιδευτική κλίμακα[5].

2. Ηχοτοπία της Κεφαλονιάς και μεθοδολογίες προσέγγισης

Στις καταγραφές της Κεφαλονιάς προτείνεται ένα εκπαιδευτικό μοντέλο το οποίο αφορά -πέρα από τη γνωριμία και ανάπτυξη της βιωματικής σχέσης του φοιτητή με το ηχοτοπίο- τη χρήση του ηχοτοπίου ως κοινό μέσο και πεδίο σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών διδασκόμενων μαθημάτων, τα οποία υλοποιούνται ταυτόχρονα στα πλαίσια συνδιδασκαλίας στην ύπαιθρο.

2.1 Στάδια προσέγγισης

(α) ανίχνευση: τα σημεία προς καταγραφή ανιχνεύονται μέσα από επισκέψεις σε χώρους πιθανού ενδιαφέροντος. Οι φοιτητές ενθαρρύνονται ως προς το να αφουγκραστούν με προσοχή το περιβάλλον, να το εξερευνήσουν ηχητικά και να πειραματιστούν με ηχογόνες πηγές που ανακαλύπτουν σε αυτό.

(β) καταγραφή: για την υλοποίηση της καταγραφής χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός και τεχνικές ηχοληψίας, ως προς τις οποίες οι φοιτητές ασκούνται σε συνθήκες ηχογράφησης ανοιχτού πεδίου (field recoding).

(γ) ανάλυση / μετέπειτα εκπαιδευτική υλοποίηση: το καταγεγραμμένο υλικό σε ψηφιακή μορφή αρχειοθετείται και διατίθεται στους φοιτητές και τους διδάσκοντες για μετέπειτα χρήση στα πλαίσια διαφορετικών μαθημάτων.

2.2 Τρόποι προσέγγισης της καταγραφής

(α) παθητική διαδικασία: το ηχοτοπίο καταγράφεται ‘παθητικά’, χωρίς την ηχογόνα παρέμβαση του καταγραφέα-παρατηρητή σε αυτό. Οι μετέχοντες καλούνται να παραμένουν ακίνητοι και σιωπηλοί καθ’όλη τη διάρκεια της ηχογράφησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα, από τη στιγμή που ο παρατηρητής μένει ακίνητος έως ότου το ηχοτοπίο επανέλθει στην φυσική του κατάσταση[6].

(β) ενεργητική διαδικασία: το ηχοτοπίο καταγράφεται μέσα από την παρέμβαση του παρατηρητή και τη διάδρασή του με αυτό. Σε αυτή τη διαδικασία οι συμμετέχοντες καλούνται να ‘ενταχθούν’ ηχηρά στο ηχοτοπίο, παράγοντας ήχους ανθρωπογενείς (λχ. βήματα, φωνές) ή διαδρώντας με ηχογόνα στοιχεία που ανακαλύπτουν στον καταγραφόμενο ηχητικό χώρο.

2.3 Καταγραφή και είδη ηχοτοπίων

[5] Η Ι. Ετμεκτζόγλου, ως παράδειγμα εφαρμογής στη σχολική εκπαίδευση, προτείνει την γνωριμία των μαθητών με το περιβάλλον μέσα από την οπτική της ακουστικής οικολογίας, όπου οι μαθητές μέσα από την ακρόαση, ανάλυση και καλλιτεχνική διευθέτηση ηχοτοπίων του δάσους γνωρίζουν το περιβάλλον, αναπτύσσοντας συναισθηματική σχέση με αυτό και οικολογική συνείδηση για την προστασία του [5].

[6] Αυτό συμβαίνει κυρίως σε ηχοτοπία που συντίθενται από ήχους έμβιων όντων (πουλιά, έντομα κλπ.), των οποίων η ηχητική συμπεριφορά επηρεάζεται από την παρουσία (κινήσεις, ήχοι) του παρατηρητή. Κατά τον Truax [3], η ηχητική ένταξη του παρατηρητή στο ηχοτοπίο επηρεάζει την δυναμική διαμόρφωσή του, καθώς σε ένα τέτοιο σύστημα ανταλλαγής πληροφοριών και ηχητικής επικοινωνίας οποιαδήποτε ηχητική μεταβολή των επιμέρους στοιχείων έχει άμεση επίδραση στο συνολικό ηχητικό αποτέλεσμα, κάτι που παρατηρείται και επιβεβαιώνεται στις εν λόγω δράσεις καταγραφών.

Τα καταγραφόμενα ηχοτοπία εντάσσονται σε δύο βασικούς πόλους περιγραφής:

(α) ηχητικές εικόνες: τα ηχοτοπία αυτά αφορούν μεγάλη ακτίνα ηχητικής πρόσληψης, όπου ο χώρος καταγράφεται συνολικά χωρίς να υπερισχύει ηχητικά κάποια από τις επιμέρους πηγές.

(β) επικεντρωμένες καταγραφές: αφορούν την ηχητική εστίαση της ηχογράφησης σε κάποιο επιμέρους στοιχείο, το οποίο κυριαρχεί ηχητικά και ενδέχεται να συνοδεύεται από ήχους υπόβαθρου, οι οποίοι ακούγονται σε απόσταση εντός του καταγραφόμενου ηχητικού χώρου[7].

Ενδιάμεσες κατηγορίες ηχοτοπίων μπορούν να ανιχνευτούν μεταξύ των δύο παραπάνω πόλων περιγραφής, ανάλογα με το ποσοστό ηχητικής παρουσίας ενός ή περισσότερων ηχητικών στοιχείων στο ηχοτοπίο. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των κατηγοριών αυτών παίζει και η μέθοδος καταγραφής και ιδιαίτερα το είδος και η τοποθέτηση των μικροφώνων, καθώς οι ιδιότητες αυτών (κυρίως η κατευθυντικότητα) μπορεί να επηρεάσουν προς τον έναν ή τον άλλο πόλο[8].

2.4 Εξοπλισμός και μέθοδοι ηχητικής καταγραφής

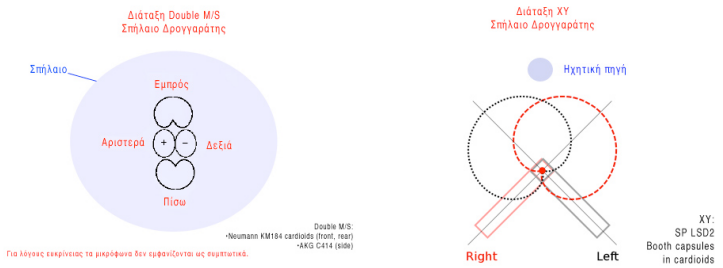
Ενδεικτικά, στον εξοπλισμό χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, τα παρακάτω:

- Μικρόφωνα: Holophone H2-Pro, Studio Projects LSD2, AKG C414, Neumann KM184, κ.α.
- Συστήματα καταγραφής: MacBook Pro μαζί με MOTU 896 Mk3 και το λογισμικό Logic Pro, Tascam DR-680 (6 κανάλια καταγραφής), Tascam DR-100 (2 κανάλια καταγραφής).

Ο σχεδιασμός των τεχνικών που εφαρμόζονται στις καταγραφές γίνεται με γνώμονα την κάλυψη όσο το δυνατόν περισσότερων στέρεο και πολυκαναλικών τεχνικών, στοχεύοντας αφενός στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων της κάθε μιας και αφετέρου στη μεταξύ τους συγκριτική μελέτη ανά εφαρμογή. Έτσι, σε κάθε καταγραφή εφαρμόζονται ταυτόχρονα τουλάχιστον δύο διαφορετικές τεχνικές. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του σπηλαίου της Δρογγαράτης στην Κεφαλονιά, εφαρμόστηκε η τεχνική Double M/S για την καταγραφή του συνόλου του χώρου του σπηλαίου (λόγω της ικανότητας καταγραφής σε 360 μοίρες) και παράλληλα, η τεχνική XY για spot, επικεντρωμένες ηχογραφήσεις των σταγόνων που έπεφταν στο σπήλαιο (εικ.1). Επίσης, στην περίπτωση καταγραφών στο όρος Αίνος , χρησιμοποιήθηκε η Double M/S για την ολική καταγραφή του ανοικτού ηχοτοπίου, ανώ η τεχνική A/B για κοντινές ηχογραφήσεις συγκεκριμένων ήχων του περιβάλλοντος, όπως το λιώσιμο του χιονιού.

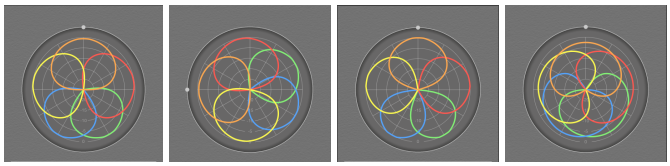
7 Οι έννοιες επιφάνεια και υπόβαθρο με αναφορά στον παράγοντα χώρο αναλύονται στη διατριβή με τίτλο «Το ηχοτοπίο ως πρωτογενές υλικό για τη σύνθεση ηλεκτριακουστικής μουσικής» [5].

8 Για παράδειγμα, η χρήση κατευθυντικών μικροφώνων προς την κατεύθυνση προέλευσης ενός συγκεκριμένου ήχου, ενδεχομένως θα οδηγήσει σε μια πιο επικεντρωμένη καταγραφή.



Εικ. 2.1 Τεχνικές Double M/S και XY στο σπήλαιο Δρογγαράτης.

Στην περίπτωση της Double M/S δίδεται βάρος στην δυνατότητα που παρέχει για αναπαράσταση του ηχοτοπίου πέραν των ορίων του ρεαλιστικού, μέσω των τεχνικών αποκωδικοποίησής της. Οι τεχνικές αυτές δίνουν τη δυνατότητα σε επίπεδο μεταπαραγωγής για μεταβολές στο εύρος του χώρου και τη γωνία των μικροφώνων κατα 360 μοίρες, αυξομείωση του διαχωρισμού του ήχου στα ηχεία αναπαραγωγής, μεταβολές εντάσεων των καναλιών αναπαραγωγής, κλπ (εικ.2.2).



Εικ. 2.2 Αποκωδικοποίηση Double M/S, αυξομείωση διαχωρισμού ηχείων και μετατόπιση γωνίας μικροφώνων (Double M/S Tool plugin, Schoeps Mikrofone).

3 Καταγραφή και διεπιστημονική εκπαιδευτική υλοποίηση

Ως προς την ηχοληψία, η μεταφορά του μαθήματος σε καταστάσεις ανοικτού πεδίου προσφέρει μια μοναδική ευκαιρία δημιουργίας εμπειριών και ένα σπουδαίο εναλλακτικό εργαλείο γνώσης των θεμάτων και των τεχνικών της ηχοληψίας. Οι φοιτητές που συμμετέχουν σε αυτά τα μαθήματα-δράσεις έχουν την ευκαιρία να συνειδητοποιήσουν ποσότητες και ποιότητες του ήχου, που δεν είχαν μάθει να παρατηρούν και να εκτιμούν υπό άλλες συνθήκες. Μαθαίνουν να ηρεμούν και να συγκεντρώνονται στον ήχο του περιβάλλοντος, να ξεχωρίζουν τις διαφορετικές ποιότητες ήχου που το αποτελούν και το ιδιαίτερο συχνοτικό τους περιεχόμενο, τις μεγάλες δυναμικές μεταβολές που συναντώνται, αναπτύσσουν την αντίληψη στην αίσθηση των διαφορετικών χώρων, αλλά και στην αίσθηση της κατευθυντικότητας των ήχων. Επιπλέον, εφαρμόζοντας διαφορετικές τεχνικές καταγραφής προσπαθούν να οικειοποιηθούν το αποτέλεσμα της κάθε μιας, με στόχο να μπορούν να επιλέξουν κάθε φορά ποιά τεχνική αρμόζει περισσότερο σε κάθε εφαρμογή.

Επίσης, είναι πολύ σημαντικό το γεγονός ότι, οι φοιτητές μαθαίνουν να δουλεύουν σε καταστάσεις όπου οι όποιες ανέσεις μπορεί να βρίσκονται χιλιόμετρα μακριά. Συνεπώς, αντιλαμβάνονται τη σπουδαιότητα της άρτιας οργάνωσης και προετοιμασίας που απαιτεί μια τέτοιου είδους ηχογράφηση, σε τεχνικό, ομαδικό και προσωπικό επίπεδο. Η εξασφάλιση της ενέργειας για να δουλέψουν τα συστήματα καταγραφής, η δοκιμή της ορθής λειτουργίας τους πριν την απομάκρυνση από τη

βάση, η λήψη των απαράιτητων καλωδίων, βάσεων, και ανεμοθωράκων, της απαραίτητης τροφοδοσίας και προστασίας από τις καιρικές συνθήκες, ο καταμερισμός των ρόλων, είναι μερικά από τα θέματα που μαθαίνουν οι φοιτητές να μεριμνούν πριν φτάσουν στον χώρο καταγραφής. Τέλος, η άμεση λήψη αποφάσεων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που μπορεί να εμφανιστούν, ούτως ώστε να μη σπαταληθεί ο χρόνος καταγραφής και να μη χαθεί ο στόχος, είναι ένα ακόμα πολύ σημαντικό μάθημα που λαμβάνουν οι φοιτητές.

Ως προς την ακουστική, η καταγραφή του ηχοτοπίου μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο του εκπαιδευτικού πεδίου της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου. Μελετώντας το υλικό των καταγραφών, γίνεται εύκολα αντιληπτή η διαφορά μεταξύ ανοικτού και κλειστού χώρου. Π.χ. καταγραφή ηχοτοπίου από τον ορεινό όγκο της Κεφαλονιάς ή την ακτογραμμή, συγκρινόμενη με καταγραφή από φυσικό κλειστό χώρο δίνει, κατ' αρχήν ποιοτικά, την αντίληψη της αντήχησης / ηχούς.

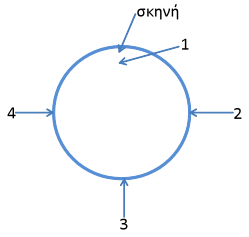
Σε επόμενο στάδιο είναι ευκολότερο να οριστούν ποσοτικά τα μεγέθη μέτρησης της αντήχησης, όπως ο χρόνος αντήχησης. Ως παράδειγμα αναφέρεται η σχετική διαδικασία μετρήσεων που έλαβε χώρα στο σπήλαιο της Δρογγαράτης στην Κεφαλονιά. Το σπήλαιο αυτό, πέρα από τη φυσική ομορφιά, που το καθιστά πόλο επισκεπτών, είναι από παλαιά γνωστό ότι διαθέτει καλή ακουστική, με αποτέλεσμα τη διοργάνωση εντός του συναυλιών από γνωστούς καλλιτέχνες, π.χ. την κ. Μαρία Φαραντούρη. Ο όρος «καλή ακουστική», ποιοτικός και χωρίς περαιτέρω ανάλυση, ώθησε στη διερεύνηση του τί ακριβώς σημαίνει.

Στη διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το ηχόμετρο 2250 B&K με το οποίο μετρήθηκε ο χρόνος αντήχησης εντός του σπηλαίου σε τέσσερις διαφορετικές θέσεις περιμετρικά του σημείου στο οποίο τοποθετείται, σε περίπτωση εκδηλώσεων, η σκηνή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1 Χρόνος αντήχησης σπηλαίου Δρογγαράτης Κεφαλονιάς

Θέση	Εύρος συχνοτήτων	Χρόνος αντήχησης (T20) (s)
1	400 Hz – 1.25 kHz	2.43
2	400 Hz – 1.25 kHz	2.31
3	400 Hz – 1.25 kHz	2.21
4	400 Hz – 1.25 kHz	2.31

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται σχηματικά οι θέσεις μέτρησης:



Σχήμα 3.1 Θέσεις μετρήσεων εντός του σπηλαίου

Τέλος, η μουσική δημιουργία αφορά όλα τα στάδια που αναφέρονται στο *2.2*. Στο πρώτο στάδιο επικεντρώνεται στην ανίχνευση για πρωτογενές υλικό σύνθεσης και στη λήψη των πρώτων αποφάσεων για το σχεδιασμό μίας σύνθεσης (μουσική

γλώσσα, μουσική μορφή, κεντρική ιδέα) οι οποίες απορρέουν από την ηχητική γνωριμία με το ηχοτοπίο και την ανάπτυξη συναισθηματικής σχέσης με αυτό. Το δεύτερο στάδιο, αποτελεί την έναρξη της σύνθεσης, ιδιαίτερα κατά την 'ενεργητική διαδικασία' (βλ. *2.3*), όπου οι φοιτητές μπορούν να διαμορφώσουν τον ήχο μουσικά κατά την ηχογράφηση. Σε αυτό το στάδιο συχνά χρησιμοποιείται η ιδιαίτερη ακουστική συμπεριφορά κάποιων χώρων (λ.χ. σπηλαίων) για την πρόσδοση ηχητικών φαινομένων όπως η αντήχηση στους παραγόμενους ήχους[9]. Το τρίτο στάδιο είναι ίσως το πιο σημαντικό, καθώς αφορά τη μεταφορά των ψηφιοποιημένων ηχοτοπίων σε περιβάλλον Η/Υ προς επεξεργασία και μίξη. Η σύνθεση με ηχοτοπία (soundscape composition) προσεγγίζεται μέσα από τη γλώσσα της ηλεκτροακουστικής μουσικής λόγω της έντονης σχέσης της γλώσσας αυτής με τον παράγοντα χώρο (και συνεπώς με την έννοια του ηχοτοπίου) και της συνάφειάς της με την ακουστική οικολογία ως προς την αισθητική προσέγγιση των ήχων, αλλά και λόγω του ανοιχτού και ελεύθερου χαρακτήρα της ως προς την αντιμετώπιση του ηλεκτρονικού μέσου. Στόχος των μαθημάτων μέσω του παραπάνω συνδυασμού είναι αφ'ενός η καλύτερη δυνατή εκμάθηση της ψηφιακής τεχνολογίας ήχου μέσα από τη δημιουργική επεξεργασία των ήχων, και αφ'εταίρου η ανάπτυξη ιδιαίτερων τεχνικών επεξεργασίας και μουσικών αισθητικών αντιλήψεων.

Οι συνθέσεις που παράγονται υλοποιούν διαφορετικά μοντέλα ηχοτοπίων (αληθοφανή-αφηρημένα-υβριδικά)[10] και παρουσιάζονται σε κλειστούς χώρους στα πλαίσια μαθημάτων, τακτικών συναυλιών και πανελλήνιων διοργανώσεων. Κατά την ακρόαση το παραγόμενο υλικό προβάλλεται μέσω συστήματος πολλαπλών ηχείων, σε μορφή stereo ή πολυκαναλική (stereo-surround diffusion), όπου ο ήχος διαχέεται στις φυσικές διαστάσεις του εκάστοτε χώρου (αίθουσα εργαστηρίου, θεάτρου κτλ) με στόχο την εκ νέου διαμόρφωση ακουστικών διαστάσεων ανά περίπτωση. Για τον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων απαιτείται ξανά η συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τομέων, όπου οι φοιτητές ασκούνται ως προς την εφαρμογή συνδυασμού γνώσεων ηχοληψίας και μουσικής ακουστικής (ηχητικός σχεδιασμός και κάλυψη της συναυλίας).

4 Συμπεράσματα

Σε επίπεδο εκπαιδευτικό, η πρακτική της ηχοληψίας σε ηχοτοπία έχει ιδιαίτερα θετικό αντικτυπο στους συμμετέχοντες φοιτητές, προσφέροντάς τους έναν σπουδαίο τρόπο μάθησης και κατανόησης βασικών αρχών και τεχνικών της ηχοληψίας. Σε επίπεδο εφαρμογών, τα συμπεράσματα ποικίλουν ανάλογα με τις τεχνικές και έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αν και προσφέρουν ένα πεδίο για γόνιμη αντιπαράθεση και προβληματισμό, συνοπτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε πως οι πολυκαναλικές τεχνικές έχουν περισσότερες δυνατότητες αποτύπωσης του συνόλου του ηχοτοπίου, όπως και οι στέρεο τεχνικές που βασίζονται σε παντοκατευθυντικά μικρόφωνα (για παράδειγμα A/B και M/S (omni mid). Στον αντίποδα, οι στέρεο τεχνικές με κατευθυντικά μικρόφωνα (XY, M/S (cardioid mid)) μπορούν να προσφέρουν άριστο αποτέλεσμα κυρίως όταν χρησιμοποιούνται για επικεντρωμένες ηχογραφήσεις.

---

[9] Αυτό λειτουργεί συχνά ως 'φυσική επεξεργασία' των ήχων με στόχο τη μετέπειτα ένταξή τους σε ηλεκτρονικό μουσικό περιεχόμενο. Η εργασία (σε εξέλιξη) της φοιτήτριας Π. Τσαφώνια αφορά τη μεταφορά/αναπαραγωγή διαφορετικών ηχοτοπίων στο σπήλαιο της Δρογκαράτης και την καταγραφή τους εντός του σπηλαίου, με στόχο την απόκτηση φυσικής αντήχησης και μελέτη της απόδοσης των καταγραφόμενων ήχων στο μουσικό περιεχόμενο.

[10] (Λουφόπουλος, 2008: 50-51) [5].

Ως προς την ακουστική, η διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.2 αποτελεί παράδειγμα αξιοποίησης των ηχοτοπίων στην εκπαιδευτική διαδικασία και, επί του προκειμένου, στο αντικείμενο της ακουστικής συμπεριφοράς, μεταφέροντας στους φοιτητές την απαιτούμενη από το μάθημα πληροφορία.

Ως προς τη μουσική, παρατηρείται ότι το ηχοτοπίο ως πρωτογενές υλικό αποτελεί μία πλούσια και γνώριμη ηχητική βάση, με την οποία οι φοιτητές επιτυγχάνουν άμεσα δημιουργικά αποτελέσματα, χωρίς την προαπαίτηση ιδιαίτερων μουσικών δεξιοτήτων. Επιπλέον, το ηχοτοπίο λειτουργεί αποδοτικά ως προς την κατανόηση βασικών εννοιών της ηλεκτροακουστικής μουσικής (ηχητικό σχήμα, χώρος), αλλά και ως προς την ιδιαίτερη προσέγγιση της μουσικής ακουστικής κατά τη δημιουργία νέων –ρεαλιστικών ή μη- ηχοτοπίων και την ενσωμάτωσή τους στις φυσικές διαστάσεις κλειστών ακουστικών χώρων κατά την μουσική εκτέλεση (diffusion).

Συνολικά, όπως παρατηρείται από την ακαδημαϊκή απόδοση των φοιτητών που συμμετείχαν στις καταγραφές και την μετέπειτα εκπαιδευτική υλοποίησή τους εως τώρα στους 3 διαφορετικούς τομείς, μέσω της εφαρμογής του περιγραφόμενου συνδυαστικού εκπαιδευτικού μοντέλου επιτυγχάνεται:

(α) πληρέστερη και αμεσότερη απόκτηση γνώσεων στα διδασκόμενα μαθήματα, λόγω ταυτόχρονης γνωριμίας με διαφορετικά γνωστικά πεδία και διασύνδεσής τους μέσω της αναγνώρισης των κοινών γνωστικών παραγόντων.

(β) καλύτερη αφομοίωση φιλοσοφικών εννοιών αλλά και τεχνικών διαδικασιών λόγω πραγματοποίησης μαθημάτων σε ηχητικά περιβάλλοντα υψηλής πιστότητας (high fidelity environments), όπως αποτελούν αρκετά από τα φυσικά ηχοτοπία καταγραφών, τα οποία κατά τον Shafer [7] επιδρούν θετικά ως προς την ψυχολογία και κατ'επέκταση την αντιληπτικότητα και επικοινωνία.

(γ) απόκτηση οικολογικής συνείδησης και σεβασμού ως προς το περιβάλλον, ανάγοντας τον ήχο της φύσης ως ένα ακόμη πολύτιμο αγαθό το οποίο χρήζει μελέτης και προστασίας.

5 Αναφορές

[1] Schafer, R.M. The New Soundscape: A handbook for the modern music teacher. Canada: BMI (1969).

[2] Truax, B. «Soundscape studies, an introduction to the World Soundscape Project», *Numus West*, 5, (Spring 1974).

[3] Truax, B. *Acoustic Communication* 2nd edition. Westport, CT: Greenwood Press (2001).

[4] Kallmann, A. P. Woog, H. Westerkamp, 'World Soundscape Project', *The Canadian Encyclopedia,* Historica Foundation (2012).

[5] Ετμεκτζόγλου, Ι. «Ακουστική Οικολογία στο Σχολείο: Το Δάσος ως Διαμορφωτής των Ήχων του Περιβάλλοντος», *Η Τέχνη ως εργαλείο εκπαίδευσης για το περιβάλλον*, 1ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΤΕΧΝΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ (2009).

[6] Λουφόπουλος, Α. «Το ηχοτοπίο ως πρωτογενές υλικό για τη σύνθεση ηλεκτροακουστικής μουσικής", *μεταδιδακτορική διατριβή*, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Κέρκυρα (2008).

[7] Schafer, P.M. The Tuning of the World, Philadelphia: University of Pennsylvania Press (1980).

Το ηχοτοπίο ως παράμετρος του αστικού σχεδιασμού: Διερεύνηση και εφαρμογή

Πέπη Χουρμουζιάδου
Αρχιτέκτων Μηχ., MArch, PhD
k.chourmouziadou@windowslive.com

Κωνσταντίνος Σακαντάμης
Αρχιτέκτων Μηχ., Λέκτορας Α.Π.Θ.
k.sakantamis@live.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάδειξη του ηχοτοπίου ως παράμετρο του αστικού σχεδιασμού. Η αντίληψη της ακουστικής ποιότητας του αστικού χώρου αποτελεί τμήμα της διαδικασίας κατανόησης του. Καθώς η όραση εδραιώθηκε ως η σημαντικότερη αίσθηση στην ανάπτυξη του πολιτισμού, η ακουστική παράδοση υποτιμήθηκε. Η ομάδα εργασίας WG-4, 'Δημιουργίας και Σχεδιασμού', της δράσης COST TD0804 με τίτλο 'Soundscape of European Cities and Landscapes' έχει αναλάβει την προώθηση της υπάρχουσας εμπειρίας, την πρακτική καθοδήγηση και τη διάθεση εργαλείων σχεδιασμού και διατήρησης ηχοτοπίου. Η εργασία αρχικά αναφέρει στοιχεία για τον διεπιστημονικό χαρακτήρα του ηχοτοπίου, και τις σημαντικές διαφορές μεταξύ της προσέγγισης του από αυτή του θορύβου. Έπειτα, εξετάζει παραδείγματα εφαρμογής και οδηγίες για σχεδιασμό του ηχοτοπίου. Τέλος, στην παρουσίαση προβάλλονται δείγματα δουλειάς φοιτητών αρχιτεκτονικών σχολών, όπου ηχοτοπία σχεδιάζονται ως εγκαταστάσεις στον αστικό χώρο.

Soundscape as an urban design parameter: Investigation and application

ABSTRACT

This paper aims to promote soundscape as a parameter of urban design. Sound quality perception is a part of a process of understanding urban space. Whereas vision has been established as the most important sense during the development of civilization, the acoustic tradition was diminished. Working group WG-4 'Creation and design' of the COST Action TD0804 entitled 'Soundscape of European Cities and Landscapes' is dedicated to disseminate existing experiences, to provide practical guidance and tools for the design and implementation of new and the preservation of existing soundscapes. This paper initially introduces the multidisciplinary characteristics and the most important differences between soundscape and noise. It then examines case studies of soundscape applications and provides guidance for its design. Finally, during the presentation soundscape installations in urban space, created by students of architecture, are presented.

Εισαγωγή

Η παγκόσμια οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών οδήγησε στην αύξηση της ανάγκης για ποιοτική ζωή και υγεία. Η διαδικασία της κατανόησης του αστικού χώρου δεν εξαρτάται μόνο από τις αισθήσεις μας, αλλά κι από ιστορικά και πολιτισμικά δεδομένα. Ο χρήστης αντιλαμβάνεται την ποιότητα του περιβάλλοντος μέσω μια διαδικασίας ανάλυσης πληροφοριών, όπου εμπλέκονται όλες οι αισθήσεις και οι πολιτισμικές προσλαμβάνουσες. Η αντίληψη της ακουστικής ποιότητας αποτελεί τμήμα αυτής της διαδικασίας και ο θόρυβος προκύπτει είτε από την αρνητική ερμηνεία των χαρακτηριστικών του ήχου (υπερβολική ενέργεια, δυσάρεστη συχνότητα, έλλειψη ενδιαφέροντος), είτε όταν ο συνδυασμός πολλαπλών ήχων είναι δυσάρεστος.

Η δράση COST TD0804 με τίτλο 'Soundscape of European Cities and Landscapes' δημιουργήθηκε με στόχο την ανασκόπηση και εξισορρόπηση του παρόντος λεξικού και της μεθοδολογίας και συνεπώς την ανάπτυξη νέων δεικτών που χαρακτηρίζουν και προσεγγίζουν με βέλτιστο τρόπο την ποιότητα του ήχου του περιβάλλοντος, σε σχέση με τους συμβατικούς δείκτες στάθμης dB που χρησιμοποιούνται ως βάση της Ευρωπαϊκής και της διεθνούς νομοθεσίας.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ανάδειξη του ηχοτοπίου ως παράμετρο του αστικού σχεδιασμού, μέσω βιβλιογραφικών αναφορών και μεθοδολογιών έρευνας και εφαρμογής του, καθώς και στην ένταξη του στην εκπαιδευτική διαδικασία. Αρχικά αναφέρει στοιχεία για τον διεπιστημονικό χαρακτήρα του ηχοτοπίου, την εξέταση του από διαφορετικούς τομείς της ακουστικής έρευνας, καθώς και τις σημαντικές διαφορές μεταξύ της προσέγγισης του από αυτή του θορύβου. Η ενσωμάτωση της γνώσης των διαφορετικών γνωστικών πεδίων, όπως και η μεθοδολογία και η πολιτισμική διαφοροποίηση, είναι απαραίτητη για την βελτίωση της κατανόησης των γενικών και των επιμέρους θετικών συνεπειών ή αρνητικών επιπτώσεων του ηχοτοπίου στους πολίτες. Έπειτα, παρουσιάζει παραδείγματα εφαρμογής του ηχοτοπίου, μέσω αστικού-ακουστικού σχεδιασμού, που πραγματοποιήθηκαν σε αστικά κέντρα της Ευρώπης. Παράλληλα παρέχει οδηγίες για το σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη του το ηχοτοπίο, τόσο σε αρχιτεκτονικό (χωροθέτηση χρήσεων εντός του κτιρίου), σε πολεοδομικό (καθορισμός κενού-πλήρους και βέλτιστων επιφανειών) και σε αστικό επίπεδο (αστικά πάρκα, δημόσιος χώρος), όπως και μύθους καλής εφαρμογής ηχοτοπίου (water features, quiet areas). Τέλος, στην παρουσίαση της εργασίας θα προβληθούν δείγματα δουλειάς φοιτητών αρχιτεκτονικών σχολών, όπου ηχοτοπία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ως εγκαταστάσεις στον αστικό χώρο.

1. Ομάδα εργασίας WG-4, 'Δημιουργίας και Σχεδιασμού', COST TD0804 'Soundscape of European Cities and Landscapes'

Το ζητούμενο και ο κύριος στόχος του COST Action TD0804, Soundscape of European Cities and Landscapes, το οποίο ξεκίνησε στις αρχές του 2009 με διάρκεια τεσσάρων χρόνων, είναι η προβολή της έρευνας του ηχοτοπίου ώστε το πεδίο να εξελιχθεί σημαντικά, μέσω συντονισμένων διεθνών προσπαθειών διαφορετικών τομέων της επιστήμης. Η δράση σκοπεύει να συντάξει πρακτικές οδηγίες σχετικές

με το ηχοτοπίο για την υποστήριξη της υγείας και της αειφορίας, την προσέλκυση επενδύσεων, την εξασφάλιση της πολιτιστικής ιδιαιτερότητας/διαφοροποίησης και την βελτίωση της ποιότητας ζωής. Παράλληλα, θα εντάξει το ηχοτοπίο στη σύγχρονη νομοθεσία, αρχές και πρακτική, στοχεύοντας στη βελτίωση ή διατήρηση του ηχητικού περιβάλλοντος.

Οι πέντε ομάδες εργασίας, βάσει του προγράμματος είναι: (1) κατανόηση και ανταλλαγή (2) συλλογή και αρχειοθέτηση, (3) εναρμόνιση, (4) δημιουργία και σχεδιασμός και (5) προσέγγιση και εκπαίδευση. Λόγω της φύσης του ηχοτοπίου, η έρευνα του προϋποθέτει στενή διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ των παραπάνω ομάδων, ανθρωπολογίας, αρχιτεκτονικής, οικολογίας, ανθρωπογεωγραφίας, γλωσσολογίας, ιατρικής, ελέγχου θορύβου, ψυχολογίας, κοινωνιολογίας και τεχνητής νοημοσύνης. φυσικών επιστημών, μηχανικών, κοινωνικών επιστημών, και τέχνης.

Οι δραστηριότητες της ομάδας εργασίας (4) επικεντρώνονται κυρίως στη πρακτική εκτέλεση και γεφύρωση του κενού μεταξύ θεωρίας και πράξης. Εξετάζει την αποτελεσματικότητα των σχεδιαστικών αλλαγών στο τοπίο, των αρχιτεκτονικών στοιχείων και των συστατικών του ήχου όσον αφορά στη βελτίωση του ηχοτοπίου και την αντίληψη του χρήστη ή την διατήρηση υφιστάμενων ηχοτοπίων ως μέρος της πολιτιστικής μας κληρονομιάς (μεγάλες αγορές, τοπικά φεστιβάλ κ.λ.π.). Παρόλο που το ηχοτοπίο σχετίζεται με τον εξωτερικό χώρο, οι αρχές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε κλειστούς δημόσιους χώρους με παρόμοια χρήση, όπου η ακουστική άνεση και ποιότητα δε μπορεί να επιτευχθεί απλά με έλεγχο θορύβου. Επίσης, η ομάδα (4) συνεργάζεται με την ISO/TC43/SC1/WG54 "Perceptual assessment of soundscape quality" (Αντιληπτική εκτίμηση της ποιότητας του ηχοτοπίου).

2. Η ένταξη του ηχοτοπίου στον αστικό σχεδιασμό

Σύμφωνα με το Handbook of Acoustic Ecology [1] το ηχοτοπίο είναι είναι το ηχητικό περιβάλλον όπως αυτό το αντιλαμβάνεται και το κατανοεί το άτομο ή η κοινωνία και συνεπώς εξαρτάται από τη σχέση του ατόμου με το περιβάλλον. Ο ρόλος των ακουστικών, των αρχιτεκτόνων και των πολεοδόμων είναι να προσεγγίσουν, να ορίσουν και να προσφέρουν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τη δημιουργία ηχητικού περιβάλλοντος που θα συνεισφέρει στην βελτίωση της ποιότητας ζωής του ατόμου, δεδομένων των συνιστωσών κάθε φορά (context).

Σε επίπεδο αστικού περιβάλλοντος η πολυπλοκότητα της ανθρώπινης δραστηριότητας και της αστικής κίνησης δύναται να δημιουργήσει «επιθετικά» ηχοτοπία. Οι πόλεις είναι ζωντανοί και δυναμικοί ιστοί οι οποίοι δημιουργούνται από τη συγκέντρωση χρηστών για κοινωνικοοικονομικούς λόγους. Η ανάπτυξη οφείλει να είναι όσο το δυνατό αρμονική και αειφόρα. Με αυτά τα δεδομένα η αστική αρχιτεκτονική αποτελεί σημαντικό παράγοντα συμβολής στην οργάνωση της αντίληψης της αίσθησης του τόπου που, παρά την αισθητική των κτιρίων, εξαρτάται από την αστική δομή και την σχέση κενού και πλήρους, κτισμένου και ανοιχτού, ιδιωτικού και δημόσιου. Καθώς η όραση εδραιώθηκε ως η σημαντικότερη αίσθηση στην ανάπτυξη του πολιτισμού, η ακουστική παράδοση υποτιμήθηκε [2-3]. Το συστατικό του ήχου παραμένει σχετική παράμετρος στην αντίληψη του τόπου, αν

και συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στον αρχιτεκτονικό, αστικό και πολεοδομικό σχεδιασμό [4] με αποτέλεσμα την έλλειψη άνεσης ή την ενόχληση σε πολλά αστικά κέντρα [5-6]. Εκτός από τη μείωση του μηχανικού θορύβου, σε επίπεδα που δεν προσβάλλουν την υγεία του ανθρώπου, η αναγνώριση του ηχοτοπίου κάθε τόπου, η διαφοροποίηση του και η σχέση του ατόμου του ηχητικού περιβάλλοντος και της κοινωνίας είναι επίσης προς εξέταση. Ο περιβαλλοντικός ήχος πρέπει να θεωρείται πόρος κι όχι απόβλητο [7], ενώ η διαχείριση του ήχου κρίνεται αναγκαία για την αντίληψη μας, όπου η δραστηριότητα από τη διασκέδαση ή ακόμη και την κίνηση μπορεί να συνεισφέρει στην αίσθηση ζωντάνιας ως τμήμα της ταυτότητας μιας πόλης.

Σύμφωνα με την ομάδα εργασίας WG(4) η προσέγγιση του ηχοτοπίου διαφέρει από εκείνη του θορύβου. Ο θόρυβος θεωρείται ρύπανση, προκαλεί δυσφορία, έχει επιπτώσεις στα άτομα ανάλογα με τη στάθμη του, είναι μετρήσιμος με συνδυασμό όλων των πηγών και μπορεί να ελεγχθεί με μείωση της στάθμης του. Αντίθετα το ηχοτοπίο θεωρεί τον ήχο πόρο (επιθυμητός ήχος), η προτίμηση δεν σχετίζεται με τη στάθμη (διότι η ησυχία δεν είναι πάντα το ζητούμενο), επιβάλλει αναγνώριση και διάκριση των επιμέρους πηγών (επιθυμητός και ανεπιθύμητος ήχος) και είναι διαχειρίσιμος κατά την διάκριση αυτή. Συνήθως επιθυμητοί ήχοι θεωρούνται ο ήχος του νερού εν κινήσει, οι ήχοι της φύσης (πουλιά, ζώα, έντομα, άνεμος), ήχοι των ανθρώπων (φωνές, βήματα, γέλιο, τραγούδι κ.λ.π.). Το πιο σημαντικό όμως κριτήριο στην αναγνώριση ενός επιθυμητού ήχου είναι το πλαίσιο συνθηκών (ποιος, πού, ποια ώρα, κάτω από ποιες συνθήκες).

Συχνά συναντώνται μύθοι καλής εφαρμογής ηχοτοπίου [8], όπως για παράδειγμα η πεποίθηση πως ότι σχετίζεται με το νερό είναι θετικό ή το ότι η ησυχία είναι το ζητούμενο. Είναι δεδομένο ότι η φύση είναι σπάνια ήσυχη, οι μουσικοί του δρόμου και οι παιδικές χαρές δεν εκπέμπουν ησυχία! Ο σχεδιασμός του ηχοτοπίου δεν δημιουργεί σιγή αλλά οφείλει να προβλέπει την καταλληλότητα του ήχου σε σχέση με το χώρο και το τοπίο. Η Westerkamp υποστήριξε πως φυσικοί ήχοι μεγάλης στάθμης καλύπτουν ανεπιθύμητους ήχους [9], το οποίο εφαρμόζεται συχνά σε περιπτώσεις αστικών πάρκων, όπως παρουσιάζονται στην Ενότητα 3. Η διαδικασία επιλογής και εφαρμογής επιθυμητών ήχων λαμβάνει υπόψη της το χώρο και το πλαίσιο, καταγράφει τους στόχους (όχι σε dB), αναγνωρίζει τους ήχους που θα ικανοποιήσουν τους στόχους, οργανώνει το σχεδιασμό και το επίπεδο κάλυψης [10].

Οι μακροσκοπική μέθοδος σχεδιασμού περιλαμβάνει περιπάτους (soundwalks) σε αντιπροσωπευτικές ώρες της ημέρας, και μετρήσεις, ενώ οι μικροσκοπική κυρίως συνεντεύξεις με τους χρήστες ενός χώρου. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού οι τεχνητοί ήχοι είναι προτιμότερο να παράγονται μέσω μιας κατασκευής (όπως καθιστικά) παρά να διαχέονται στο χώρο.

Σε επίπεδο πολεοδομικό και με δεδομένα την ποιότητα ζωής, τη μείωση της έκθεσης στο θόρυβο και την αύξηση του δημόσιου χώρου στη γειτονιά, τα νέα κτίρια πρέπει να λειτουργούν ως φράγμα θορύβου, με όψεις που θα δεν θα ενισχύουν το φαινόμενο του τούνελ. Σε επίπεδο κάτοψης η χωροθέτηση των υγρών χώρων και της κουζίνας θα προβλέπεται στο θορυβώδες τμήμα του κτιρίου. Προτείνεται λοιπόν έμμεσα η δημιουργία εσωστρεφών οικοδομικών τετραγώνων, με εσωτερικές πλατείες και πάρκα που θα προσφέρουν ιδανικές συνθήκες για χαλάρωση και περισυλλογή. Παράλληλα, ο περιορισμός του αριθμού των κέντρων διασκέδασης σε μια περιοχή, η προώθηση της χρήσης ποδηλάτου, η δημιουργία

εναλλακτικών τρόπων μετακίνησης και υπόγειων διαδρομών και η αποφυγή χρήσης συμβατικών φραγμάτων ήχου είναι μερικά από τα μέτρα που θα συμβάλλουν στη μείωση των συνεπειών στην υγεία και στην αύξηση της ποιότητας ζωής.

3. Σχεδιασμός και εφαρμογή ηχοτοπίου στον αστικό χώρο

Τα παρακάτω παραδείγματα αφορούν σε σχεδιασμό αστικών πάρκων, παραλιακού μετώπου και υπαίθριου χώρου, όπου το ηχοτοπίο αποτέλεσε πρωταρχικό κομμάτι της μελέτης. Πρόκειται για περιπτώσεις όπου η τοπική αυτοδιοίκηση έκρινε απαραίτητη την αναβάθμιση της περιοχής με γνώμονα την εξάρθρωση της εγκληματικότητας, την ανάδειξη της πόλης για λόγους τουρισμού, την βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων ή την ανάδειξη μιας τέχνης.

3.1 'Nauener Platz– Remodelling for Young and Old', Βερολίνο

Η περίπτωση της συγκεκριμένης πλατείας είναι ιδιαίτερα σημαντική, λόγω της θέσης της και της τοπικής της σημασίας – χαρακτηριζόταν από εγκληματικότητα και χρήση ναρκωτικών – αλλά και του ότι αποτελεί ένα από τα λίγα παραδείγματα αστικού χώρου όπου το ηχοτοπίο διαμόρφωσε τον σχεδιασμό. Λόγω της εγγύτητας του δρόμου τυπικές μετρήσεις έδιναν από 75dBAleq έως 40dBA, ανάλογα της θέσης του δέκτη. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο χάρτης της πλατείας



Σχήμα 3.1 Χάρτης της περιοχής της Nauener Platz και φωτογραφία τμήματος της πλατείας με νησίδα ήχου-καθιστικό.

Η συνεργασία των αρμόδιων φορέων με την Dr Schulte-Fortkamp οδήγησε στην ένταξη στον σχεδιασμό 'νησίδων ήχου' ('audio islands'), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, καθιστικών όπου ηχεία εκπέμπουν ήχους παραλίας, πόλης και πουλιών στο αστικό περιβάλλον. Οι περίοικοι, οι οποίοι συμμετείχαν εν μέρει στο σχεδιασμό και στην επιλογή των ήχων μέσω συναντήσεων με τους αρμόδιους, χρησιμοποιούν και πάλι τον χώρο. Έχει παρατηρηθεί ότι λόγω και του gabian wall, ο οποίος δεν επιτρεπόταν να ξεπεράσει τα 1,35m, σε ύψος, έχει παρατηρηθεί μείωση του θορύβου κατά 3dB. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η ίδια η φύση αλλάζει το ηχοτοπίο

της πλατείας αφού, πιθανότατα λόγω του ήχου των πουλιών στις νησίδες, αληθινά πουλιά έχουν εμφανιστεί [11].

3.3 'Sea Organ, Zadar

Η ανάγκη για τη δημιουργία του 'Οργάνου της θάλασσας στο Zadar της Κροατίας προέκυψε όταν οι αρμόδιες αρχές αποφάσισαν να μεταθέσουν τον προβλήτα προσάραξης κρουαζιερόπλοιων, ώστε οι τουρίστες να έχουν άμεση πρόσβαση στο κέντρο της πόλης. Ο υπεύθυνος μελετητής, αρχιτέκτονας Nikola Bašić, διαμόρφωσε το παραλιακό μέτωπο για περίπατο και, κοντά στο σημείο προσάραξης, σχεδίασε ένα επίμηκες τμήμα της παραλίας με πέτρινα σκαλοπάτια, όπου ειδικές εγκοπές δημιούργησαν το πρώτο πνευστό όργανο της θάλασσας. Εκτείνεται σε μήκος 70m, και χωρίζεται σε 7 τμήματα των 35 σωλήνων, κατά τρόπο ώστε, ανάλογα με το μέγεθος και την ταχύτητα του κύματος να εκπέμπεται μια νότα και ο συνδυασμός τους να παράγει αρμονικούς ήχους [12]. Στην παρουσίαση θα προβληθεί video του οργάνου της θάλασσας. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει το σχεδιάγραμμα των συγχορδιών και φωτογραφία του.



Σχήμα 3.2 Κατασκευή, λεπτομέρειες των χορδών και της μουσικής νότας του 'Οργάνου της θάλασσας' και φωτογραφίες.

3.3 'Sonic Gardens, ΜιλάνοΙταλία

Οι κήποι του ήχου βρίσκονται στο Parco Sempione, στο μουσείο της Triennale του Μιλάνου. Σε συνεργασία με το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σχεδιασμού τοπίου του πολυτεχνείου Naba/Milano – καθηγητές Bianchessi και Mestriner – οι Architettura Sonora δημιούργησαν τον 'Μικρό αστικό κήπο του ήχου', ανοιχτό στο κοινό, με πολλαπλά ερεθίσματα και διδακτικές εμπειρίες, μέσω ειδικά

κατασκευασμένων διαδραστικών ηχητικών πηγών [12]. Η απήχηση στο κοινό ήταν μεγάλη, καθώς οι κάτοικοι επισκέπτονται καθημερινά τον κήπο και απολαμβάνουν ήχους που δεν συνηθίζεται να υπάρχουν πλέον στην πόλη. Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει φωτογραφίες του κήπου με τις ειδικά σχεδιασμένες πηγές ήχου.



Σχήμα 3.3 Εικόνες από το Urban Sonic Garden του Parco Sempione, Triennale Design Museum στο Μιλάνο

3.4 'Peace Camp', Ηνωμένο Βασίλειο

Η συγκεκριμένη εγκατάσταση οργανώθηκε τον Ιούλιο του 2012 στα πλαίσια των Ολυμπιακών αγώνων του Λονδίνου. Η σκηνοθέτης Deborah Warner κλήθηκε να δημιουργήσει μια παράκτια εγκατάσταση που θα κυκλώνει το Ηνωμένο Βασίλειο, σε συνεργασία με την ηθοποιό Fiona Shaw. Οκτώ λαμπερές κατασκηνώσεις που παράγουν ψιθύρους εμφανίστηκαν ταυτόχρονα σε διαφορετικές παράκτιες περιοχές. Σχεδιασμένες να είναι επισκέψιμες από το σούρουπο στην αυγή, οι 'Κατασκηνώσεις της Ειρήνης' αποτελούν εξερεύνηση της ερωτικής ποίησης και εορτασμό της ομορφιάς της ακτής. Το Σχήμα 3.4 απεικονίζει μια από τις περιοχές μελέτης, καθώς και φωτογραφία της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.4 Περιοχή μελέτης και εγκατάστασης ενός από τα οκτώ Peace Camps, καθώς και φωτογραφία των σκηνών.

Κατά μήκος των εγκαταστάσεων παράγονται ήχοι και ποιήματα γνωστά στους Βρετανούς, τα οποία είναι δυνατό να ακουστούν σε απευθείας σύνδεση σε εικονικό περιβάλλον. Οι χρήστες του συστήματος μπορούν να ηχογραφήσουν το αγαπημένο

τους ερωτικό ποίημα και να τα υποβάλλουν μαζί με μηνύματα τους, δημιουργώντας ένα ανθολόγιο που γιορτάζει τις γλώσσες, διαλέκτους και προφορές, καθώς και την ποιητική παράδοση.

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε το ηχοτοπίο ως παράμετρος σχεδιασμού του αστικού χώρου. Η διαφοροποίηση του από το θόρυβο, βασικές αρχές της έρευνας του, οι σχεδιαστικές αρχές για την βελτίωση του και τα παραδείγματα εφαρμογής του επισημαίνουν τη δυνατότητα επέμβασης, τόσο σε επίπεδο νομοθεσίας όσο και σχεδιασμού, για την βελτίωση της ποιότητας ζωής σε μεγάλα αστικά κέντρα.

5. Αναφορές

[1] Truax B. ed. *Handbook of acoustic ecology* World Soundscape Project, Simon Fraser University and ARC Publications (1978)

[2] Schaffer M. *The Tuning of the world* Knopf, New York (1977)

[3] Schaffer M. «I have never seen a sound» in Proc. Twelfth International Congress on Sound and Vibration - ICSV12 (2005)

[4] Hellstrom, B. *Noise Design, Architectural Modeling and the Aesthetics of Urban Acoustic Space* Doct. Thesis, School of Architecture, Royal Institute of Technology, KTM, Bo Ejeby Forlag, Sweden (2003)

[5] Kang, J. *Urban Sound Environment* Taylor & Francis, London (2007)

[6] Yang, W. and Kang, J. «Acoustic Comfort Evaluation in Urban Open Public Spaces» Applied Acoustics, 66, 17-18 (2005)

[7] Brown, A. L. «The Outdoor Acoustic Environment as Resource, and Masking, as Key Concepts in Soundscape Discourse, Analysis and Design» in *Proc. EURONOISE 2009* (2009)

[8] Rådsten-Ekman, M. «Soundscape and Moving Water» in Proc. International Conference on Soundscape and Urban Planning: Designing Soundscape for Sustainable Urban Development (2010)

[9] Westerkamp H. «Soundwalking» Sound Heritage, 3(4) (1974)

[10] Brown A.L. and Muhar A. «An approach to the Acoustic design of outdoor space» Journal of Environmental Planning and Management, 47(6) 827-842 (2004)

[11] Schulte-Fortkamp B. «The Nauener Platz Soundscape Project, Berlin» in International Conference on Soundscape and Urban Planning: Designing Soundscape for Sustainable Urban Development (2010)

[12] Stamać I. «Acoustical and musical solution to wave – driven sea organ in Zadar» in 2nd Congress of Alps-Adria Acoustics Association and 1st Congress of Acoustical Society of Croatia (2005)

[13] Licitra G. «Italian Sonic Gardens» in International Conference on Soundscape and Urban Planning: Designing Soundscape for Sustainable Urban Development (2010)

[14] http://www.peacecamp2012.com/about.aspx

Πλαίσιο για την δημιουργία ενός επιτόπιου πειραματικού ηχομουσείου

Αιμιλία Καραποστόλη
Υποψ. διδάκτορας
αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ. /
Λευκωσίας 18, Θεσ/νικη
emiliearch@gmail.com

Αθανασία Δ. Κυριακίδου
Υποψ. διδάκτορας
μουσικών Σπ. Α.Π.Θ./
Θεμ. Σοφούλη 86, Θεσ/νίκη
thania@mus.auth.gr

Νίκος Τσινίκας
Καθηγητής
αρχιτεκτόνων Α.Π.Θ./
Θεσ/νίκη
tsinikas@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σύγχρονη έρευνα στα πεδία της ακουστικής οικολογίας έχει επισημάνει την οικολογική και πολιτιστική αξία των ηχοτοπίων καθώς και την αναγκαιότητα για τη διαχείριση και τη διατήρησή τους. Παίρνοντας ως δεδομένα τα παραπάνω, προτείνουμε ένα νέο τρόπο διαχείρισης των ηχοτοπίων, δηλαδή τη δημιουργία ενός μουσείου όπου διατηρεί, ερευνά, διαχειρίζεται και πειραματίζεται με ένα συγκεκριμένο ηχοτοπίο, και που επικοινωνεί και παρουσιάζει την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου δυναμικού συστήματος για λόγους μελέτης, εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας.

Functional framework for an in site experimental soundmuseum

ABSTRACT

The ongoing research in the fields of acoustic ecology has highlighted the ecological and cultural value of soundscapes and the need to manage, protect and preserve them. Taking as given the above, we propose a new way of managing soundscapes, ie the creation of a museum which preserves a particular soundscape and therefore researches on and experiments with it, and at the same time communicates and exhibits the complexity of such a dynamic system for purposes of study, education and enjoyment .

Εισαγωγή

Αν περιηγηθείτε στο AppStore της Apple [1] θα παρατηρήσετε το εξής φαινόμενο, στις πρώτες θέσεις της κατηγορίας “υγεία και ευεξία”, βρίσκονται εφαρμογές οι οποίες έχουν να κάνουν με την αναπαραγωγή λευκού θορύβου και τη δημιουργία φυσικών αλλά και τεχνιτών ηχοτοπίων. Η αναπαραγωγή αυτών των συνθέσεων, σύμφωνα με τους κατασκευαστές, θεωρείται κατάλληλη για την δημιουργία μιας ήρεμης ατμόσφαιρας για το νυχτερινό ύπνο και την εξουδετέρωση των ανεπιθύμητων θορύβων του υπάρχοντος ηχητικού περιβάλλοντος. Η βάση δεδομένων της εφαρμογής περιλαμβάνει ηχογραφήσεις πεδίου από δάση, ωκεανούς,

βόμβους διάφορων ηλεκτρικών συσκευών, λευκό θόρυβο και γενικότερα μεμονωμένους ήχους αλλά και ηχοτοπία που θεωρούνται ευρέως αποδεκτά και φιλικά προς τον ακροατή - χρήστη. Μήπως η ανάγκη για την δημιουργία αυτών των ηχοτοπίων και η ευρεία χρήση τους σηματοδοτούν την αρχή μιας νέας εποχής για την ακουστική οικολογία; Μήπως η ευρεία ανάγκη για καλύτερη ποιότητα ηχητικού περιβάλλοντος, η προσπάθεια ανασύστασης και ακοής φυσικών ηχοτοπίων αποτελεί την έναρξη για τη διατήρηση και την αξιοποίηση τους αλλά και την συχνότερη επαφή των ίδιων των ανθρώπων με αυτά;

Εισερχόμενοι στην επιστημονική κοινότητα, αντιλαμβανόμαστε πως η σύγχρονη έρευνα στα πεδία της ακουστικής οικολογίας επισημαίνει συνεχώς την οικολογική και πολιτιστική αξία των ηχοτοπίων και φέρνει στην πρώτη γραμμή την αναγκαιότητα για τη διαχείριση και τη διατήρησή τους [2]. Παράλληλα, η συνεχής υποβάθμιση του ελληνικού αστικού ηχητικού περιβάλλοντος εντείνει όλο και περισσότερο την ανθρώπινη ακουστική αντίληψη, καθιστώντας την εμπειρία του φυσικού περιβάλλοντος μέσα στην πόλη προβληματική και την ανάγκη για "ear cleaning" [3] καίρια.

Στο τελευταίο συνέδριο της ακουστικής οικολογίας "The global composition" που πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2012, ο Murray Schafer αναρωτιέται πως αν οι ήχοι του παρόντος θα είναι σύντομα ήχοι του παρελθόντος, δεν θα έπρεπε να υπάρχει ένα μουσείο για τους ήχους που έχουν εξαλειφθεί [4];

Σύμφωνα με τον ορισμό του ICOM, (διεθνές συμβούλιο των μουσείων), ένα μουσείο είναι ένα μόνιμο ίδρυμα, μη κερδοσκοπικό, στην υπηρεσία της κοινωνίας και της ανάπτυξής της, ανοιχτό σε όλο το κοινό, το οποίο αποκτά, διατηρεί, ερευνά, επικοινωνεί και εκθέτει για λόγους μελέτης, εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας, υλικά και άυλα τεκμήρια των ανθρώπων και του περιβάλλοντός τους [5].

Σε αυτό το άρθρο, προτείνουμε έναν ακόμα τρόπο διαχείρισης και αξιοποίησης των ηχοτοπίων, δηλαδή τη δημιουργία ενός μουσείου όπου διατηρεί, ερευνά, διαχειρίζεται και πειραματίζεται με ένα συγκεκριμένο ηχοτοπίο, και που επικοινωνεί και παρουσιάζει την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου δυναμικού συστήματος για λόγους μελέτης, εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας.

1. Θεωρητικό υπόβαθρο του ηχομουσείου

Οι συνεχείς μελέτες και οι επιτόπιοι ηχητικοί πειραματισμοί στον τομέα της ακουστικής αρχαιολογίας [6], η ανάπτυξη της ακουστικής οικολογίας και η εισαγωγή της οικολογίας των ηχοτοπίων [7], η αναγκαιότητα για τη διατήρηση των ηχοτοπίων από τη συνεχή ανθρωπογενή παρέμβαση [8], αλλά και το έντονο ενδιαφέρον που συγκεντρώνουν νέες μορφές τέχνης όπως η ηχητική τέχνη [9] καθιστούν την δημιουργία ενός τέτοιου μουσείου τόσο απαραίτητη όσο και αναγκαία.

Οι προηγούμενοι επιστημονικοί τομείς αλλά και οι καλλιτεχνικές τάσεις δίνουν μεγάλη βαρύτητα στην σχέση του ηχοτοπίου με τη φυσική παρουσία του τοπίου. Η ταυτότητα ενός τόπου, η πολιτιστική του σημασία, οι τρόποι αντίληψής του αλλά και η δυναμική σχέση του ηχοτοπίου με το ίδιο το τοπίο, μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως για να βιώσει ο επισκέπτης ένα ηχοτοπίο οφείλει να έρθει σε επαφή με τον ίδιο τον τόπο. Οπότε για να εξασφαλιστεί αυτή η δυναμική σχέση, το νέο ηχομουσείο οφείλει να είναι επιτόπιο, δηλαδή να προσαρμόζεται στο κάθε τόπο

ο οποίος δημιουργεί (ή που δημιουργούσε στο παρελθόν) το ηχοτοπίο που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης και έκθεσης του.

Το ηχομουσείο είναι πειραματικό γιατί ως στόχο του έχει να έρθει σε διάλογο με το υπάρχον ηχοτοπίο, να ερευνήσει και να πειραματιστεί με νέα τεχνητά ηχοτοπία και να φέρει τους επαγγελματίες του ήχου (μουσικούς, μηχανικούς, κ.ο.κ.) σε συνεργασία ώστε να δώσει νέα ώθηση στην επιστημονική έρευνα και να διευρύνει τις δυνατότητες της καλλιτεχνικής έκφρασης.

Το προτεινόμενο μουσείο ονομάζεται ηχομουσείο γιατί τα βασικά άυλα τεκμήρια των ανθρώπων και του περιβάλλοντός που διατηρεί, ερευνά, επικοινωνεί και εκθέτει είναι ηχητικά. Έχοντας ως απώτερο στόχο να παρουσιάσει την πολυπλοκότητα και τη δυναμικότητα ενός συγκεκριμένου ηχοτοπίου για λόγους μελέτης, εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας.

1.1 Σκοπός

Σκοπός ενός ηχομουσείου είναι να μπορέσει να επικοινωνήσει σε τρία διαφορετικά επίπεδα: α) ήχοι, δηλαδή διατήρηση ηχητικών δεδομένων (bio, geo, anthro [10]) και πειραματισμός με νέες ηχητικές εγκαταστάσεις και μουσικές συνθέσεις, β) αρχιτεκτονική - ακουστική, δηλαδή προσαρμογή και πειραματισμός με τον αντίστοιχο γεωμετρικό χώρο και τοπίο, και γ) ακουστική εκπαίδευση, καλλιέργεια της ακουστικής αντίληψης των επισκεπτών του και εκπαίδευση σε θέματα ήχου.

Το πρώτο επίπεδο που θέλει να αναδείξει το ηχομουσείο είναι οι ίδιοι οι ήχοι. Ένα τμήμα αποτελούν οι ήχοι που ήδη υφίστανται σε συγκεκριμένες περιοχές και έχουν να κάνουν με το φυσικό τους ηχοτοπίο. Σκοπός του μουσείου είναι η ανάλυση αυτών των ήχων, η γνώση του τρόπου παραγωγής τους και η διατήρηση τους όπως και η διατήρηση του ίδιου του οικοσυστήματος με τρόπους αντίστοιχους με αυτούς της επιστήμη της οικολογίας [11]. Ένα άλλο τμήμα αποτελούν οι ήχοι τους οποίους μπορούν να παράξουν οι επαγγελματίες του ήχου για να πειραματιστούν, να μελετήσουν, να δημιουργήσουν ακόμα και να ανασυστήσουν χαμένα ηχοτοπία.

Το δεύτερο επίπεδο που θέλει να επικοινωνήσει το μουσείο είναι η σχέση του ηχοτοπίου με τη φυσική παρουσία του τοπίου, είτε αυτό είναι τελείως φυσικό ή τεχνητό, είτε είναι δομημένο ή αδόμητο περιβάλλον. Ο ήχος εκφράζει τον γεωμετρικό χώρο στον οποίο δημιουργείται και επιπλέον ο τόπος και η ιστορική στιγμή διαμορφώνουν το ηχοτοπίο και διαμορφώνονται από αυτό. Σκοπός του ηχομουσείου είναι να αναδείξει αυτή τη σχέση και να την αξιοποιήσει αναλόγως.

Το τρίτο επίπεδο έχει να κάνει με τον εκπαιδευτικό ρόλο του ηχομουσείου και συγκεκριμένα με την "ακουστική εκπαίδευση" [12] των επισκεπτών του. Για να επιτευχθεί η ανάγνωση των δύο προηγουμένων επιπέδων από τους επισκέπτες του, το μουσείο οφείλει να καλλιεργήσει την ικανότητα της ενεργητικής ακοής και την μετέπειτα επεξεργασία των παραπάνω ηχητικών τεκμηρίων σε διαφορετικά πλαίσια.

1.2 Καινοτομία

Η καινοτομία του προτεινόμενου ηχομουσείου έγκειται στο διαφορετικό τρόπο διαχείρισης των άυλων, σε αυτή τη περίπτωση, ηχητικών τεκμηρίων του ανθρώπου

και του περιβάλλοντος του, αλλά και της εναλλακτικής φυσικής παρουσίας του ίδιου του μουσείου. Το νέο αυτό μουσείο έρχεται σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μουσεία όπως μουσικών οργάνων και ειδών μουσικής ως προς την ιδεολογία και την αρχιτεκτονική του, και αποτελεί ένα συνδυασμό επιτόπιου, ανοιχτού (open air) μουσείου και μουσείου σύγχρονης τέχνης.

Η επιλογή της δημιουργίας ενός ανοιχτού μουσείου με χρήση μη μόνιμων κατασκευών [13] βασίζεται, κυρίως, στην ανάδειξη και διατήρηση του ήδη υπάρχοντος ηχοτοπίου και φιλοδοξεί να παρέχει συνεχή διάδραση μεταξύ αρχιτεκτονικής και τέχνης στο χώρο πέρα από το κλασσικό πλαίσιο αρχιτεκτονικής ενός μουσείου, διατηρώντας το ηχοτοπίο, ως εγγενές δομικό του στοιχείο [14].

1.3 Βασικές αρχές

Το προτεινόμενο πλαίσιο για τη δημιουργία ενός πειραματικού ηχομουσείου θα εντάξει τις αξίες και τις μεθοδολογίες της ακουστικής οικολογίας (ελληνικά ηχοτοπία, ηχοδιαδρομές, soundwalks), τις αρχές της νέας οικολογίας των ηχοτοπίων, τις τεχνικές και τη μεθοδολογία της ακουστικής αρχαιολογίας, αλλά προπαντός θα χρησιμοποιήσει την ηχητική τέχνη και τη σύγχρονη μουσική σύνθεση για να πειραματιστεί, να ερευνήσει και να εκπαιδεύσει τους επισκέπτες του.

Με τη βοήθεια των τεχνικών της ακουστικής οικολογίας που μελετούν και καταγράφουν τα ηχοτοπία θα σχεδιαστούν αρχικά, ηχοδιαδρομές για τους επισκέπτες, βασισμένες στα ελληνικά ηχοτοπία. Οι ηχοδιαδρομές θα αποτελέσουν τον κύριο ενεργητικό τρόπο δράσης των επισκεπτών στο ηχομουσείο, όπου τους ενθαρρύνει να αξιολογήσουν το ηχοτοπίο, τη σχέση του ηχοτοπίου με το φυσικό ή τεχνητό περιβάλλον και να αντιπαραβάλλουν τα ηχοτοπία που βιώνουν στην καθημερινότητά τους [15].

Το πλαίσιο που προτείνεται, ελέγχεται με το σχεδιασμό ενός πίνακα με πραγματικά παραδείγματα και συγκεκριμένες προτάσεις [16]. Ενδεικτικά δίνονται πληροφορίες για το που μπορεί να πραγματοποιηθεί το πειραματικό ηχομουσείο, με κύριο στόχο να κατηγοριοποιηθούν χώροι ως προς τις αντίστοιχες αξίες, απειλές και τους στόχους τους. Επιπλέον θα ταξινομηθούν οι ήχοι και τα ηχοτοπία που δύναται να χρησιμοποιηθούν ως άυλα τεκμήρια της συλλογής του ηχομουσείου και κατ' επέκταση θα παρουσιαστεί ο τρόπος που μπορούν τα παραπάνω να διατηρηθούν, να ερμηνευτούν και να παρουσιαστούν για λόγους μελέτης, εκπαίδευσης και ψυχαγωγίας.

1.4 Ενδεικτικά παραδείγματα από τον πίνακα ταξινόμησης ελληνικών ηχοτοπίων και τις βασικές αρχές του

Τύπος ηχοτοπίου	Παράδειγμα	Αξία	Απειλές	Στόχοι
φυσικά - ήσυχα ηχοτοπία	δασικές περιοχές εκτός πόλης	εμπειρία διάδρασης με το ηχητικό περιβάλλον	ανθρώπινη παρέμβαση στο χώρο (π.χ. θόρυβος, φωνές)	προστασία του βιότοπου και του ήχων από την ανθρώπινη παρέμβαση

αναδημιουργία ηχοτοπίων	αρχαιολογικοί χώροι – εγκαταλελειμμένα χωριά	σύνδεση ανθρώπων με τόπους (παλιαότεροι τρόποι χρήσεις του χώρου)	ανθρώπινη παρέμβαση / ανακατασκευή φυσικού ηχοτοπίου	προστασία του χώρου από κακή ανακατασκευή /ασυμβατότητα χώρου και ήχων

2. Λειτουργία

Το νέο μουσείο οφείλει να διατηρεί και να μελετά το υπάρχον ηχοτοπίο ώστε να κληροδοτήσει στις επόμενες γενιές μια λεπτομερή τεκμηρίωση του ηχητικού περιβάλλοντος του παρόντος και του παρελθόντος. Η θεωρητική μελέτη σε συνδυασμό με την εμπειρική έρευνα και με τη δεδομένη συμμετοχή των επισκεπτών του μουσείου δημιουργεί μια βάση δεδομένων που τροφοδοτείται συνεχώς.

Η βιωσιμότητα ενός ηχομουσείου και η μετέπειτα λειτουργία του βασίζονται στις χαμηλές οικονομικές απαιτήσεις για τη δημιουργία του και στις μειωμένες ανάγκες για την συντήρηση του. Η χρήση υπαρχόντων ηχοτοπίων παρέχει την βασική συλλογή του μουσείου και η εναλλακτική φυσική του παρουσία, που βασίζεται σε ήπιες αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις, εξασφαλίζει τις αρχές ενός μη κερδοσκοπικού φορέα.

3. Διεπιστημονικότητα και πρακτική εφαρμογή

Το προτεινόμενο πλαίσιο φιλοδοξεί να προάγει την διεπιστημονικότητα ως προς την μελέτη, διαχείριση των ηχοτοπίων καθώς και την εκπαίδευση του κοινού σε θέματα ήχου. Απευθύνεται σε ερευνητές πολλών διαφορετικών πεδίων και ως σκοπό έχει να χρησιμοποιηθεί και να συνδυαστεί με επιτόπια πειραματική έρευνα.

4. Αναφορές

[1] Επίσημος διαδικτυακός τόπος της εταιρίας Apple (on line): http://store.apple.com (επίσκεψη 10 Αυγούστου 2012).

[2] Sarah L. Dumyahn & Bryan C. Pijanowski, «Soundscape conservation» στο συνέδριο *Landscape Ecology*, εκδόσεις Springer Science+Business Media, σελ. 1327-1344, 2011.

[3] R. Murray Schafer, *The Soundscape. Our sonic environment and the tuning of the world*, εκδόσεις Destiny books, Vermont (1977, 1994), σελ. 208-211.

[4] R. Murray Schafer, «Soundscape studies: the early days and the future» στο συνέδριο *the global composition. Conference on Sound, Media and the Environment*, εκδόσεις Hoschschule Darmstadt/Germany, σελ 50, 2012.

[5] Επίσημος διαδικτυακός τόπος του ICOM (International Council Of Museums) επίσημος ορισμός του μουσείου σύμφωνα με το 21ο Γενικό Συνέδριο Vienna, Austria το 2007 (on line): http://icom.museum/the-vision/museum-definition (επίσκεψη 12 Αυγούστου 2012).

[6] Ενδεικτικά αναφέρουμε τον διαδικτυακό τόπο για το project LANDSCAPE - PERCEPTION, μια διεπιστημονική έρευνα σε προϊστορικούς οικισμούς του Ηνωμένου Βασιλείου που πραγματοποιείται από αρχαιολόγους, νευροφυσιολόγος, ακουστικούς και καλλιτέχνες με σκοπό την μελέτη του τρόπου αντίληψης του τοπίου μεσώ των αισθήσεων (on line): http://www.landscape-perception.com (επίσκεψη 12 Αυγούστου 2012)

[7] Bryan C. Pijanowski, Almo Farina, Stuart H.Gage, Sarah L. Dumyahn & Bernie L. Krause, «What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science» στο συνέδριο *Landscape Ecology*, εκδόσεις Springer Science+Business Media, σελ. 1213-1232, 2011.

[8] Bernie Krause, *The Great Animal Orchestra. Finding the origins of music in the world's wild places*, εκδόσεις Little, Brown and Company, New York, 2012. Ενδεικτικά αναφέρουμε το παράδειγμα που αφορά την επιλεκτική υλοτομία στο Lincoln Meadow το 1988 και το 1989 σελ. 68-71.

[9] Allan Licht, *Sound Art. Beyond music, between categories*, εκδόσεις Rizzoli International Publications Inc., New York, 2007. Διάφορες ερμηνείες του ορισμού ηχητική τέχνη στις σελ. 9-14. Επιπλέον αναφέρουμε την πρόσκληση υποβολής άρθρων από το περιοδικό Leonardo Music Journal για μια πιο κριτική ματιά στον όρο sound art (on line): http://www.leonardo.info/lmj/lmj23call.html (επίσκεψη 12 Αυγούστου 2012).

[10] Bernie L. Krause, «Bioacoustics, Habitat ambience in ecological balance», Whole Earth Review, **Rev.57,** σελ.14-18, 1987. All of the sounds [bio = biological (biophony), geo = geophysical (geophony), anthro = human-produced (anthrophony)] present in an environment at a given time, soundscape as a finite resource - competing for spectral space (niche hypothesis).

[11] Bryan C. Pijanowski, Luis J. Villanueva-Rivera, Sarah L. Dumyahn, Almo Farina, Bernie L. Krause, Brian M. Napoletano, Stuart H. Gage & Nadia Pieretti, «Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape», Bioscience, vol.**61,** No.3, Μάρτιος 2011. bio = biological (biophony), geo = geophysical (geophony), και anthro = human-produced (anthrophony) (on line): http://www.jstor.org/stable/10.1525/bio.2011.61.3.6 (επίσκεψη 12 Αύγουστου 2012).

[12] Olli-Taavetti Kankkunen, «The acoustic communication and listening education» στο συνέδριο *the global composition. Conference on Sound, Media and the Environment*, εκδόσεις Hoschschule Darmstadt/Germany, σελ 221-232, 2012.

[13] Νίκος Π. Τσινίκας, *Αρχιτεκτονική ενάντια στη Βαρύτητα*, εκδόσεις University Studio Press, ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής σελ. 35-86, 2001.

[14] Victoria Newhouse, *Towards a new museum*, εκδόσεις The Monacelli Press, expanded edition, σελ. 222-223, 2006.

[15] M.Adams, N.Bruce, W.Davies, R.Cain, P.Jennings, A.Carlyle, P.Cusack, K. Hume & C.Plack, «Soundwalking as methodology for understanding soundscapes», *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol. 30, Pt.2, 2008. (on line): http://usir.salford.ac.uk/2461/1/Adams_etal_2008_Soundwalking_as_Methodology.pdf (επίσκεψη 24 Σεπτεμβρίου 2012).

[16] Sarah L. Dumyahn & Bryan C. Pijanowski, «Soundscape conservation» στο συνέδριο *Landscape Ecology*, εκδόσεις Springer Science+Business Media, σελ. 1335-1336, 2011.

Καταγραφή του ήχου ψαριών σε μικρά ενυδρεία και τα χαρακτηριστικά του ήχου σε σχέση με τον μηχανισμό παραγωγής του.

[1]Τριπολιτάκη Ζαμπία, [1]Δασκαλάκη Νικολία, [1]Κουζούπης Σπύρος και [2]Παπαδάκης Παναγιώτης

[1]ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής
[2]Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
{zambiat@yahoo.com, nikh_d@hotmail.com, skouzo@staff.teicrete.gr, panos@iacm.forth.gr}

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρκετά είδη ψαριών παράγουν ήχους με διάφορους μηχανισμούς. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τα δόντια, τον φάρυγγα, τα πτερύγια και τη νηκτική κύστη. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι να ηχογραφηθούν σε μικρά ενυδρεία οι ήχοι από μερικά είδη ψαριών γλυκού και αλμυρού νερού, να μελετηθεί θεωρητικά η ακουστική των μικρών ενυδρείων και να αναφερθούν τα προβλήματα που ανακύπτουν κατά την ηχογράφηση. Σχολιάζονται επίσης φασματικές αναλύσεις των ήχων που καταγράφηκαν σε σχέση με τον μηχανισμό παραγωγής τους. Ειδικότερη αναφορά γίνεται στο είδος Pimelodus Pictus.

Fish sounds recording in small tanks and the characteristics of sounds in relation to the production mechanism.

ABSTRACT

Several species of fish produce sounds using different mechanisms. They are using their teeth, pharynx, fins and swimbladder. The main aim of this work is to record the sounds of some freshwater and saltwater fish species in small tanks, analyze their sounds, enlist some aspects of the acoustics in small tanks and state the problems encountered when recordings are made in small tanks. Spectral analyses of recorded sounds are also presented which in each case reveal the most probable mechanism involved in the sound production. Special reference is made to the species: Pimelodus Pictus.

1. Εισαγωγή

Πολλά ψάρια δεν έχουν μόνο την ικανότητα να ακούνε αλλά και να διαχωρίζουν τα σήματα μεταξύ τους, καθώς και να προσδιορίζουν την κατεύθυνση της ηχητικής πηγής, [1]. Ο ήχος που παράγουν τα ψάρια αποτελείται από χαμηλής συχνότητας παλμούς, οι οποίοι ποικίλουν σε διάρκεια, αριθμό και ρυθμό επανάληψης. Οι περισσότεροι ήχοι, που παράγουν τα ψάρια έχουν χαμηλό πλάτος, μικρή διαμόρφωση συχνότητας και συγκριτικά με άλλα είδη περιορισμένο ακουστικό ρεπερτόριο, λόγω των φυσικών περιορισμών της παραγωγής του ήχου στο νερό. Οι βασικές διαφορές στους ήχους που παράγουν τα ψάρια σχετίζονται με τις διαφορές στον υποκείμενο μηχανισμό παραγωγής τους. Διαφορές υπάρχουν μεταξύ των ειδών της ίδιας οικογένειας (ενδοοικογενειακές διαφορές) αλλά ακόμα και εντός του ίδιου είδους (ενδοειδείς διαφορές), [2].

Υπάρχουν τέσσερις γενικές κατηγορίες ήχων, οι οποίες μπορούν να παραχθούν από τα ψάρια. Οι συριστικοί ήχοι, οι παραγόμενοι μέσω δονήσεων της νηκτικής κύστης (κρουστικοί), οι υδροδυναμικοί και οι ήχοι σπηλαίωσης. Σχεδόν όλα τα ψάρια παράγουν συριστικούς ήχους, οι οποίοι εκπέμπονται από το τρίψιμο των δοντιών, τα οστά του κρανίου, τον μηχανισμό της γνάθου, το βραγχιακό μηχανισμό, τα ακτινοπτερύγια και τους σπονδύλους. Οι συριστικοί ήχοι είναι μη αρμονικά σήματα με ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από αρκετές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες Hertz.

Ο κρουστικός μηχανισμός παραγωγής ήχου αποτελείται στην πραγματικότητα από ένα σύμπλεγμα, που περιλαμβάνει τους ηχητικούς μύες και τη νηκτική κύστη. Η σύσπαση και η χαλάρωση των ηχητικών μυών οδηγεί σε γρήγορες αλλαγές του όγκου της νηκτικής κύστης, δηλαδή, στους κραδασμούς των τοιχωμάτων της, που προκαλούν την παραγωγή του ήχου, [3]. Οι ήχοι από τον συνδυασμό ηχητικών μυών - νηκτικής κύστης, διαφέρουν από άλλους ήχους των ψαριών επειδή μπορούν να είναι τονικοί. Οι κρουστικοί ήχοι έχουν βασική συχνότητα που φτάνει συνήθως ως τα 300 Hz και μπορεί να συνοδεύεται από αρκετές αρμονικές. Οι συχνότητες των αρμονικών, τις περισσότερες φορές, δεν υπερβαίνουν τα 500-800 Hz και διαρκούν από μερικές δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms).

Οι υδροδυναμικοί ήχοι παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της κολύμβησης των ψαριών. Στους υδροδυναμικούς ήχους η ένταση αυξάνεται στις απότομες επιταχύνσεις των ψαριών ή όταν το ψάρι αλλάζει ξαφνικά κατεύθυνση. Τα χαρακτηριστικά του πλάτους και της συχνότητας των υδροδυναμικών ήχων εξαρτώνται από το σχήμα του σώματος των ψαριών, την ταχύτητα και την τροχιά της κίνησής τους.

Οι ήχοι από τον μηχανισμό σπηλαίωσης παράγονται κατά τη διάρκεια της σίτισης των ψαριών, καθώς προκαλείται αρνητική πίεση στο εσωτερικό του στόματος από το απότομο άνοιγμα κατά την αρπαγή (αναρρόφηση) του θηράματος. Μια απότομη πτώση της πίεσης στο εσωτερικό της στοματικής κοιλότητας μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση μικρών φυσαλίδων σπηλαίωσης. Όταν μειώνεται ο όγκος τους σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα παράγεται ένας ηχητικός παλμός, [4].

2. Θεωρητική προσέγγιση της ακουστικής σε μικρά ενυδρεία

Το σχήμα των περισσοτέρων ενυδρείων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ηχογραφήσεις ήταν ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με την μία διάσταση αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες. Στις περιπτώσεις όπου τα τοιχώματα του ενυδρείου είναι λεπτά από ελαφρύ σχετικά υλικό πχ. γυαλί ή κάποιο είδος πλαστικού τότε αποδεικνύεται πειραματικά αλλά και θεωρητικά ότι οι επιφάνειες του ενυδρείου συμπεριφέρονται ως ελεύθερες, [5,6].

Επειδή το ενυδρείο που χρησιμοποιήθηκε στα περισσότερα πειράματα ήταν ένα πλαστικό ενυδρείο του οποίου η κάτω επιφάνεια ακουμπούσε στο δάπεδο, τότε είναι πιο λογικό να θεωρήσουμε διαφορετική συνοριακή συνθήκη μόνο για την επιφάνεια αυτή και να μελετήσουμε τι διαφορές υπάρχουν σε σχέση με την περίπτωση των ελεύθερων τοιχωμάτων. Θεωρούμε ως σκληρή την επιφάνεια του πυθμένα δηλαδή η πίεση δεν μπορεί να μηδενίζεται πάνω σε αυτή. Προκύπτουν τότε αρκετά διαφορετικές τιμές για τις ιδιοσυχνότητες συντονισμού του ενυδρείου (σε σχέση με την περίπτωση όπου όλες οι επιφάνειες είναι ελεύθερες). Οι συχνότητες συντονισμού σε αυτή την περίπτωση θα δίνονται από τη σχέση,

$$f_{lmn} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{2n+1}{2L_z}\right)^2} \tag{2.1}$$

όπου *c=1500 m/sec,* η ταχύτητα του ήχου στο νερό, L_x, L_y, L_z, οι διαστάσεις του ενυδρείου σε μέτρα, *l, m, = 1,2,3….* και *n = 0,1,2,3…* Η ελάχιστη συχνότητα συντονισμού στην παραπάνω σχέση αντιστοιχεί στις τιμές *(l,m,n)=(1,1,0)*.
Η συχνότητα αποκοπής για ορθογώνια ενυδρεία (με τις συνοριακές συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω), δίνεται από τη σχέση:

$$f_{cutoff} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{1}{2L_z}\right)^2} \tag{2.2}$$

Τα περισσότερα ενυδρεία είναι συνήθως μακρόστενα οπότε τείνουν να συμπεριφέρονται ως κυματοδηγοί. Αν θεωρήσουμε το ενυδρείο ως ένα κυματοδηγό, τότε ο ήχος θα εξασθενεί αρκετά, όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή. Ορίζουμε σαν απόσταση εξασθένησης (attenuation distance), [6], την απόσταση για την οποία έχουμε 20 dB μείωση στον ήχο. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από τη συχνότητα. Εάν η συχνότητα είναι μικρότερη από τη συχνότητα αποκοπής τότε οι κυματαριθμοί που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιορυθμό στον κυματοδηγό θα είναι μιγαδικοί αριθμοί και θα έχουμε εκθετική μείωση του πλάτους κατά τη διάδοση κάθε ιδιορυθμού. Την λιγότερη μείωση θα έχει ο $1^{ος}$ ιδιορυθμός. Εάν θεωρήσουμε μόνο αυτόν, τότε η ακουστική πίεση θα έχει τη μορφή,

$$p(x,y,z,t) \propto 10^{-x/2D}\sin\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)\pi z}{2L_z}\right)e^{-i\omega t} \tag{2.3}$$

όπου *m = 1,2,3…, n = 0,1,2,3…* και η απόσταση εξασθένησης *D(f)*, θα ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

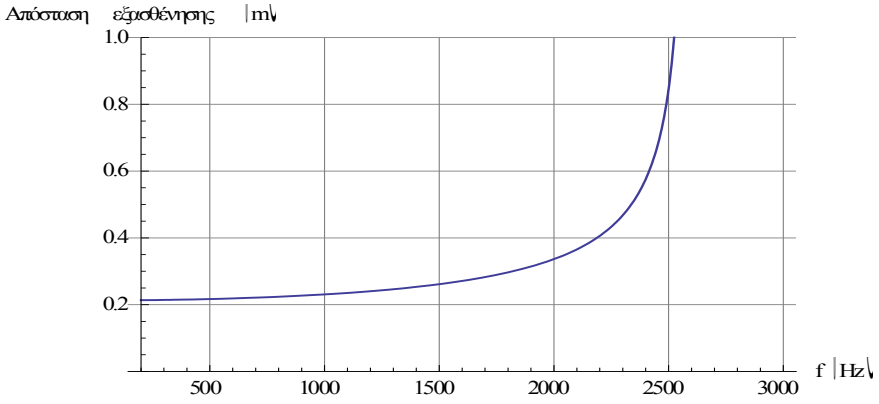
$$D(f) = \frac{1}{2\pi f_{cutoff}} \frac{c \ \ln(10)}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cutoff}}\right)^2}} \tag{2.4}$$

Οι συχνότητες αποκοπής και οι χαμηλότερες συχνότητες συντονισμού για το ίδιο ενυδρείο αλλά για διάφορες στάθμες νερού συνοψίζονται για τις δύο περιπτώσεις όπου έχουμε διαφορετικές συνοριακές συνθήκες στον Πίνακα 2.1. Το μήκος L_x και το πλάτος L_y του ενυδρείου είναι 1.14 και 0.35 m αντίστοιχα. Το L_z αντιστοιχεί στο ύψος (βάθος) του νερού.

Πίνακας 2.1: Οι συχνότητες αποκοπής και οι χαμηλότερες συχνότητες συντονισμού για το ίδιο ενυδρείο αλλά για διάφορες στάθμες νερού.

Βάθος νερού	**Όλες οι επιφάνειες ελεύθερες**		**Όλες οι επιφάνειες ελεύθερες εκτός από τον πυθμένα**	
L_z (m)	Συχνότητα αποκοπής (Hz)	Χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού (Hz)	Συχνότητα αποκοπής (Hz)	Χαμηλότερη συχνότητα συντονισμού (Hz)
0.15	5439	5479	3292	3357
0.19	4491	4539	2913	2986
0.23	3902	3957	2692	2772
0.26	3593	3653	2583	2665
0.30	3292	3357	2480	2566

Στο Σχήμα 2.1 βλέπουμε την απόσταση εξασθένησης σε σχέση με τη συχνότητα, στη περίπτωση όπου το βάθος του νερού είναι 0.26 m και ο πυθμένας θεωρείται σκληρός (σταθερός). Παρατηρούμε ότι μέχρι τα 1800 Hz η απόσταση εξασθένησης είναι κάτω από 30 cm.



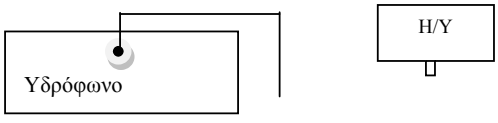
Σχήμα 2.1: Η απόσταση εξασθένησης σε σχέση με τη συχνότητα στη περίπτωση όπου το βάθος του νερού είναι 0.26 m και ο πυθμένας θεωρείται σκληρός (σταθερός).

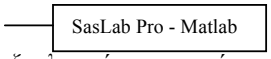
Έγιναν αρχικά κάποια πειράματα-δοκιμές με το σκεπτικό να παραχθεί ήχος διαφορετικών συχνοτήτων μέσα στο βασικό ενυδρείο και να γίνει ταυτόχρονη ηχογράφηση, ώστε να διερευνηθεί εάν υπάρχουν συχνότητες οι οποίες αναδεικνύονται ή υπερτερούν των άλλων και σχετίζονται με τις συχνότητες αποκοπής για διάφορα βάθη νερού. Οι συχνότητες που μας ενδιαφέρουν και στις οποίες ενδεχομένως κάποια ψάρια εκπέμπουν ήχους, αρχίζουν ακόμα και από τα 200 Hz. Διαθέταμε δύο διαφορετικά υποβρύχια ηχεία. Το πρώτο, το οποίο μπορεί αποδοτικά να εκπέμψει σε χαμηλές συχνότητες, έχει διαστάσεις περίπου 30x30x30 cm και ο όγκος που καταλαμβάνει μέσα στο ενυδρείο αλλοιώνει αισθητά την ακουστική μέσα σε αυτό. Η άλλη πηγή ήταν ένα υδρόφωνο-εκπομπός που μπορεί να εκπέμψει αποδοτικά μόνο σε αρκετά υψηλότερες συχνότητες (>2000 Hz). Ως εκ τούτου έγιναν προσπάθειες να οδηγηθεί και να ηχογραφηθεί το πεδίο μέσα στο ενυδρείο μέσω ενός εξωτερικού ηχείου, σαρώνοντας συχνότητες από 200 – 3000 Hz. Με σταθερή τη θέση του ηχείου πάνω από το ενυδρείο έγιναν ηχογραφήσεις μέσα στο ενυδρείο για διάφορα βάθη νερού. Όπως ήταν σχεδόν αναμενόμενο, η μέθοδος αυτή δεν κατέδειξε κάποια σαφή αποτελέσματα, κυρίως λόγω των πολλαπλών παραγόντων που υπεισέρχονται. Υπάρχει αρχικά η μεταβλητή απόδοση του ηχείου με τη συχνότητα (αν και αυτή μπορεί να υπολογιστεί και να ληφθεί υπόψη), αλλά κυρίως η ποικίλη απόκριση κάθε τοιχώματος του ενυδρείου το οποίο υφίσταται και τη φόρτιση του νερού. Με την αλλαγή και της στάθμης του νερού η δομική συμπεριφορά κάθε τοιχώματος είναι διαφορετική με αποτέλεσμα να αποκρίνεται και να εκπέμπει σε διαφορετικές συχνότητες. Όλα αυτά, σε συνδυασμό και με τον μη σαφή προσδιορισμό της θέσης της πηγής σε αυτή την περίπτωση, δεν κατέστησαν δυνατή την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων από το πείραμα αυτό. Περισσότερα για το πείραμα αυτό θα αναφερθούν στην προφορική παρουσίαση της ομιλίας.

3. Διαδικασία ηχογράφησης

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις ηχογραφήσεις είναι ο εξής:

1. Ενυδρεία των 250, 104, 142 και 35 λίτρων, με διαστάσεις, Μ x Π x Υ: 0.5x0.5x1m, 1.14x0.35x0.26 m, 0.90x0.35x0.45 m , 0.40x0.25x0.35 m, αντίστοιχα. Το κάθε ενυδρείο διέθετε τον κατάλληλο εξοπλισμό: φίλτρο-κυκλοφορητή νερού, θερμαντήρα και θερμόμετρο.
2. Υδρόφωνο: Μοντέλο Η2 της εταιρείας Aquarian Audio Products, συχνοτικής απόκρισης 20Hz -100KHz, παντοκατευθυντικού τύπου.
3. Λογισμικό ηχογράφησης ήχου: Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή του ήχου, είναι το SasLab Pro της εταιρείας Avisoft Bioacoustics, το οποίο σε συνεργασία με τις συσκευές της ίδιας εταιρείας ειδικεύεται στην ηχογράφηση και επεξεργασία ήχων**.** Το υδρόφωνο κατέληγε στον υπολογιστή όπου μέσω του προγράμματος SasLab Recorder έγινε η εγγραφή των ήχων (Σχήμα 3.1).
4. Η ανάλυση και επεξεργασία των ήχων έγινε μέσω του λογισμικού Matlab.



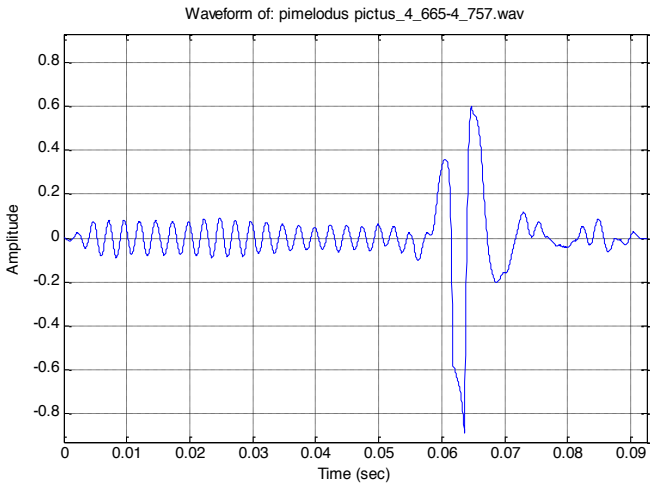


Σχήμα 3.1. Διάταξη του εξοπλισμού της ηχογράφησης.

Έγιναν ηχογραφήσεις σε ψάρια γλυκού νερού από τα είδη: Pterophyllum Scalare, Pimelodus Pictus, Trichogaster leeri, Paracheirodon simulans, Ancistrus cirrhosus. Το είδος Pimelodus Pictus μελετήθηκε πιο διεξοδικά, για το οποίο έγιναν και οι περισσότερες ηχογραφήσεις. Τα ψάρια αυτά ήταν στο ενυδρείο των 104 λίτρων, με διαστάσεις 1.14x0.45x0.30 m (βάθος νερού 0.26m). Σε αυτό το ενυδρείο έγιναν και οι προαναφερθείσες δοκιμές. Τα ψάρια αλμυρού νερού που ηχογραφήθηκαν ήταν τα εξής: Oblada melanura, Sarpa salpa, Balistes capriscus, Diplodus sargus sargus, Sparus aurata και Procambarus clarkii (είδος καραβίδας).

Οι ηχογραφήσεις έγιναν σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, κάποιες εκτός εργαστηρίου και σε ορισμένες έγινε και παρατήρηση των ψαριών. Σε κάποιες από τις ηχογραφήσεις είχαμε θόρυβο φίλτρου και θόρυβο λόγω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από το καλώδιο του υδροφώνου. Έγινε αποθορυβοποίηση σε κάποια αρχεία ήχου (μέσω Matlab), με αποτέλεσμα όμως να έχουμε αλλοίωση και στις συχνότητες του ήχου που παράγουν τα ψάρια. Επίσης, σε κάποιες ηχογραφήσεις υπήρχαν πολλά είδη ψαριών μέσα στο ενυδρείο και έτσι υπήρχε αδυναμία να καθορίσουμε ποιό ψάρι εκπέμπει ήχο.

Οι ήχοι που καταγράφηκαν από τα Pterophyllum Scalare ήταν μόνο μέσω του μηχανισμού σπηλαίωσης. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της σίτισης και όταν άνοιγαν το στόμα τους στην επιφάνεια του νερού. Οι ήχοι που ηχογραφήθηκαν από τα ψάρια θαλασσινού νερού ήταν κυρίως από τον μηχανισμό σπηλαίωσης και συριστικοί μόνο από την καραβίδα. Τα γατόψαρα (Pimelodus Pictus), είναι γνωστό ότι παράγουν ήχους κατά τη διάρκεια αναπαραγωγής, ανταγωνιστικής συμπεριφοράς και άμυνας. Συριστικοί ήχοι στα γατόψαρα έχουν επίσης παρατηρηθεί και κατά τη διάρκεια ανταγωνιστικών συναντήσεων με μη επιθετικά ψάρια σε ενυδρεία, [7]. Στην ηχογράφηση των Pimelodus Pictus καταγράφηκαν συριστικοί, κρουστικοί, υδροδυναμικοί ήχοι αλλά και συνδυασμοί αυτών. Ο συριστικός-κρουστικός ήχος καταγράφηκε μετά την εισαγωγή δύο Pterophyllum Scalare στο ενυδρείο και οι υδροδυναμικοί ήχοι παρήχθησαν κατά τη διάρκεια ανταγωνισμού μεταξύ των ψαριών.



Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστική κυματομορφή από καταγεγραμμένο ήχο του είδους Pimelodus Pictus.

Στο Σχήμα 3.2, διακρίνεται αρχικά ένας συριστικός ήχος (από τα ακτινοπτερύγια) και ακολουθείται από κρουστικό ήχο (από τη νηκτική κύστη). Η βασική συχνότητα του πρώτου ήχου είναι 398 Hz ενώ του κρουστικού είναι 159 Hz.

4. Συμπεράσματα - Σχόλια

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω θα προσπαθήσουμε να επισημάνουμε κάποια στοιχεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν θέλουμε να ηχογραφήσουμε διάφορα είδη ψαριών σε μικρά ενυδρεία ώστε να μελετήσουμε τους ήχους που εκπέμπουν. Καταρχάς αν δεν γνωρίζουμε τίποτε για το επικείμενο «φώνημα», δηλαδή δεν γνωρίζουμε καθόλου την περιοχή συχνοτήτων από την οποία αποτελείται ο εκπεμπόμενος ήχος του ψαριού, τότε η υπογραφή την οποία ενδεχομένως θα λάβουμε πχ. με ένα υδρόφωνο σε μία θέση μέσα στο ενυδρείο, μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από την πραγματική. Αυτό θα οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση του ψαριού από το υδρόφωνο μπορεί είναι μεγαλύτερη από την «απόσταση εξασθένησης» με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται η κυματομορφή.

Αν πάλι κάποιες συχνότητες της πηγής συμπίπτουν με τις ιδιοσυχνότητες του ενυδρείου, αυτές θα ενισχύονται και θα έχουμε πάλι αλλοίωση της κυματομορφής.

Μία λύση για το πρώτο πρόβλημα θα ήταν να χρησιμοποιηθούν για την ηχογράφηση αρκετά υδρόφωνα (πάνω από 2) έτσι ώστε η πηγή να βρίσκεται κοντά σε κάποιο από αυτά. Όσον αφορά το δεύτερο πρόβλημα εάν γνωρίζουμε κάποια συχνοτική πληροφορία για την ηχητική υπογραφή του ψαριού το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε, τότε μπορούμε εκ των προτέρων να επιλέξουμε κατάλληλα τις διαστάσεις του ενυδρείου και το βάθος του νερού. Εάν το βασικό συχνοτικό περιεχόμενο του ήχου του ψαριού είναι κάτω από την χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα του ενυδρείου τότε μπορεί να έχουμε μία ακριβή καταγραφή του ήχου του ψαριού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση", Πράξη Αρχιμήδης ΙΙΙ και συγχρηματοδοτείται

από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους (Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς 2007-2013).

5. Αναφορές

[1] Jacqueline F. Webb, Richard R. Fay, Arthur N. Popper. *Fish Bioacoustics,* Springer Science &Business Media, LLC, Νέα Υόρκη, (2008).

[2] Friedrich Ladich, Shaun P. Collin, Peter Moller, B. G. Kapoor. *Communication in Fishes*, Science Publishers*,* Μπρισμπέιν, (2006).

[3] S. Kouzoupis, and P. Papadakis, "Comparison of three swimbladder sound production mechanism models", In proceedings of the 11th *European Conference on Underwater Acoustics ECUA*, pp 510-517, (2012).

[4] A. O. Kasumyan. "Sounds and Sound Production in Fishes", *Journal of Ichthyology,* Vol. 48, No. 11, pp 981 – 1030, (2008).

[5] Parvulescu, A. ''The acoustics of small tanks,'' in Marine BioAcoustics, edited by W. N. Tavolga (Pergamon, Oxford) , Vol. 2, pp 7–13 (1967).

[6] Akamatsu T., Okumura T., Novarini N. and Yan H., "Empirical refinements applicable to the recording of fish sounds in small tanks", *Journal of the Acoustical Society of America* **112**(6), 3073, (2002).

[7] Javier S. Tellechea, et.al. "Sound production and pectoral spine locking in a Neotropical catfish (*Iheringichthys labrosus*, Pimelodidae)", *Neotropical Ichthyology*, Vol. 9, No. 4, pp 889-894, (2011).

Κατηγοριοποίηση των υπερηχητικών μηνυμάτων των πειραματικών ποντικιών χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης

Αντρέας Νεοκλέους
Τμήμα Πληροφορικής,
Πανεπιστήμιο Groningen
neocleous.andreas@gmail.com

Σπύρος Κουζούπης
Τμήμα Μουσικής
Τεχνολογίας και
Ακουστικής, ΤΕΙ
Κρήτης
skouzo@staff.teicrete.gr

Ειρήνη Αθανασάκη
Τμήμα Βιολογίας,
Πανεπιστήμιο Κρήτης
athan@biology.uoc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή περιγράφεται μία προσέγγιση αυτοματοποιημένης κατηγοριοποίησης των υπερηχητικών φωνημάτων που εκπέμπουν νεαρά πειραματικά ποντίκια BALB/c. Μετά από πολλές ηχογραφήσεις που έγιναν σε νεαρά πειραματικά ποντίκια, παρατηρήθηκαν κυρίως υπερηχητικά μονοχρωματικά φωνήματα των οποίων οι καμπύλες τονικού ύψους παρουσιάζουν ομοιότητες και παραπέμπουν στην ύπαρξη «συλλαβών». Από το σύνολο των ηχογραφήσεων, απομονώθηκαν 179 φωνήματα (συλλαβές) και από κάθε συλλαβή εξήχθησαν 22 χαρακτηριστικά. Τα 22 χαρακτηριστικά για κάθε συλλαβή χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος σε μοντέλα α) αυτο-οργανωμένων συστημάτων και β) k-μέσων, με σκοπό την ομαδοποίηση των συλλαβών μέσω της μεθόδου της μη-επιβλεπόμενης εκπαίδευσης. Και οι δύο τεχνικές έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα. Λαμβάνοντας υπόψη τις ομοιότητες που έχουν οι καμπύλες τονικού ύψους των συλλαβών, προτείνεται ότι όλες οι συλλαβές των πειραματικών ποντικιών BALB/c υπάγονται σε ένα ρεπερτόριο το οποίο αποτελείται από 11 κύριες κατηγορίες.

Classification of Experimental Mice Ultrasonic Vocalizations Using Machine Learning Techniques

ABSTRACT

Based on recordings of young experimental BALB/c mice in the ultrasonic range, we describe a machine learning approach for clustering their ultrasonic vocalizations. The audio signals consisted mainly of monochromatic ultrasonic vocalizations. In order to extract the syllables, a manual segmentation of the audio signal was performed extracting pitch through the spectrogram and a database of 179 phonemes was created. For each syllable, 22 features were defined and a new database was created. Two clustering methods of k-means and Self Organizing Maps were used, both giving similar results. The most successful clustering was achieved with the 11 category model. Thus, by considering the similarities of the pitch contour shapes, we claim that each experimental mouse ultrasonic vocalization falls into one out of 11 distinct characteristic categories ('syllables').

Εισαγωγή

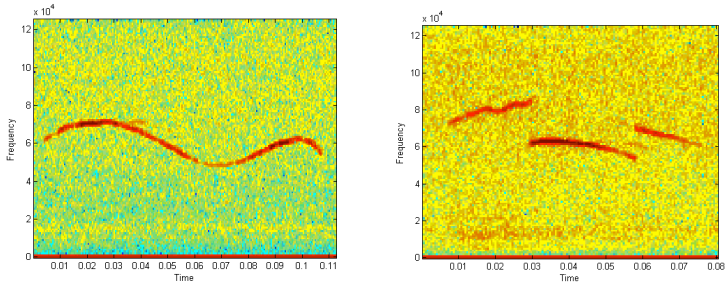
Προηγούμενες μελέτες έχουν καταδείξει ότι τα ποντίκια, οι νυχτερίδες, οι βάτραχοι, οι φάλαινες και άλλα θηλαστικά και σπονδυλωτά εκπέμπουν υπερηχητικά μηνύματα για επικοινωνία αλλά και για να αντιληφθούν το περιβάλλον που τους περικλείει, [1], [2], [3], [4]. Τα ζώα αυτά που δεν έχουν αυξημένη όραση ή κάποια από αυτά που δεν έχουν καθόλου όραση, έχουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται και να επεξεργάζονται τους διάφορους χρόνους καθυστέρησης μεταξύ των εκπεμπόμενων κυμάτων και των ανακλώμενων κυμάτων με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μπορούν να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους με μεγάλη ακρίβεια. Το μικρό μήκος κύματος των υψηλών συχνοτήτων μπορεί να συμβάλει όχι μόνο στην εκτίμηση της απόστασης που βρίσκεται ένα αντικείμενο, αλλά και στον προσδιορισμό του σχήματος του αντικειμένου.

Σε προηγούμενη μελέτη, [5] έγιναν ηχογραφήσεις από νεαρά πειραματικά ποντίκια BALB/c όταν βρίσκονταν σε διάφορες καταστάσεις. Στα ηχογραφημένα σήματα παρατηρήθηκαν κάποιες επαναλήψεις από μονοχρωματικά υπερηχητικά μηνύματα, με διαστήματα ησυχίας μεταξύ τους, τα οποία ονομάστηκαν συλλαβές. Οι συλλαβές ξεκινούσαν λίγο μετά την εισαγωγή ενός αρσενικού ποντικιού στο κλουβί όπου υπήρχε από πριν ένα θηλυκό. Η κάθε συλλαβή είχε διάρκεια περίπου 70 ms (κατά μέσο όρο) και συχνοτικό ύψος 70 kHz (κατά μέσο όρο). Από τις ηχογραφήσεις που έγιναν, απομονώθηκαν 2995 συλλαβές και δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων η οποία περιέχει 179 συλλαβές χωρισμένες σε 11 κατηγορίες. Οι 11 κατηγορίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Η ομαδοποίηση είναι βασισμένη στο σχήμα που έχει η καμπύλη του τονικού ύψους του κάθε φωνήματος. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται τα φασματογράφηματα μιας συλλαβής «τύπου Μ» και μιας «τύπου απότομης μετάβασης συχνότητας 2».

Πίνακας 1: Οι 11 κατηγορίες των συλλαβών όπως κατηγοριοποιήθηκαν με οπτικό τρόπο βασισμένο στο σχήμα της καμπύλης του τονικού ύψους.

Ταυτότητα	**Όνομα**
Α	«Τύπου Λάμδα»
Β	«Ασύμμετρο λάμδα δεξιά»
Γ	«Ασύμμετρο λάμδα αριστερά»
Δ	«Τύπου Μ»
Ε	«Τύπου Μ αριστερά»
ΣΤ	«Γραμμικό με θετική κλίση»
Ζ	«Γραμμικό με αρνητική κλίση»
Η	«Απότομης μετάβασης συχνότητας - Ασύμμετρο λάμδα δεξιά»
Θ	«Απότομης μετάβασης συχνότητας Τύπου Μ αριστερά»
Ι	«Απότομης μετάβασης συχνότητας 1»
Κ	«Απότομης μετάβασης συχνότητας 2»



Εικόνα 1: Φασματογράφημα της συλλαβής «τύπου Μ» και της συλλαβής «τύπου απότομης μετάβασης συχνότητας 2».

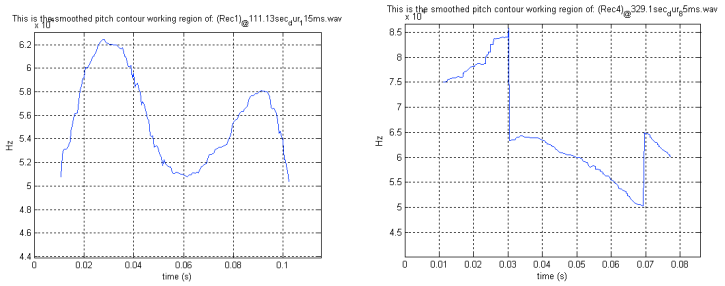
Σε αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης και φτιάχτηκαν μοντέλα με τεχνικές μη-επιβλεπόμενης εκπαίδευσης των δεδομένων έτσι ώστε να επιτευχθεί μια αυτοματοποιημένη ομαδοποίηση των υπερηχητικών μηνυμάτων των πειραματικών ποντικιών BALB/C. Φτιάχτηκαν μοντέλα έχοντας στην είσοδο κάποια απλά συχνοτικά και χρονικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η αρχική και τελική συχνότητα και η διάρκεια του φωνήματος αλλά και κάποια πιο σύνθετα χαρακτηριστικά. Για κάθε συλλαβή εξάγονταν τα ίδια χαρακτηριστικά. Τα μοντέλα φτιάχτηκαν για να ομαδοποιήσουν τα δεδομένα σε 11 κατηγορίες, όσες ήταν και οι κατηγορίες σε προηγούμενη εργασία, [5]. Η ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε εδώ, είχε σκοπό να εξετάσει και να συγκρίνει τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης από τον άνθρωπο με τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης των τεχνικών μηχανικής μάθησης. Για την αυτοματοποιημένη ομαδοποίηση των συλλαβών των πειραματικών ποντικιών BALB/c, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές τεχνητών νευρωνικών δικτύων, [6] και k-μέσων, [7].

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι οι δύο τεχνικές χωρίς επίβλεψη, οι οποίες εφαρμόστηκαν στα δεδομένα, ομαδοποίησαν τις συλλαβές σε κατηγορίες που αντιστοιχούσαν με αυτές που έγιναν από τον άνθρωπο. Το γεγονός αυτό, δείχνει ότι μέσα στο ακουστικό σήμα που αναλύθηκε, υπάρχουν συλλαβές οι οποίες περιέχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκπαιδεύσουν αλγόριθμους υπολογιστικής νοημοσύνης. Αυτό, ενδυναμώνει περισσότερο την υπόθεση ότι τα πειραματικά ποντίκια BALB/C, χρησιμοποιούν συγκεκριμένα υπερηχητικά μηνύματα (φράσεις) για την επικοινωνία μεταξύ τους.

1. Μέθοδος

Όλες οι ηχογραφήσεις έγιναν στα εργαστήρια του Τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Κρήτης. Τα ποντίκια χωρίστηκαν σε πέντε ομάδες και για κάθε ομάδα έγιναν ηχογραφήσεις με εξειδικευμένο εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί να υποστηρίξει μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας, καταγράφοντας ήχους μέχρι και 125 kHz. Σε κάθε ομάδα, υπήρχαν 3 ποντίκια, ένα θηλυκό και δύο αρσενικά. Στην αρχή τοποθετούνταν στο κλουβί ένα θηλυκό και μετά από λίγη ώρα εισαγόταν το πρώτο αρσενικό. Το τρίτο αρσενικό τοποθετούνταν στο κλουβί μετά από περίπου 3 με 4 λεπτά. Από το σύνολο των ηχογραφήσεων εντοπίστηκαν 2995 συλλαβές. Από τις 2995 συλλαβές, επιλέχθηκαν 179, οι οποίες είχαν το λιγότερο θόρυβο βάθους.

Για κάθε συλλαβή εξήχθη μία μοναδική καμπύλη τονικού ύψους (αφού όλα τα φωνήματα ήσαν μονοχρωματικά), μέσω μίας μεθόδου που βασίζεται στον FFT για ένα παράθυρο συγκεκριμένου μήκους το οποίο ολισθαίνει στο χρόνο. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται δύο παραδείγματα από καμπύλες τονικού ύψους, οι οποίες εξήχθησαν όπως περιγράφτηκε παραπάνω. Φαίνεται μία συλλαβή «τύπου Μ» και μία του τύπου «απότομης μετάβασης συχνότητας 2».



Σχήμα 1.1: Καμπύλη τονικού ύψους για μία συλλαβή «τύπου Μ» και για μία του τύπου « απότομης μετάβασης συχνότητας 2».

Από τις καμπύλες τονικού ύψους κάθε συλλαβής, εξήχθη ένα σύνολο από 22 χαρακτηριστικά. Εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος των αυτο-οργανωμένων συστημάτων (self organizing maps) και ο αλγόριθμος (αυστηρής) ομαδοποίησης k-μέσων, χρησιμοποιώντας αρχικά στην είσοδο των μοντέλων όλα τα χαρακτηριστικά χωρίς να γίνει κάποια επεξεργασία. Τα 22 χαρακτηριστικά αναφέρονται στις καμπύλες του τονικού ύψους και είναι τα παρακάτω:

1. Αρχική συχνότητα	12. Συνολική χρονική διάρκεια
2. Τελική συχνότητα	13. Ασυμμετρία ή λοξότητα (βλέπε κείμενο)
3. Μεσαία συχνότητα (στο μέσον της διάρκειας)	14. Άλμα (βλέπε κείμενο)
4. Συχνότητα στο $1^{ο}$ τεταρτημόριο	15. Συχνότητα της $1^{ης}$ κορυφής
5. Συχνότητα στο $2^{ο}$ τεταρτημόριο	16. Συχνότητα της $2^{ης}$ κορυφής
6. Συχνότητα στο $3^{ο}$ τεταρτημόριο	17. Συχνότητα της $3^{ης}$ κορυφής
7. Συχνότητα στο $4^{ο}$ τεταρτημόριο	18. Συχνότητα της $4^{ης}$ κορυφής
8. Μέση συχνότητα	19. Συχνότητα της $1^{ης}$ κοιλάδας
9. Σ1 (βλέπε κείμενο)	20. Συχνότητα της $2^{ης}$ κοιλάδας
10. Σ2 (βλέπε κείμενο)	21. Συχνότητα της $3^{ης}$ κοιλάδας
11. Τυπική απόκλιση (της καμπύλης τονικού ύψους)	22. Συχνότητα της $4^{ης}$ κοιλάδας

Τα χαρακτηριστικά «Σ1» και «Σ2» είναι δύο παράμετροι που παραπέμπουν με κάποιο τρόπο στο σχήμα της καμπύλης. Τα Σ1 και Σ2 ορίζονται αντίστοιχα ως, [8]:

$$\Sigma 1 = \frac{\text{Μεσαία Συχν.} - \text{Αρχική Συχν.}}{\text{Αριθμ. παραθύρων 1}} \qquad \Sigma 2 = \frac{\text{Μεσαία Συχν.} - \text{Τελική Συχν.}}{\text{Αριθμ. παραθύρων 2}}$$

όπου Αριθμ. παραθύρων 1, είναι ο αριθμός των παραθύρων μεταξύ του αρχικού σημείου καμπύλης και του μέσου της, και Αριθμ. παραθύρων 2, είναι ο αριθμός των παραθύρων μεταξύ του μέσου της καμπύλης και του τελικού σημείου της. Το χαρακτηριστικό «Ασυμμετρία ή λοξότητα» εκφράζει πόσο και προς ποιά κατεύθυνση αποκλίνει η καμπύλη (ως προς το χρόνο) από την πλήρη συμμετρία. Το χαρακτηριστικό «Άλμα» υποδηλώνει αν υπάρχουν απότομα σχετικά μεγάλα άλματα στη καμπύλη τονικού ύψους. Παρατηρήθηκαν αρκετές τέτοιες περιπτώσεις οι οποίες οφείλονται στη μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής της φώνησης. Η παράμετρος αυτή παίρνει 4 τιμές: -1, +1 , 0 και 2 όταν έχει αντίστοιχα απότομα άλματα: προς τα κάτω (-1), προς τα πάνω (+1), όταν δεν υπάρχει άλμα (0) και όταν υπάρχουν δύο άλματα (2). Για τα χαρακτηριστικά 15 - 22 δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος αφού γίνει πρώτα μία σχετική εξομάλυνση της κυματομορφής, βρίσκει με αρκετή επιτυχία τα πιο βασικά ακρότατα (μέγιστα και ελάχιστα) της καμπύλης του τονικού ύψους. Η διαδικασία αυτή παράγει το πολύ μέχρι 4 μέγιστα (κορυφές) και μέχρι 4 ελάχιστα (κοιλάδες). Στις περιπτώσεις όπου υπήρχε πχ. μόνο μία κορυφή, οι υπόλοιπες 7 θέσεις έπαιρναν την τιμή 0.

Από την επαλήθευση των μοντέλων παρατηρήθηκε ότι η ομαδοποίηση ήταν παρόμοια με την αρχική ταξινόμηση (που έγινε εμπειρικά με οπτικό τρόπο), υπήρχαν όμως κάποιες περιπτώσεις συλλαβών που κατηγοριοποιούνταν από τα μοντέλα σε άλλες κατηγορίες. Για την βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων, έγινε κάποια επεξεργασία στα δεδομένα και από την επαλήθευση των μοντέλων παρατηρήθηκε ότι η ομαδοποίηση των συλλαβών ήταν ακόμα πιο κοντά στην αρχική ταξινόμηση. Η επεξεργασία που έγινε αφορούσε τα χαρακτηριστικά 15-22. Αρχικά έγινε μια κανονικοποίηση της συχνότητας και διαιρέθηκε η συχνότητα της εκάστοτε κορυφής ή κοιλάδας με την μεγαλύτερη συχνότητα που υπήρξε στη συλλαβή. Στη συνέχεια έγινε μια κανονικοποίηση του χρόνου που εμφανίστηκε η εκάστοτε κορυφή ή κοιλάδα, διαιρώντας τον χρόνο αυτό με την συνολική διάρκεια της συλλαβής. Τα χαρακτηριστικά 15-22 αντικαταστήθηκαν με την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ της κανονικοποιημένης συχνότητας και του κανονικοποιημένου χρόνου και ξαναφτιάχτηκαν τα μοντέλα.

2. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επαλήθευσης των μοντέλων που φτιάχτηκαν με αυτο-οργανωμένα συστήματα. Η κάθε γραμμή παρουσιάζει τις κατηγορίες όπως έχουν κατηγοριοποιηθεί με οπτικό τρόπο. Η κάθε στήλη παρουσιάζει πόσες συλλαβές έχουν ομαδοποιηθεί από την έξοδο των αυτο-οργανωμένων συστημάτων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1 οι συλλαβές Α: «τύπου λάμδα» ομαδοποιήθηκαν στις κατηγορίες 4 και 5. Στην κατηγορία 5 υπάρχουν 18 συλλαβές και στην κατηγορία 4 υπάρχουν 6 συλλαβές.

Το 48% (14 από τις 29 συλλαβές) της κατηγορίας Β: «ασύμμετρα λάμδα αριστερά», ομαδοποιήθηκαν στην κατηγορία 4 και οι υπόλοιπες συλλαβές ομαδοποιήθηκαν στις κατηγορίες 1, 2 και 3. Παρατηρείται ότι υπάρχει μία ομοιότητα των κατηγοριών Α και Β. Το μοντέλο κατηγοριοποίησε στην έξοδο 4, έξι

από τις 24 (25%) των συλλαβών «τύπου λάμδα» και 14 από τις 29 (48%) των συλλαβών «ασύμμετρα λάμδα αριστερά». Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι οι τονικές καμπύλες στις δύο κατηγορίες Α και Β έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Η κυριότερη διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών είναι η διαφορά της τελικής συχνότητας από την αρχική. Στην κατηγορία Β η διαφορά αυτή είναι μεγαλύτερη από αυτήν της κατηγορίας Α. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι ένα χαρακτηριστικό ίσως να μην ήταν ικανό έτσι ώστε να στρέψει το μοντέλο προς μία άλλη έξοδο, που ενδεχομένως να ήταν πιο σωστή στην ανθρώπινη αντίληψη.

Το 84.6% (22 από τις 25) των συλλαβών Γ: «Ασύμμετρα λάμδα δεξιά» ομαδοποιήθηκαν στην κατηγορία 6, ενώ δύο ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 5» και μία στην «κατηγορία 3». Παρατηρείται ότι οι δύο συλλαβές της ομάδας Γ: «Ασύμμετρα λάμδα δεξιά», ομαδοποιήθηκαν στην ίδια κατηγορία που ομαδοποιήθηκαν οι περισσότερες από τον τύπο Α: «τύπου λάμδα». Οι περισσότερες συλλαβές της κατηγορίας Δ: «Τύπου Μ» (16 από τις 22), ομαδοποιήθηκαν από το μοντέλο στην «κατηγορία 11», ενώ τα υπόλοιπα 6 στην «κατηγορία 10». Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, οι συλλαβές από τις κατηγορίες Δ και Ε, έχουν όμοια χαρακτηριστικά. Το 52.4% (11 από τις 21 συλλαβές) της κατηγορίας Ε: «Τύπου Μ αριστερά», ομαδοποιήθηκαν από το μοντέλο στην «κατηγορία 11» και 7 συλλαβές στην «κατηγορία 10», στις ίδιες δηλαδή κατηγορίες που ομαδοποιήθηκε το 72.7 % (κατηγορία 11) και το 27.3 % (κατηγορία 10) της κατηγορίας Δ: «Τύπου Μ».

Πίνακας 2.1 Αποτελέσματα επαλήθευσης των αυτο-οργανωμένων συστημάτων σε 11 κατηγορίες.

		Ομαδοποίηση από τις τεχνικές μηχανικής μάθησης										
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Κατηγοριοποίηση με οπτικό τρόπο	Α: Τύπου Λάμδα	0	0	0	6	18	0	0	0	0	0	0
	Β: Ασύμμετρο λάμδα αριστερά	3	4	6	14	0	0	0	0	0	0	2
	Γ: Ασύμμετρο λάμδα δεξιά	0	0	1	0	2	22	0	0	1	0	0
	Δ: Τύπου Μ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	16
	Ε: Τύπου Μ αριστερά	0	0	0	0	0	2	0	0	1	7	11
	ΣΤ: Γραμμικό με θετική κλίση	12	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ζ: Γραμμικό με αρνητική κλίση	0	0	4	0	0	1	6	3	1	1	0
	Η: Απότομης μετάβασης συχνότητας Ασύμμετρο λάμδα δεξιά	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
	Θ: Απότομης μετάβασης συχνότητας Τύπου Μ αριστερά	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0
	Ι: Απότομης μετάβασης συχνότητας 1	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Κ: Απότομης μετάβασης συχνότητας 2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0

Το 70.6 % (12 από τις 17) των συλλαβών της κατηγορίας ΣΤ: «Γραμμικά με αρνητική κλίση» ομαδοποιήθηκε στην κατηγορία 1, ενώ τρεις συλλαβές ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 2» και δύο συλλαβές στην «κατηγορία 3».

Οι συλλαβές της κατηγορίας Z: «γραμμικό με αρνητική κλίση» και στα δύο μοντέλα, ομαδοποιήθηκαν διάσπαρτα σε αρκετές κατηγορίες. Από το συγκεκριμένο μοντέλο (του Πίνακα 2.1), έξι συλλαβές ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 7», τέσσερις στην «κατηγορία 3», τρεις στην «κατηγορία 8» και από μία συλλαβή στις «κατηγορίες 6, 9 και 10».

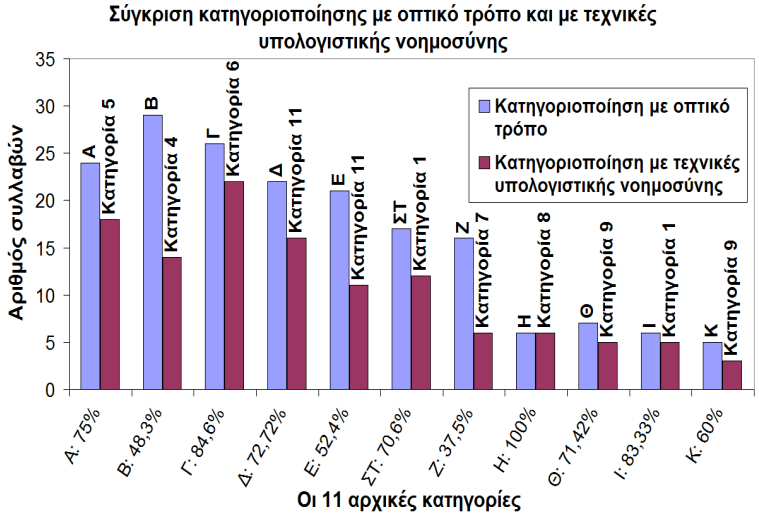
Στην κατηγορία H: «Απότομης μετάβασης συχνότητας ασύμμετρο λάμδα δεξιά», όλες οι συλλαβές ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 8». Στην ίδια κατηγορία υπάρχουν τρεις συλλαβές από την κατηγορία Z: «γραμμικό με αρνητική κλίση» και δύο συλλαβές από την κατηγορία Θ: «απότομης μετάβασης συχνότητας Τύπου Μ αριστερά».

Το 71% (5 από τις 7) των συλλαβών της κατηγορίας Θ: «Απότομης μετάβασης συχνότητας τύπου Μ αριστερά», ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 9» ενώ οι άλλες δύο συλλαβές ομαδοποιήθηκαν στην «κατηγορία 8».

Στην «κατηγορία 1» ομαδοποιήθηκε το 83% (5 από τις 6) των συλλαβών της κατηγορίας I: «Απότομης μετάβασης συχνότητας 1», ενώ το υπόλοιπο ομαδοποιήθηκε στην «κατηγορία 5» στην οποία υπάρχουν οι περισσότερες συλλαβές από την κατηγορία A: «τύπου λάμδα».

Τα 5 φωνήματα της κατηγορίας I: «απότομης μετάβασης συχνότητας 2», ομαδοποιήθηκαν στις «κατηγορίες 9 και 10».

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται σε γραφική παράσταση υπό μορφή ποσοστού επί τοις εκατό η σχέση μεταξύ της ομαδοποίησης των συλλαβών με οπτικό τρόπο και της ομαδοποίησης των συλλαβών από τα αυτο-οργανωμένα συστήματα. Σε κάθε στήλη, το αριστερό γράφημα δείχνει τον αριθμό των συλλαβών που κατηγοριοποιήθηκαν με οπτικό τρόπο και το δεξί γράφημα δείχνει τον αριθμό των συλλαβών που ομαδοποιήθηκαν από τα αυτο-οργανωμένα συστήματα.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση της σχέσης μεταξύ της κατηγοριοποίησης των συλλαβών με οπτικό τρόπο και της ομαδοποίησης των συλλαβών μέσω του αλγορίθμου αυτο-οργανωμένων συστημάτων (εμφανίζεται και η επιτυχία της μεθόδου υπό μορφή ποσοστού επί τοις εκατό).

3. Συμπεράσματα

Τα υπερηχητικά μηνύματα των νεαρών πειραματικών ποντικιών αφού εκπαιδεύτηκαν με τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 11 διακριτές κατηγορίες. Μέσα από μια διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών για κάθε συλλαβή που υπήρχε στη βάση δεδομένων, δημιουργήθηκαν μοντέλα που μπόρεσαν να προσαρμοστούν στα πρότυπα των ηχητικών δεδομένων (με βάση μόνο τις καμπύλες τονικού ύψους) και να δημιουργήσουν κατηγορίες που περιέχουν συλλαβές που έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Οι περισσότερες από τις κατηγορίες αυτές, συγκρινόμενες με τις κατηγορίες που έγιναν αρχικά με οπτικό τρόπο, έδειξαν ότι συμφωνούν σε ποσοστό περισσότερο από 70%. Το γεγονός ότι και οι δύο τεχνικές (κατηγοριοποίηση με οπτικό τρόπο και ομαδοποίηση μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης) κατηγοριοποιούν, με κάποια βεβαιότητα, τις συλλαβές κατά παρόμοιο τρόπο, δείχνει ότι μπορούμε να θεωρήσουμε πως όλα τα φωνήματα αυτά εμπίπτουν σε ένα συγκεκριμένο ρεπερτόριο (το οποίο αποτελείται από 11 βασικές κατηγορίες). Τα μέλη του συνόλου (ρεπερτορίου), μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως «συλλαβές» σε μία ενδεχομένως ηχητική, τραγουδιστική «γλώσσα», στην προσπάθεια επικοινωνίας των ποντικιών μεταξύ τους.

4. Αναφορές

[1] Albert S. “Ultrasonic communication in frogs” Nature, **Vol 440**, 16, (2006).
[2] Au W.W.L. “The sonar of dolphins” New York: Springer-Verlag, (1993).
[3] Barret-Lennard L. G., ‘‘The mixed blessing of echolocation: Differences in sonar use by fish-eating and mammal-eating killer whales’’, Animal Behaviour, **51**, pp 553–565 (1996).
[4] Griffin D . R. “Bat sounds under natural conditions with evidence for the echolocation of insect” prey. J. exp . Zool ., **123**, pp 435-466 (1953).
[5] Neocleous, S. Kouzoupis, I. Athanassakis, “Categorization of the experimental mice ultrasonic vocalizations during the male-female intercourse”, 5th HELINA Conference, (Hellenic Institute of Acoustics), 4-6 Oct. 2010, Athens, Greece.
[6] Kohonen, T., “Self-Organization and Associative Memory”, New York: Springer-Verlag, 1988.
[7] J. B. MacQueen: "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability", Berkeley, University of California Press, 1:281-297 (1967).
[8] Zhixin Chen and Robert C. Maher, “Semi-automatic classification of bird vocalizations using spectral peak tracks”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(5), 2974 (2006).

Investigating Experimentally the Characteristics of Leak Noise in Plastic Water-Filled pipes

Anastasia S. Papastefanou[1], Phillip F. Joseph[1], Michael J. Brennan[2]

[1]Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, SO17 1BJ, Southampton, UK.

[2]Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, 15385-000, SP, Brazil.
Contact e-mail: papastefanou.anastasia@gmail.com

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation of the characteristics of leak noise in plastic water-filled pipes. An experimental set-up was designed to identify the physical mechanisms of leak noise generation. Possible mechanisms include cavitation and turbulence. The experiments show that cavitation is not responsible for leak noise generation and clearly indicate that turbulence is the main mechanism, at least in the experiments conducted. An alternative experimental set-up was also designed to identify the characteristics of leak noise spectra and to investigate how the spectra are affected by the leak size and the leak flow velocity. A number of different hole sizes (leaks) starting from 1 mm diameter, increasing progressively every 0.5 mm until a size of 4 mm diameter were tested for different jet velocities and an empirical model that describes this behaviour is proposed.

Πειραματική μελέτη του θορύβου διαρροής νερού σε πλαστικούς σωλήνες υδροδότησης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια πειραματική μελέτη του θορύβου διαρροής νερού σε πλαστικούς σωλήνες υδροδότησης. Πειράματα πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη των φυσικών μηχανισμών αυτού του θορύβου. Πιθανοί μηχανισμοί είναι η σπηλαίωση και η τυρβώδης ροή. Τα πειράματα έδειξαν ότι η σπηλαίωση δεν είναι υπεύθυνη για το θόρυβο διαρροής νερού, τουλάχιστον στο πείραμα μας, και καθαρά έδειξαν ότι η τυρβώδης ροή είναι ο βασικός μηχανισμός. Επιπλέον πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά μεγέθη διαρροής μεταξύ 1 και 4 χιλ με βήμα 0.5 χιλ. Η επίδραση του μεγέθους της διαρροής και της ταχύτητας διαφυγής του νερού στο αντίστοιχο φάσμα ερευνάται και ένα εμπειρικό μοντέλο που περιγράφει αυτή την συμπεριφόρα προτείνεται.

Introduction

In many water distribution systems a significant percentage of water is lost due to leakage from distribution pipes while in transit from treatment plants to consumers [1]. This is a problem not only in environmental terms but also in economic and health terms. To help control water loss significant efforts have been made in recent years to develop leak detection methods [1-5].

1. Rig design

The rig consisted of a 50 m long, Medium Density Plastic Pipe (MDPE) with an external diameter of 50 mm and a wall thickness of 5 mm. The pipe was cut into two sections, one of length 40 m and another of 10 m. A schematic of the test rig is shown in Fig. 1. Between the two sections a short section of clear plastic pipe of 0.3 m length was located in which a cylindrical hole of 2 mm diameter was drilled to simulate the leak. This section of clear pipe allowed observation of the flow while the water escaped from the leak under pressure in order to determine whether cavitation is a possible cause of leak noise. Two hydrophones were inserted into the pipe on either side of the leak at a distance of 50 cm from the leak. The pipe section was terminated at the end furthest from the tap by an end-cap. The MDPE pipe was connected to a mains pressure water tap through a 15 m hose of 15 mm diameter. This section was introduced to reduce the level of tap noise at the measurement locations as a result of the high attenuation in the soft plastic material of the hose. A 1.4 m MDPE pipe with 25 mm diameter was also introduced to connect the main pipe section of 50 mm diameter to the hose pipe of 15 mm diameter through available diameter reduction connectors. A pressure gauge was connected close to the tap to measure the static pressure within the pipe.

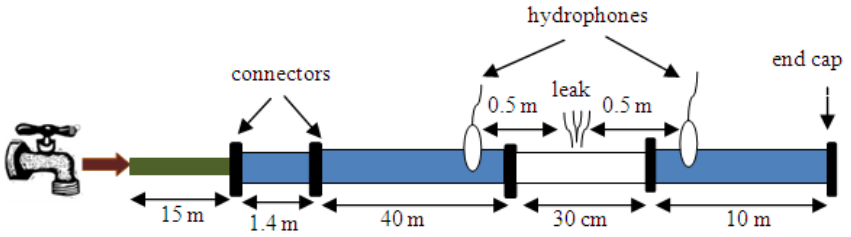


Figure 1.1 Schematic of the test rig.

2. Measurement procedure and results

The velocity of the water discharging from the 2 mm diameter leak at a known static pressure was estimated by measuring the volume of water from each leak over a specific time interval. The volume of the water was measured at various times using measuring cylinders. These measurements allowed the relationship between

flow velocity and pressure to be determined. Furthermore, measurements of the static pressure decay as a function of time were made. Starting from a high static pressure, the pressure gauge reading was recorded every 5 or 10 s until zero pressure was reached. From the relationships between flow velocity and pressure, and pressure and time the relationship between flow velocity and time was estimated for the 2 mm leak.

2.1 Observation of the leak flow

Visual inspection of the flow in the close vicinity of the 2 mm hole, through which the water escaped, revealed no *visible* bubbles in the vicinity of the leak. Therefore, cavitating or oscillating bubbles were excluded as a possible mechanism of leak noise generation in the test-rig. Although it is possible that micro-bubbles, which are not visible to the naked eye, could still have been present, these are too small to generate the high levels of low frequency noise that was measured. This hypothesis is further validated when the measured leak spectrum is shown to be substantially different from the classical cavitation spectrum described earlier [6,7].

The velocity range for the 2 mm leak was between 1 to 13 m/s. Initially, for a flow velocity of 1 m/s the flow was laminar. As the flow speed increased, and hence the Reynolds number increased, the flow gradually became turbulent. In experimental studies of water jet flow from nozzles [8-10], it has been shown that the flow is laminar when the jet leaves the nozzle. In this laminar regime, instability waves related to the axisymmetric modes appear on the surface of the jet and are seen after less than one diameter of air travel, before they merge into a less well defined flow [8-10]. This laminar region was not visible in the photographs taken of the jet from the test-rig due to in-sufficient camera quality and due to the small diameter of the water jet. Thus, instability waves could not be seen, but their existence was apparent in the noise measurements discussed in Section 2.3.

2.2 Laminar and turbulent flow

Depending upon the flow velocity and the pressure, the leak was either turbulent or laminar. A phenomenon observed in the test rig for the 2 mm diameter leak was that in the vicinity of the leak hole the jet changed from being turbulent to laminar above a critical flow velocity. This phenomenon is called relaminarization and is a well known phenomenon for rapidly accelerated flow [11,12]. This behaviour is shown clearly in Fig. 2.1a, which shows the instantaneous acoustic pressure as a function of time. The corresponding spectrogram or pressure versus frequency and time, is shown in Fig. 2.1b. Starting from a high flow velocity of 12 m/s at $t = 0$, the flow was initially turbulent. The noise signal was captured while the static pressure inside the pipe was steadily increased. At a static pressure of around 1.6 bar the flow changed from turbulent to laminar. This corresponds to a flow velocity of around 13 m/s.

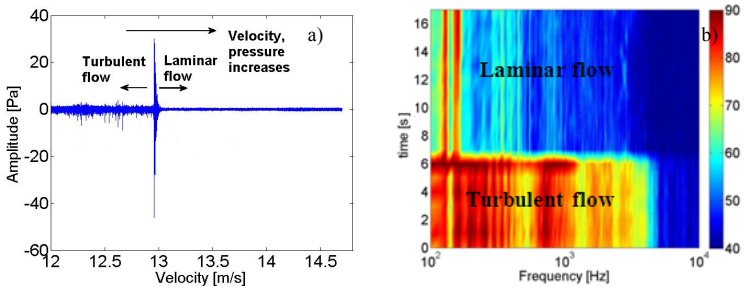


Figure 2.1 Transition from turbulent flow to laminar flow; (a) time history; (b) Spectrogram. The units of the colour-bar are dB re 10^{-6} Pa/Hz.

Figure 2.1a suggests that as the flow velocity increases, a sharp spike in the pressure is observed at the transition velocity above which the flow becomes laminar. It can also be seen that for laminar flow the pressure amplitude is significantly smaller compared with the amplitude of the turbulent flow. Fig. 2.1b shows the spectrogram of the signal shown in Fig. 2.1a. Initially, at $t = 0$, and for the following 6 s there is high level of noise due to the turbulent flow in the water jet. When the velocity increases and the flow becomes laminar the level of noise drops significantly.

In Fig. 2.2 the Power Spectral Density (PSD) of the noise is shown for a flow velocity of 12 m/s, when the flow is turbulent, and at 13m/s when the flow is laminar. The background noise is also shown for comparison.

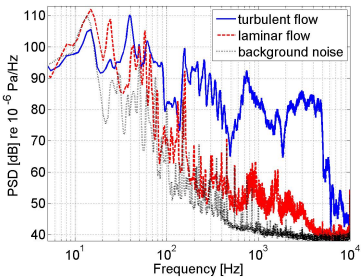


Figure 2.2 PSD for turbulent and laminar flow (relaminarization).

Figure 2.2 shows a significant difference in the noise level for turbulent and laminar flow in the frequency range 70 Hz-5 kHz, with the latter having a level comparable to the level of the background noise. This suggests that leak noise is due to turbulence flow in the jet and not due cavitation as speculated previously [13].

Observing the noise level of the turbulent flow in Fig. 2.2 the peaks in the frequency range up to 450 Hz can be attributed to axial resonances of plane waves in the fluid. These resonances arise due to low damping in the plastic pipe, which was estimated to be around 0.05 dB/m at 100 Hz [14]. At frequencies up to 450 Hz the spectrum decays gradually but at higher frequencies the noise has a different character. A pronounced feature in the spectrum that cannot be explained by axial standing waves is the presence of a broad peak at about 750 Hz. Exciting the pipe

rig with a shaker and measuring the pipe response with an accelerometer revealed that this spectral feature is a consequence of the dynamic behaviour of the clear plastic section and is therefore unrelated to the leak [15]. This clear section was therefore removed in all subsequent leak noise experiments presented in this paper.

2.3 Power Spectral Density variation for pressure decay for the 2 mm leak

Information about the leak noise characteristics was obtained by studying the variation of leak noise as the tap was switched off when the pressure was high, and allowing the pressure to decay slowly over several minutes. Therefore, starting from a high static pressure inside the pipe the leak noise signal was captured immediately after the tap was switched off until the moment where no water escaped from the leak. Thus the pressure, and hence flow velocity, was decaying continuously. The length of the time history varied according to the initial static pressure. Note that in this case the flow was initially turbulent and then changed to laminar flow while the flow velocity steadily decreased. The velocity at which transition occurred was not clear as in the case of relaminarization for high flow velocities but occurred gradually.

The time history was divided into segments of 1 sec length and for each segment the PSD was calculated. In Fig. 2.3a, the variation of PSD with time and frequency is shown with an initial pressure at $t = 0$ equal to 0.85 bar. It can be seen that for higher pressures the pipe resonances, revealed as time-independent lines in Fig. 2.3a, dominate the PSD up to approximately 1 kHz. As the pressure decays, three time-dependent curves are visible in the frequency range of 500 Hz to 2.5 kHz, which cannot therefore be related to pipe resonances. These curves are consistent with instability waves which according to previous work [8-10], appear after less than one diameter of air travel. At frequencies above the highest frequency of the instability waves the pressure drops to a very low level similar to the level of the background noise. In Fig. 2.3b the PSD is plotted against the Strouhal number, $St=fd/V$, and flow velocity V where d is the leak diameter. It can be seen that the three curves have now become vertical as indicated by the dashed lines suggesting that they follow a Strouhal number dependency. For higher flow velocities instability waves were not visible, possibly due to masking by the strong pipe resonances.

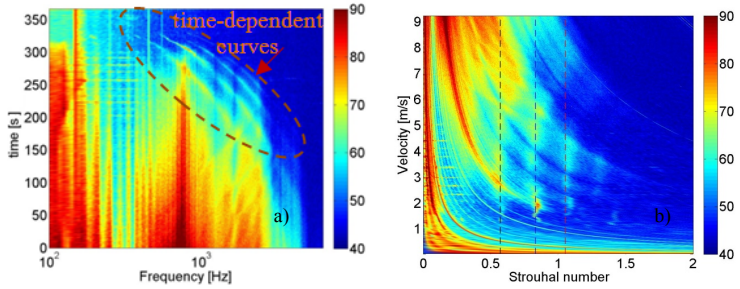


Figure 2.3 PSD variation for pressure decay; (a) Spectrogram; (b) PSD versus the Strouhal number and Velocity. The units of colour-bar are dB re 10^{-6} Pa/Hz.

2.4 A modified rig for the characterization of leak noise

It was seen earlier that the leak spectrum featured a broad peak in the frequency region of 750Hz. For this reason firm conclusions about its characteristics and how it was affected by leak size and water pressure could not be made. Thus, another test-rig was set-up in which the clear plastic section was removed and the leak hole drilled directly into the MDPE pipe to avoid the use of connectors in the vicinity of the leak hole. Circular leak sizes with diameters of between 1 mm -4 mm with 0.5 mm increments were tested.

2.5 Procedure for estimating the leak noise spectrum

The procedure for estimating the leak noise spectrum is based on a theoretical model of the cross spectrum between the pressures at two points in the pipe d_1, d_2 due to a leak with pressure frequency spectrum S_{ll}, including wave reflections [16]. The Cross-Spectral Density (CSD) $S_{x_1x_2}(\omega)$ of two signals $x_1(t)$ and $x_2(t)$ measured at distances d_1 and d_2 from the leak, is given by,

$$S_{x_1x_2}(\omega) = H^*(\omega, d_1)H(\omega, d_2)S_{ll}(\omega) \tag{2.1}$$

where '*' denotes complex conjugation, $S_{ll}(\omega)$ is the PSD of the acoustic pressure generated by the leak signal measured at the leak location, and $H(\omega, d_1)$ and $H(\omega, d_2)$ are the transfer functions between the signals at the leak and sensor position 1 and 2 respectively.

For the case where the reflections do not occur between the leak and the sensors (out of bracket discontinuities) the transfer functions between the leak and each sensor are given by [16]:

$$H(\omega, d_1) = \frac{e^{-ikd_1}\left(1 + r_1e^{-ik2l_1} + r_2e^{-ik2(d_2+l_2)} + r_1r_2e^{-ik2(d_2+l)}\right)}{(1 - r_1r_2e^{-ik2(d_1+d_2+l)})} \tag{2.2}$$

$$H(\omega, d_2) = \frac{e^{-ikd_2}\left(1 + r_2e^{-ik2l_2} + r_1e^{-ik2(d_1+l_1)} + r_1r_2e^{-ik2(d_1+l)}\right)}{(1 - r_1r_2e^{-ik2(d_1+d_2+l)})} \tag{2.3}$$

where $k = \omega/c(1 - i\,\eta/2)$, in which η is the loss factor of the pipe, and c is the acoustic wavespeed; r_1, r_2 are pressure reflection coefficients at the two ends, l_1, is the distance between sensor 1 and reflection point 1 and l_2 is the distance between sensor 2 and reflection point 2. For pressure measurements with high signal to noise ratio the leak spectrum from Eq.(2.1) is equal to,

$$S_{ll}(\omega) = \frac{S_{x_1x_2}(\omega)}{H^*(\omega, d_1)H(\omega, d_2)} = \frac{S_{x_1x_1}(\omega)}{|H(\omega, d_1)|^2} = \frac{S_{x_2x_2}(\omega)}{|H(\omega, d_2)|^2} \tag{2.4}$$

However, because there was a discrepancy between the predicted and measured resonant frequencies, the inversion of the pipe response using Eq. (2.4) was imperfect with some residual pipe response remaining in the leak noise estimate. Reasons for this discrepancy include inaccurate wave speed and loss factor estimates, complex behaviour arising from the fact that one part of the pipe was in a coil and another part inclined. A pragmatic approach was therefore adopted by

setting $r_1 = r_2 = 0$ in Eqs. (2.2) and (2.3), which allows for the inclusion of the main effect of the pipe attenuation due to direct wave transmission between the leak and the hydrophones but does not attempt to invert for subsequent reflections, and hence the resonance properties of the pipe. The wavespeed and pipe attenuation was estimated from estimated pipe properties supplied by the pipe manufacturer.

2.6 Leak noise spectra for different leak sizes and flow velocities

The leak spectrum was estimated for various combinations of hole sizes and flow velocities. In Fig. 2.4 an example of the leak spectrum for the 1.5 mm leak is shown for two different flow velocities. The background noise level is also shown for comparison. The dashed lines represent a frequency power law of $1/\omega^n$ where n is a positive integer that best matches the slope of each part of the leak spectrum. The characteristic frequency at which the spectrum slope changes is also shown for the different cases.

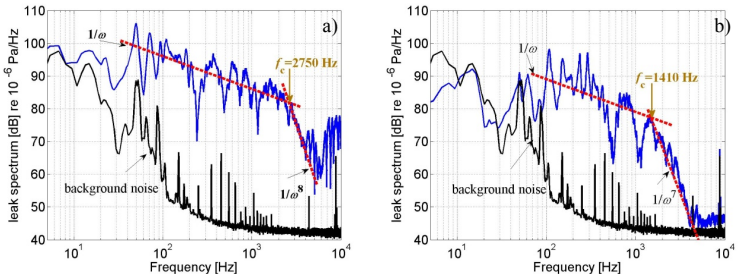


Figure 2.4 Leak spectra for the leak from the 1.5 mm hole; (a) V = 8.5 m/s; (b) V = 2.9 m/s.

Figure 2.4 suggests that the leak spectrum decays w ith a $1/\omega$ frequency power law up to a specific critical frequency f_c, which is velocity and leak diameter dependent. After this critical frequency the decay of the leak spectrum is much higher, following a frequency power law of $1/\omega^n$ where $n \approx 8$. Although strong resonances are apparent in the results due to the finite pipe length, this general trend of the leak noise spectrum can clearly be seen.

The critical frequency f_c was found to be proportional to V for all the different leak sizes. This linear behaviour suggested that f_c follows a constant Strouhal number dependence, $St_c = f_c L/V$ where L is a characteristic turbulence length-scale. Re-plotting the critical frequency in terms of the critical Strouhal number for all the different cases, with the characteristic length L chosen to be equal to the leak diameter d, showed that the critical Strouhal numbers defined with respect to leak hole diameters are weakly dependent upon velocity, as expected, but are strongly dependent upon leak hole diameters. This suggests that the leak hole diameter is the incorrect 'length-scale' with which to establish a universal constant Strouhal number for bringing together the critical frequencies obtained at different velocities and leak hole diameters. This was not surprising as the characteristic length–scale must be related to a characteristic dimension of the water jet that is

responsible for the generation of the turbulence in the water jet that generates the noise in the pipe. This is most likely to be related to the shear layer thickness of the water jet.

2.7 Procedure for the estimation of the characteristic length for the evaluation of a leak size-independent Strouhal number

In order to determine the variation of L with d that gives a d-independent Strouhal number, St_{co} for the critical frequency f_c, a non-dimensional scaling factor $F(d)$ on d is defined as,

$$F(d) = L(d)/d \tag{2.5}$$

such that St_c is constant for all d and V. Thus,

$$St_{co} = f_c(d)L(d)/V = \text{const} \tag{2.6}$$

where St_{co} is independent of d and V. Substituting $L(d) = F(d)d$ in Eq.(2.6) gives,

$$F(d) = St_{co}V/f_c(d)d = St_{co}/St_c(d) \tag{2.7}$$

The d-independent Strouhal number, $St_{c,o}$ is chosen arbitrarily, but with the condition that $F(d) < 1$ as it must be physically, since the turbulence generating region L must be within the water jet and hence $L < d$ and therefore $F(d) < 1$. A good fit to $F(d)$ for $St_{c,o} = 0.1$ is achieved for the ratio $0.25/d$ and thus $L \approx 0.25$ mm.

2.8 An empirical model for the leak noise spectrum

Using the information presented in the previous sections a general model for the leak noise spectrum is proposed. Thus,

$$S_{ll}(\omega) = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{A}(V,d)}{\omega} & \omega \le \omega_c \\ \dfrac{\mathrm{A}(V,d)\omega_c{}^{n-1}}{\omega^n} & \omega_c \le \omega \le \infty \end{cases} \tag{2.8}$$

where $\mathrm{A}(V,d)$ is a measure of the leak source strength, which varies with leak and pipe diameter d, D and jet velocity V and which has units of squared pressure where,

$$\omega_c = 2\pi\frac{St_{co}V}{L} = 2\pi\frac{0.1V}{L} \tag{2.9}$$

The form of Eq.(2.8) is chosen to ensure continuity at $\omega = \omega_c$. To obtain an estimate of the source strength $\mathrm{A}(V,d)$ the variation of mean square pressure with velocity was investigated for different leak sizes and variation of mean square pressure with leak diameter for different velocities. It was found that the mean square pressure is proportional to V^2 and d^3. Using this proportionality the leak noise source level $\mathrm{A}(V,d)$ can be written in the form,

$$A(V,d) = A_o\left(d/d_{ref}\right)^3\left(V/V_{ref}\right)^2\left(D_{ref}/D\right)^2 \tag{2.10}$$

where A_o is a constant with dimensions $[\mathrm{Pa}^2]$ and is independent of the d and V, d_{ref} and D_{ref} is a reference leak and pipe diameter taken equal to 1m and V_{ref} is a reference velocity taken equal to 1 $\mathrm{m/s}$. The factor $\left(D_{ref}/D\right)^2$ has been included to

allow for the effect of pipe diameter D. Combining Eqs.(2.8) and (2.10) A_o for $\omega \leq \omega_c$ is given by,

$$A_o = \frac{S_{ll}(\omega)\omega\left(D/D_{ref}\right)^2}{\left(d/d_{ref}\right)^3\left(V/V_{ref}\right)^2} \tag{2.11}$$

From measurements it was found that,

$$A_o = 10^4 \text{ Pa}^2 \tag{2.12}$$

It is useful for practical purposes to express the leak noise spectrum in dB (re 10^{-6} Pa/Hz). Thus, for $\omega \leq \omega_c$

$$SPL_{ll} = 160 - 10\log_{10}(\omega) + 30\log_{10}(d/d_{\text{ref}}) + 20\log_{10}(V/V_{\text{ref}}) - 20\log_{10}(D/D_{\text{ref}}) \tag{2.13}$$

2.9 Normalized leak spectrum as a function of Strouhal number

In this section, the empirical model presented above is applied to the experimental data for all the different leak sizes and flow velocities to collapse them around the value of 1. In Fig. 2.5 Eq. (28) normalized on A_o is plotted as a function of the Strouhal number for all the leak sizes. The critical Strouhal number $\text{St}_{co} = 0.1$ is also indicated.

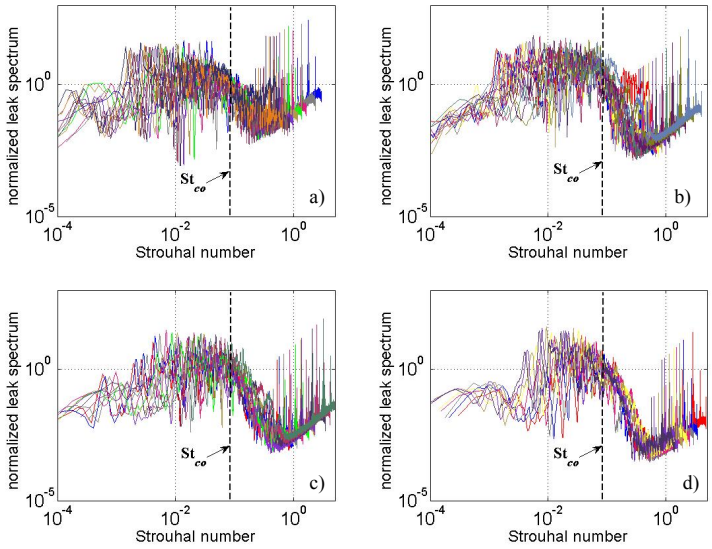


Figure 2.5 Leak spectrum normalized on $\boldsymbol{V}$, $\boldsymbol{d}$, $\boldsymbol{D}$ *and* $\boldsymbol{A_o}$ *versus Strouhal number for the different leak sizes (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm.*

Figure 2.5 suggests that normalizing the pressure spectrum on V^2, d^3, D^2 and A_o provides a reasonable collapse of data for all the different leaks. Although the pipe resonances have a strong effect on the appearance of the leak spectrum and its general trend can be clearly seen.

3. Conclusions

This paper has described a series of experiments to determine the mechanism of leak noise generation in plastic water pipes. It was found that this mechanism is related to turbulent flow rather than cavitation. At lower flow velocities, noise due to the flow could be related to axisymmetric instability waves in the jet. For higher flow velocities instability waves were not visible, possibly due to masking by the strong pipe resonances. The results showed that until a critical frequency the spectrum decays with a power law of $1/\omega$. Above this frequency the frequency power law was found to be approximately $1/\omega^8$. An estimate of the leak noise source level was determined and an empirical model that describes the leak noise spectrum was established.

4. References

[1] O. Hunaidi, W. Chu, A. Wang, W. Guan, «Detecting Leaks in Plastic Water Distribution Pipes», Journal of the American Water Works Association, vol. **92**, pp. 88-94, 2000.

[2] H. V. Fuchs, R. Riehle, «Ten Years of Experience with Leak Detection by Acoustic Signal Analysis», Applied Acoustics, vol. **33**, pp. 1-19, 1991.

[3] D. A. Liston, J. D. Liston, «Leak Detection Techniques», Journal of the New England Water Works Association, vol. **106**, pp. 103-108, 1992.

[4] G. J. Weil, «Non contact, remote sensing of buried water pipeline leaks using infrared thermography», Water Resources Planning and Management and Urban Water *Resources,* pp. 404-407, 1993.

[5] R. S. Pudar, J. A. Liggett, «Leaks in Pipe Networks», Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. **118**, pp. 1031-1046, 1992.

[6] D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, 1976.

[7] H. C. Pumphrey, J. E. Ffowcs Williams, «Bubbles as Sources of Ambient Noise», *IEEE* Journal of Oceanic Engineering, vol. **15**, pp. 268-274, 1990.

[8] J. W. Hoyt, J. J. Taylor, C. D. Runge, «The structure of jets of water and polymer solution in air», Journal of Fluid Mechanics, vol. **63**, pp. 635-640, 1974.

[9] J. W. Hoyt, J. J. Taylor, «Waves on water jets», Journal of Fluid Mechanics, vol. **83**, pp. 119-127, 1977.

[10] J. W. Hoyt, J. J. Taylor, «Turbulence structure in a water jet discharging in air», The Physics of Fluids, vol. **20**, pp. S253-S257, 1977.

[11] V. C. Patel, M. R. Head, «Reversion of turbulent to laminar flow», Journal of Fluid Mechanics, vol. **34**, pp. 371-392, 1968.

[12] M. A. B. Narayanan, V. Ramjee, «On the criteria for reverse transition in a two-dimensional boundary layer flow», Journal of Fluid Mechanics, vol. **35**, pp. 225-241, 1969.

[13] M. Thompson, D.J. Allwright, C. J. Chapman, S. D. Howison, J. R. Ockendon, «Noise generation by water pipe leaks», Study report of 40th European Study group with industry, pp. D1-D6, 2001.

[14] R. J. Pinnington, A. R. Briscoe, «Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe», Journal of Sound and Vibration, vol. **173**, pp. 503-516, 1994.

[15] A. Papastefanou, *An experimental investigation of leak noise from water filled plastic pipes*, Thesis (PhD), ISVR, University of Southampton, 2011.

[16] Y. Gao, M. J. Brennan, P. F. Joseph, «On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes», Journal of Sound and Vibration, vol. **325**, pp. 649-663, 2009.

Ανάπτυξη Συστήματος Ηχομέτρησης σε Φορητή Πλατφόρμα Κινητής Τηλεφωνίας

Αντώνιος Σαρρής
Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
sarris.antonis@gmail.com
Τηλ. 6978626014

Ανδρέας Φλώρος
Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
floros@ionio.gr
Τηλ. 2661087725
Φαξ: 2661087866

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός συστήματος λογισμικού μετρήσεων ηχοστάθμης σε πλατφόρμα κινητής τηλεφωνίας, αξιοποιώντας το μικρόφωνο που διαθέτει η συσκευή για την καταγραφή και διαχείριση των ηχητικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο. Η εργασία θεμελιώνεται πάνω στην θεωρητική μελέτη του ακουστικού θορύβου, των μεθοδολογιών μέτρησης του επιπέδου ηχητικής πίεσης και συναφών θεμάτων ψηφιακής επεξεργασίας ήχου αναδεικνύοντας την ικανοποιησιμότητα των απαιτήσεων που εισάγουν οι παραπάνω διαδικασίες επεξεργασίας σήματος από την άποψη της υπολογιστικής ισχύος και των αναγκών μνήμης από μια κινητή πλατφόρμα. Συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι μια χαμηλού κόστους εφαρμογή κινητής τηλεφωνίας μπορεί να πραγματοποιήσει υψηλής ταχύτητας και ικανοποιητικής ακρίβειας μετρήσεις ηχοστάθμης χωρίς τη χρήση εξειδικευμένων υψηλού κόστους μετρητικών συσκευών.

Design and development of a software application that measures sound levels on a mobile telephone platform

ABSTRACT

This paper presents the development of a software system that performs Sound Pressure Level measurements on a mobile platform through the utilization of the inbuilt microphone device for the real-time recording and management of the sound signals. This paper is based upon the theoretical study of acoustic noise, the corresponding methodologies for measuring SPL and the relevant subjects of digital signal processing, emphasizing on the feasibility of the relevant signal processing procedures in terms of the computational power and memory needed in order to run on a mobile platform. Specifically, our work demonstrates that a low cost mobile application can perform fast SPL measurements of reasonable accuracy without relying on high cost specialized measuring devices.

Εισαγωγή

Οι εξελίξεις στον τομέα ανάπτυξης φορητών συστημάτων έχουν επιτρέψει την υποστήριξη νέων, πολλές φορές καινοτόμων, μορφών εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές συχνά ξεφεύγουν από τα στενά όρια της επικοινωνίας και στηρίζονται σε ειδικά σχεδιασμένα αναπτυξιακά περιβάλλοντα (SDKs), επιτρέποντας την πλήρη χρησιμοποίηση των λειτουργικών υπομονάδων των συσκευών.

Βασικό αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας εφαρμογής λογισμικού για την μέτρηση της ηχητικής στάθμης σε μια φορητή συσκευή κινητής τηλεφωνίας. Στις τεχνικές δυνατότητες της εφαρμογής συμπεριλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού συστήματος μέτρησης όπως:

- Λειτουργία καταγραφής fast /slow και καθορισμού της χρονικής ανάλυσης.
- Μέτρηση στιγμιαίας ηχοστάθμης με χρήση καμπυλών A, B, C πέραν της γραμμικής μέτρησης (Lin).
- Μέτρηση μέσης, ελάχιστης και μέγιστης τιμής ηχοστάθμης.
- Δυνατότητα αποστολής των δεδομένων των μετρήσεων μέσω email.
- Εμφάνιση λεκτικής αναφοράς τυπικών πηγών θορύβου.
- Επιλογή μεταξύ (3) διαφορετικών γραφικών απεικονίσεων της μέτρησης.

Για την υλοποίηση των προαναφερθέντων τεχνικών προδιαγραφών απαιτήθηκε η θεωρητική μελέτη των μεθοδολογιών μέτρησης του επιπέδου ηχητικής πίεσης και συναφών θεμάτων ψηφιακής επεξεργασίας ήχου [1], [2], [3], [5], [6].

Η εξέταση των ως άνω χαρακτηριστικών αποτελεί τη βάση για την επιλογή της πλατφόρμας κινητής τηλεφωνίας για την υλοποίηση της εφαρμογής, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το σύστημα iOS. Η επιλογή της πλατφόρμας καθορίζει και το αναπτυξιακό περιβάλλον που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, το οποίο για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το Xcode και η γλώσσα προγραμματισμού Objective C. Η ανάπτυξη του συστήματος λογισμικού πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τη μεθοδολογία ICONIX, η οποία βασίζεται στην αξιοποίηση ενός υποσυνόλου της UML [4].

Κύρια επιδίωξη της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του κατά πόσο είναι εφικτή η προγραμματιστική υλοποίηση των σχετιζόμενων εννοιών επεξεργασίας ακουστικού σήματος στα πλαίσια μιας εφαρμογής που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των υπολογισμών που πρέπει να πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τις ανάγκες σε μνήμη, διερευνήθηκαν αποδοτικοί τρόποι υπερκέρασης αυτών των προβλημάτων μέσω της χρήσης εξειδικευμένων βιβλιοθηκών λογισμικού. Μάλιστα, τα πειραματικά αποτελέσματα που παραθέτουμε αποδεικνύουν όχι μόνο την εφικτότητα της υλοποίησης των απαιτούμενων υπολογισμών στην κινητή πλατφόρμα, αλλά επιπλέον τεκμηριώνουν την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας μετρήσεων, μέσω μιας συσκευής χαμηλού κόστους.

Η οργάνωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής: στην Ενότητα 1 παρατίθεται μια συγκριτική επισκόπηση συναφών εφαρμογών. Στην Ενότητα 2 πραγματοποιείται η θεωρητική μελέτη για τον υπολογισμό της στάθμης ηχητικής πίεσης, ενώ η Ενότητα 3 επικεντρώνεται στην λεπτομερέστερη περιγραφή του συστήματος λογισμικού που υλοποιήθηκε. Η Ενότητα 4 παρουσιάζει τη διαδικασία βαθμονόμησης και τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων που διενεργήθηκαν με χρήση της εφαρμογής. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές επεκτάσεις που περιγράφονται στην Ενότητα 5.

1. Συναφείς Εφαρμογές

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε (iSPL PRO) συγκρίθηκε ως προς τις δυνατότητες που προσφέρει σε σχέση με τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές ηχομέτρησης στο App Store. Οι δυνατότητες των εφαρμογών που εξετάσθηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1 είναι:

I. Λειτουργία Fast / slow (αφορά στην ταχύτητα απόκρισης του συστήματος)
II. Μέτρηση με την χρήση φίλτρων στάθμισης
III. Βαθμονόμηση για εξασφάλιση της ορθότητας μέτρησης
IV. Καταγραφή και αποστολή μετρήσεων με email
V. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων
VI. Βελόνα ένδειξης (αναλογική)
VII. Διάφορες επιπλέον δυνατότητες.

Πίνακας 1.1 Συγκριτική Επισκόπηση Συναφών Εφαρμογών

Εφαρμογή	I	II	III	IV	V	VI	VII
iSPL PRO	Ναι	A, B, C, Lin	Ναι	Ναι	3 & λεκτική περιγραφή	Ναι	Min, Max, Time Resolution
Audio Tool	Sensitivity	A, B, C, Lin	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Max, peak
dB Volume	Ναι	A, B, C, Lin	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	hold
Decibel 10	Sensitivity	-	Ναι	Όχι	Ναι & λεκτική περιγραφή	Ναι	Max, Peak
Decibel Meter	Ναι	-	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	peak
Decibel Ultra	Rate	C	Ναι	Ναι	2 γραφικές	Ναι	Peak, offset
Decibelite	Όχι	-	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Max
Decibels	Όχι	-	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	-
Noise Meter	Όχι	-	Όχι	Όχι	Λεκτική περιγραφή	Όχι	Peak
Noise meter EoE	Όχι	-	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Peak, eye on earth
Sound Level	Όχι	-	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	-
SoundMeter	Όχι	-	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Max, peak
UE SPL	Όχι	-	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Peak

Από τον παραπάνω πίνακα είναι προφανές ότι η εφαρμογή iSPL PRO ενσωματώνει τεχνικές δυνατότητες όπως α) απεικόνιση των αποτελεσμάτων με εναλλακτικούς τρόπους - γραφικές παραστάσεις που δεν υπάρχουν συγκεντρωμένες σε άλλη εφαρμογή και β) είναι η μόνη που παρέχει την δυνατότητα καθορισμού της χρονικής ανάλυσης της μέτρησης.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Θεωρούμε ένα ηχογραφημένο ηχητικό σήμα $x(t)$ $(0 \leq t \leq T)$, όπου T είναι ο συνολικός χρόνος καταγραφής του σήματος σε δευτερόλεπτα. Η συχνότητα

δειγματοληψίας για την καταγραφή του είναι Fs (Hz) και κατ' επέκταση αναπαρίσταται από ένα σύνολο δειγμάτων πλήθους Fs · T [7].

Ο υπολογισμός της στάθμης ηχητικής πίεσης χωρίς ή με στάθμιση (A, B ή C) για το παραπάνω σήμα γίνεται ως εξής:

1. Το σύνολο των δειγμάτων χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενα παράθυρα χρονικού μήκους Δt, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας.
2. Υπολογίζεται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) X(k), $0 \le k \le N-1$ για κάθε παράθυρο, όπου N το πλήθος των λαμβανόμενων δειγμάτων.
3. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι σταθμίσεις για το συγκεκριμένο παράθυρο: $X_w(k) = \alpha_w(f_k) \cdot X(k)$ για $f_k = k \cdot \Delta f$ με $\Delta f = F_s / N$ και W είναι η στάθμιση (A, B ή C):
   - $\alpha_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2+20{,}6^2)\cdot(f^2+12200^2)\cdot((f^2+107{,}7^2)^{0{,}5})\cdot((f^2+737.9^2)^{0{,}5})}$ (2.1)
   - $\alpha_B(f) = \frac{12200^2 \cdot f^3}{(f^2+20{,}6^2)\cdot(f^2+12200^2)\cdot((f^2+158{,}5^2)^{0{,}5})}$ (2.2)
   - $\alpha_C(f) = \frac{12200^2 \cdot f^2}{(f^2+20{,}6^2)\cdot(f^2+12200^2)}$ (2.3)
4. Υπολογίζεται η ενέργεια ε_x του σήματος για το συγκεκριμένο παράθυρο, λαμβάνοντας υπόψη την χρησιμοποιούμενη στάθμιση:
$$\varepsilon_x = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_w(k)|^2 \quad (2.4)$$

Επομένως, η μέση ενέργεια του σήματος για κάθε δυνατή στάθμιση θα δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{1}{N*\Delta t} \sum_{k=0}^{N-1} |X_w(k)|^2 \quad (2.5)$$

5. Η στάθμη ηχητικής πίεσης υπολογίζεται ως:
$$SPL = 10log_{10}\left(\frac{\bar{\varepsilon}_x}{\bar{\varepsilon}_{ref}}\right) = 10log_{10}(\bar{\varepsilon}_x) - 10log_{10}(\bar{\varepsilon}_{ref}) \quad (2.6)$$

όπου οι μονάδες, ανάλογα με τον τύπο στάθμισης, είναι dB, dBA, dBB, dBC.

Η ποσότητα $\bar{\varepsilon}_{ref}$ είναι η ενέργεια του επιπέδου αναφοράς, η οποία είναι μία σταθερά, γεγονός που σημαίνει πως ο όρος $10log_{10}(\bar{\varepsilon}_{ref})$ μπορεί να αντικατασταθεί από μία σταθερά C που ενσωματώνει και την απόκλιση από τις πραγματικές τιμές τις ηχητικής πίεσης και λειτουργεί ως παράμετρος βαθμονόμησης. Έτσι, έχουμε:

$$SPL = 10log_{10}\left(\frac{\bar{\varepsilon}_x}{\bar{\varepsilon}_{ref}}\right) = 10log_{10}(\bar{\varepsilon}_x) + C, \quad (2.7)$$

όπου C είναι η σταθερά βαθμονόμησης.

Ο υπολογισμός της σταθεράς C προφανώς προϋποθέτει την ύπαρξη γνωστών μετρήσεων ηχοστάθμης του αρχικού σήματος ανά Δt. Γνωρίζοντας την τιμή της και εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία για το σύνολο των χρονικών παραθύρων για την συνολική χρονική διάρκεια T της μέτρησης, μπορούμε τελικά να υπολογίσουμε την χρονική εξέλιξη της πραγματικής τιμής της ηχοστάθμης.

3. Εφαρμογή iSPL PRO

3.1. Επισκόπηση Συστήματος

Το σύστημα λειτουργεί με σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας ίση προς 44.1kHz, οι δε καταγραφόμενες από το μικρόφωνο τιμές ακουστικής πίεσης μετατρέπονται σε ψηφιακές (ακέραιες, ευκρίνειας κβαντισμού ίσης προς 16 bit). Οι παραπάνω τιμές ομαδοποιούνται σε blocks, το μέγεθος των οποίων και η συχνότητα λήψης τους εξαρτάται από την επιλογή του χρήστη ανάμεσα σε slow ή fast για τον τρόπο λειτουργίας του μετρητικού συστήματος και ανάμεσα σε high ή normal ή low ανάλογα με την επιθυμητή τιμή της χρονικής ανάλυσης (Πίνακας 3.1). Η λειτουργία αυτή αποτελεί και μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες της εφαρμογής, η οποία δεν απαντάται σε αντίστοιχα συστήματα μέτρησης ηχοστάθμης που υλοποιούνται σε επίπεδο λογισμικού.

Πίνακας 3.1 Τιμές Εφαρμοζόμενης Χρονικής Ανάλυσης

	High		Normal		Low	
Λειτουργία	Πλήθος δειγμάτων	Χρονική διάρκεια block (msec)	Πλήθος δειγμάτων	Χρονική διάρκεια block (msec)	Πλήθος δειγμάτων	Χρονική διάρκεια block (msec)
Fast	512	11.610	1024	23.220	2048	46.440
Slow	4096	92.880	8192	185.760	16384	371.519

Οι λαμβανόμενες τιμές ακουστικού σήματος ανά block κανονικοποιούνται στο διάστημα [-1,1] και υπολογίζονται ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) και η συχνοτική απόκριση του φίλτρου (A, B, C ή Lin). Στην συνέχεια υπολογίζονται τα τετράγωνα των συντελεστών Fourier και τα τετράγωνα της απόκρισης του φίλτρου για το συγκεκριμένο block επεξεργασίας. Οι δύο πίνακες τετραγώνων πολλαπλασιάζονται ανά στοιχείο και τελικά υπολογίζεται το άθροισμα των τιμών του Πίνακα 3.1. Το άθροισμα αυτό είναι ίσο με την συνολική ενέργεια του σταθμισμένου σήματος. Από την συνολική ενέργεια του σταθμισμένου σήματος υπολογίζεται η τιμή της μέσης ενέργειας από την οποία προκύπτει τελικά η στιγμιαία τιμή της ηχοστάθμης ανά block ηχητικών δειγμάτων. Η τιμή της τρέχουσας ηχοστάθμης προκύπτει ως ο μέσος όρος των n τελευταίων μετρήσεων της στιγμιαίας ηχοστάθμης, όπου n είναι το πλήθος των block που αντιστοιχούν στην χρονική διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

3.2. Διεπαφή εφαρμογής

Η εφαρμογή iSPL PRO αποτελείται από τρεις βασικές οθόνες: την οθόνη μετρήσεων, την οθόνη επιλογών – ρυθμίσεων και την οθόνη πληροφοριών (Σχήμα 3.1). Στη αρχική οθόνη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, οι γραφικές παραστάσεις και η λεκτική απεικόνιση. Η λεκτική απεικόνιση των μετρήσεων εμφανίζεται μόνο όταν οι μετρήσεις γίνονται χωρίς στάθμιση (Linear). Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την τιμή της στιγμιαίας ηχοστάθμης εμφανίζεται λεκτικά και με διαφορετικό χρώμα η τυπική πηγή θορύβου, που αντιστοιχεί στην τιμή του πίνακα που εμφανίζεται στην οθόνη πληροφοριών. Επίσης, στην οθόνη αυτή υπάρχουν και τα κουμπιά για εκκίνηση, τερματισμό ή παύση των μετρήσεων, καθώς και το κουμπί για την αποστολή των αποτελεσμάτων με email υπό μορφή απλού κειμένου. Τέλος, στην οθόνη επιλογών – ρυθμίσεων δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει τις παραμέτρους του συστήματος, όπως τη σταθερά βαθμονόμησης, τη λειτουργία καταγραφής, τις σταθμίσεις και το μέγεθος του block επεξεργασίας. Τέλος, η οθόνη πληροφοριών παρέχει τη βοήθεια της εφαρμογής και τις σχετικές με αυτήν γενικές πληροφορίες.



Σχήμα 3.1 Στιγμιότυπα Εφαρμογής iSPL Pro

4. Πειραματικά Αποτελέσματα

4.1. Βαθμονόμηση

Η εφαρμογή iSPL PRO χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν μετρήσεις τυπικών μορφών θορύβου και σύγκριση των αποτελεσμάτων με εξειδικευμένη μετρητική συσκευή. Η επιλογή της εφαρμογής που χρησιμοποιήθηκε για τις συγκριτικές μετρήσεις έγινε μετά από μελέτη των δυνατοτήτων των εφαρμογών ηχομέτρησης στο App Store που παρουσιάσθηκαν στον Πίνακα 1.1. Οι περισσότερες εφαρμογές δεν διευκρινίζουν αν οι μετρήσεις γίνονται με στάθμιση ή όχι και είναι προφανές ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση. Από τις εφαρμογές που αναφέρουν την στάθμιση που χρησιμοποιούν υπάρχουν μόνο δύο (dB Volume, Audio Tool) οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ανάμεσα στάθμιση A, B, C ή Lin. Από τις εφαρμογές αυτές, μόνο η Audio Tool δίνει τη δυνατότητα βαθμονόμησης και καταχώρισης μέγιστης τιμής. Οι δύο αυτές δυνατότητες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τις συγκριτικές δοκιμές. Η βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε ώστε να βαθμονομηθεί η συσκευή με ένα πραγματικό ηχόμετρο και η μέγιστη τιμή βοήθησε στη σύγκριση, διότι στην καταγραφή της τιμής δεν υπεισέρχεται ο χρήστης. Η εφαρμογή Audio Tool έχει αναπτυχθεί από την αμερικάνικη εταιρεία Performance Audio που ειδικεύεται στα επαγγελματικά συστήματα ήχου και εξοπλισμού.

Η βαθμονόμηση των εφαρμογών πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της εταιρείας QAC – ΚΑΡΙΝΙΩΤΑΚΗΣ Κ. & ΣΙΑ ΕΕ. Το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο αναφοράς ήταν τύπου 1, το BRUEL & KJAER, TYPE 2250 Light, [8], [9], [10], [11]. Η εφαρμογή AudioTool είχε εγκατασταθεί σε συσκευή iPhone 4S και η iSPL PRO είχε εγκατασταθεί σε iPhone 4.Για την βαθμονόμηση των εφαρμογών ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Τοποθετήθηκαν οι συσκευές δίπλα στο ηχόμετρο ώστε να έχουν την ίδια απόσταση από την πηγή παραγωγής σήματος.

2. Παράχθηκε τόνος συχνότητας 1kHz.
3. Καταγράφηκαν οι ενδείξεις του ηχομέτρου και των συσκευών.
4. Υπολογίσθηκε από τις διαφορές των ενδείξεων η τιμή της σταθεράς βαθμονόμησης [12].

4.2. Μέτρηση Τυπικών Πηγών Θορύβου - Συγκριτικές Μετρήσεις

Έχοντας βαθμονομήσει τις εφαρμογές iSPL PRO και Audio Tool πραγματοποιήθηκαν συγκριτικές μετρήσεις σε τυπικά περιβάλλοντα ακουστικής μέτρησης, όπως σε εθνική οδό, σε δρόμο ήπιας κυκλοφορίας, μέσα σε κατάστημα και σε ήσυχο δωμάτιο. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να καλυφθούν διαφορετικές πηγές θορύβου και να ελεγχθεί η εφαρμογή σε απότομες και γρήγορες μεταβολές όπως η εθνική οδός, αλλά και σε μη έντονες μεταβολές όπως στο ήσυχο δωμάτιο. Κάθε μέτρηση είχε διάρκεια 2 λεπτά και οι καταγραφές της στιγμιαίας ηχοστάθμης γίνονταν ανά 15 δευτερόλεπτα σε χαρτί, ενώ με το πέρας του χρόνου σημειώνονταν και οι μέγιστες τιμές. Οι μετρήσεις που εμφανίζονται στους Πίνακες 4.1 – 4.4 πραγματοποιήθηκαν με στάθμιση A, ενώ οι επιλογές της εφαρμογής που αναπτύχθηκε ήταν "Normal" και "slow". Σημειώνεται ότι η εφαρμογή Audio Tools δίνει την τιμή της ηχοστάθμης σε ακέραιο αριθμό.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα μέτρησης κυκλοφοριακού θορύβου

Χρόνος	L max db(A)	L min db(A)	L db(A) 00:15	L db(A) 00:30	L db(A) 00:45	L db(A) 01:00	L db(A) 01:15	L db(A) 01:30	L db(A) 01:45	L db(A) 02:00
Audio Tool	99	-	76	72	78	79	81	69	76	80
iSPL PRO	97,8	68.3	75.6	73.2	77.2	78.4	81.6	70.4	75.2	79.1

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα μέτρησης σε δρόμο ήπιας κυκλοφορίας

Χρόνος	L max db(A)	L min db(A)	L db(A) 00:15	L db(A) 00:30	L db(A) 00:45	L db(A) 01:00	L db(A) 01:15	L db(A) 01:30	L db(A) 01:45	L db(A) 02:00
Audio Tool	87	-	58	57	57	62	62	58	72	58
iSPL PRO	86,3	51,3	58,5	57,9	57,4	62,6	61,8	58,3	73,4	58,2

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα μέτρησης σε κατάστημα (supermarket)

Χρόνος	L max db(A)	L min db(A)	L db(A) 00:15	L db(A) 00:30	L db(A) 00:45	L db(A) 01:00	L db(A) 01:15	L db(A) 01:30	L db(A) 01:45	L db(A) 02:00
Audio Tool	92	-	53	52	71	69	54	59	65	56
iSPL PRO	91,6	46,5	53,3	52,1	70,8	69,2	53,7	58,9	65,0	56,3

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα μέτρησης σε ήσυχο δωμάτιο

Χρόνος	L max db(A)	L min db(A)	L db(A) 00:15	L db(A) 00:30	L db(A) 00:45	L db(A) 01:00	L db(A) 01:15	L db(A) 01:30	L db(A) 01:45	L db(A) 02:00
Audio Tool	51	-	35	35	37	36	36	35	44	37
iSPL PRO	50,2	34,3	35,2	35,8	37,4	35,6	35,7	35,2	44,1	37,4

Από την σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι οι τιμές σχεδόν ταυτίζονται. Η μέγιστη διαφορά που σημειώθηκε ήταν 1,4 dB(A) στην μέτρηση του κυκλοφοριακού θορύβου. Στις μετρήσεις που έγιναν στο κατάστημα η μέγιστη διαφορά ήταν 0,3 dB(A) ενώ στις μετρήσεις σε ήσυχο δωμάτιο η μέγιστη διαφορά ήταν 0,8 dB(A). Οι διαφορές αυτές είναι πάρα πολύ μικρές και περιορίζονται στην πράξη ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι η εφαρμογή Audio Tool δεν χρησιμοποιεί δεκαδικά ψηφία.

5. Συμπεράσματα & Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η εργασία αυτή αναδεικνύει τη σημαντικότητα ανάπτυξης μιας εφαρμογής μέτρησης της στάθμης ηχητικής πίεσης σε μια πλατφόρμα κινητής τηλεφωνίας σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι το χαμηλό συνολικό κόστος δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των πραγματοποιούμενων μετρήσεων. Όπως προκύπτει από την διαδικασία ελέγχου της εφαρμογής τεκμηριώνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια μέτρησης η οποία να είναι αποδεκτή σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, παρέχοντας γρήγορες / ενδεικτικές μετρήσεις χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένων, υψηλού κόστους, μετρητικών συσκευών.

Στις μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος θα μπορούσε να είναι η φασματική ανάλυση του θορυβικού σήματος προκειμένου να αναδειχθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Όπως είναι ευρύτατα γνωστό, η ανθρώπινη ακοή είναι περισσότερο ευαίσθητη σε ορισμένες συχνότητες. Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητό να γνωρίζουμε τον τρόπο κατανομής της ηχητικής ενέργειας σε όλο το ακουστό ηχητικό φάσμα. Αυτό στην πράξη μπορεί να επιτευχθεί υποδιαιρώντας τον θόρυβο σε οκτάβες και μετρώντας την στάθμη ηχητικής πίεσης κάθε οκταβικής ζώνης συχνοτήτων. Η καταγραφή των αποτελεσμάτων της μέτρησης μπορεί να δώσει μεγάλη ευελιξία αν αποθηκευτεί αυτόματα σε μία βάση δεδομένων για την περεταίρω επεξεργασία των μετρήσεων. Τέλος, μελλοντικά, η εφαρμογή iSPL Pro θα συμπεριλάβει δυνατότητες αυτόματης καταγραφής της γεωγραφικής θέσης της λαμβανόμενης μέτρησης, με σκοπό την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος δημιουργίας χαρτών θορύβου.

6. Αναφορές

[1] J. R. Hassall *Acoustic Noise Measurements* Bruel & Kjaer, (1979)

[2] J. Broch *Mechanical Vibration & shock Measurements* Bruel & Kjaer, (1980)

[3] *Noise control principle and practice* Bruel & Kjaer, (1982)

[4] Α. Χατζηγεωργίου *Ανάπτυξη συστήματος λογισμικού βάσει της μεθόδου ICONIX* ΕΑΠ, (2008)

[5] Γ. Φούσκας *Ψηφιακές επικοινωνίες* ΕΑΠ, (2002)

[6] Δ. Σκαρλάτος *Εφαρμοσμένη ακουστική* Gotsis, Πάτρα (2008)

[7] Χ. Δουληγέρης, Γ.Α. Τσιχριντής *Αρχές και Εφαρμογές σημάτων και συστημάτων* Πανεπιστήμιο Πειραιώς, (2003)

[8] ΕΛΟΤ 263.1 Ακουστική Ορολογία «Ταλαντώσεις, Δονήσεις, Ήχος, Μηχανικό σοκ»

[9] IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications

[10] IEC 61672-2 Electroacoustics - Sound level meters - Part 2: Pattern evaluation tests

[11] IEC 61672-3 Electroacoustics - Sound level meters - Part 3: Periodic tests

[12] IEC 60942 Electroacoustics - Sound calibrators

Ηχόμετρο: Σχεδιασμός και ανάπτυξη λογισμικού περιβάλλοντος ηχομέτρησης σε έξυπνο τηλέφωνο (iPhone)

Βρύσης Λάζαρος
Διπ. Μηχ., Υπ. Δρ. ΑΠΘ
vrisis_lazaros@hotmail.com

Δημούλας Χαράλαμπος
Δρ. Μηχ., Λέκτορας ΑΠΘ
babis@eng.auth.gr

Καλλίρης Γεώργιος
Δρ. Μηχ., Επ. Καθηγητής ΑΠΘ
gkal@jour.auth.gr

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στο σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση μιας εφαρμογής λογισμικού ηχομέτρησης για έξυπνα τηλέφωνα (iPhone). Πρόκειται για μια πρόταση σχεδιασμού και υλοποίησης ενός ευέλικτου και φιλικού στη χρήση περιβάλλοντος μέτρησης της ηχητικής στάθμης, που να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί από μη ειδικούς. Γνώμονας ανάπτυξης αποτέλεσε η επιδίωξη το παραγόμενο λογισμικό να παρέχει παρόμοιες λειτουργίες και ισάξιας πιστότητας μετρήσεις με μια επαγγελματική συσκευή ηχομέτρησης. Παράλληλα, δόθηκε βαρύτητα στην ενσωμάτωση επιπρόσθετων δυνατοτήτων που θα προσφέρουν πολύτιμες ευκολίες στον χρήστη και έχουν να κάνουν με τη διαχείριση των συνεδριών μέτρησης.

SPL Meter: Sound Pressure Level Meter software development on a smartphone (iPhone)

ABSTRACT

This work involves the design, development and evaluation of a software sound level meter application for smartphones (iPhone). The paper investigates the potential of implementing a flexible and user-friendly environment for measuring sound levels, which can easily be used by non-specialists. The resulting software focuses on providing similar functionality and fidelity to a professional SPL Meter. At the same time, emphasis was given to the integration of additional capabilities that will provide valuable amenities to the user, having to do with the management of measurement sessions.

1. Εισαγωγή

Το τεχνολογικό τοπίο τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει ραγδαία πρόοδο στον τομέα των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών και κυρίως των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphones). Το υπάρχον υπόβαθρο όσον αφορά το υλικό (hardware) αλλά και το λογισμικό (software) παρέχει ισχυρές δυνατότητες για την ανάπτυξη ποικίλων εφαρμογών και εργαλείων για αυτές τις συσκευές. Ειδικότερα, οι συσκευές τύπου iPhone εξοπλίζονται με υψηλών τεχνικών προδιαγραφών ηλεκτρονικά υποσυστήματα ενώ το λειτουργικό σύστημα που τρέχουν (iOS) αποτελεί μια πρόσφορη πλατφόρμα για τη δημιουργία εφαρμογών λογισμικού [1].

Τρέχουσες υλοποιήσεις ξεφεύγουν από την λογική της αποκλειστικής συσκευής ηχομέτρησης και δομούνται ψηφιακά, βασιζόμενες σε λογισμικό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι εφαρμογές «SPL» [2] και «AudioTool» [3] που είναι διαθέσιμες για τα λειτουργικά συστήματα iOS και Android αντίστοιχα. Προσφέρουν δυνατότητα μέτρησης σε SPL(A) και SPL(C), ρύθμισης της ταχύτητας σε Γρήγορο και Αργό κατά ANSI καθώς και ρύθμισης (calibration).

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ελληνικού περιβάλλοντος λογισμικού που προσφέρει τη χρηστικότητα ενός ηχομέτρου επικεντρώνοντας στην ακρίβεια των μετρήσεων, στη χρήση του εργαλείου από μη επαγγελματίες και στην εκτεταμένη παροχή δυνατοτήτων και ευκολιών διαχείρισης μετρήσεων.

2. Η εφαρμογή «Ηχόμετρο»

Η εφαρμογή παρέχει δυνατότητα μετρήσεων με χρήση διαφορετικών φίλτρων και επιλογή ταχύτητας απόκρισης, ενώ δύναται να διαχειριστεί πολλαπλές συνεδρίες μέτρησης, να ρυθμιστεί από τον χρήστη αλλά και να χρησιμοποιεί τόσο το εσωτερικό μικρόφωνο της συσκευής όσο και κάποιο εξωτερικό. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε αξιοποιώντας το πακέτο ανάπτυξης λογισμικού (Software Development Kit – SDK) iOS και γενικότερα υιοθετώντας το πεντάπτυχο: ανάλυση, σχεδιασμός, ανάπτυξη, εκσφαλμάτωση, αξιολόγηση [4]. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται περισσότερο στην παρουσίαση των παρεχόμενων λειτουργιών και στις πειραματικές διαδικασίες παραμετροποίησης – αξιολόγησης των ρυθμίσεων, παρέχοντας και τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες μηχανικής λογισμικού που υιοθετήθηκαν.

Το λογισμικό καταγράφει τον ήχο, κάνοντας χρήση του ενσωματωμένου μικροφώνου (ή εξωτερικού) που διαθέτουν τα τηλέφωνα iPhone, και έπειτα από κατάλληλη ανάλυση υπολογίζει τα δεδομένα εξόδου που προβάλλονται στον χρήστη. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο. Η καταγραφή του ήχου γίνεται με την χρήση των υπηρεσιών AudioQueues που παρέχονται από το AudioToolbox Framework του iOS SDK. Μέσω των AudioQueues είναι δυνατή η προσπέλαση των δεδομένων των Buffers που είναι υπεύθυνα για την σύλληψη του ήχου και κατά συνέπεια των δειγμάτων του ηχογραφούμενου ήχου τα οποία αποθηκεύονται προσωρινά και αφού επεξεργαστούν κατάλληλα (σχήμα 2-1), προκύπτει η ηχητική στάθμη μέσω της ενεργού τιμής των φασματικών δεδομένων του σήματος.



Σχήμα 2-1 Ροή επεξεργασίας του σήματος

2.1 Κύρια οθόνη μέτρησης

Η κύρια οθόνη της εφαρμογής παρέχει την κατάλληλη λειτουργικότητα για την πραγματοποίηση μετρήσεων στάθμης ήχου. Υπάρχουν επιλογείς για τη μεταβολή της ταχύτητας μέτρησης και του φίλτρου που χρησιμοποιείται, όπως και για την έναρξη/τερματισμό της μέτρησης. Δύο αριθμητικές ετικέτες είναι υπεύθυνες για την προβολή της τρέχουσας στάθμης και της στάθμης κορυφής, ενώ στο κέντρο υπάρχει γραφική απεικόνιση των μεγεθών (σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2 Κεντρική οθόνη μέτρησης

2.2 Ταχύτητα απόκρισης

Η ταχύτητα παρακολούθησης των μεταβολών ηχητικής στάθμης καθορίζεται από το χρονικό παράθυρο ολοκλήρωσης βάσει του οποίου υπολογίζεται η ενεργός τιμή της ακουστικής πίεσης και άρα από τον αριθμό των δειγμάτων του αντίστοιχου παραθύρου ανάλυσης Οι διαθέσιμες επιλογές είναι τρείς και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [5].

Πίνακας 2-1 Ρυθμίσεις ταχύτητας απόκρισης

Ρύθμιση	Χρόνος
Κρουστική	35ms
Γρήγορη	125ms
Αργή	1s

2.3 Φίλτρα μέτρησης

Η μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση τεσσάρων φίλτρων A, B, C και D. Στα δείγματα εφαρμόζεται μετασχηματισμός Fourier, κάνοντας χρήση αλγορίθμου FFT (προεπιλεγμένο μέγεθος fft: 512 iPhone 3GS και 4, 2048 για το ταχύτερο iPhone 4S), προκειμένου ο ήχος να αναλυθεί φασματικά. Το φασματικό περιεχόμενο τροποποιείται, έτσι ώστε να πετύχουμε την ισοστάθμιση που επιθυμούμε. Πιο συγκεκριμένα το σήμα ισοσταθμίζεται έτσι ώστε να αναιρεθεί η μη επίπεδη συχνοτική απόκριση του μικροφώνου της συσκευής. Η ισοστάθμιση στοχεύει σε εξισωμένους συντελεστές Fourier όταν η εφαρμογή συλλαμβάνει λευκό θόρυβο.

Σε επόμενο βήμα, εφαρμόζεται το κατάλληλο φίλτρο (A, B, C, D) ανάλογα με την επιλογή του χρήστη. Η επεξεργασία εκτελείται κάνοντας χρήση συναρτήσεων που ορίζουν τα παρακάτω φίλτρα [6].

$$R_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20.6^2)\sqrt{(f^2 \cdot 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)}(f^2 + 12200^2)} \tag{3.1}$$

$$A(f) = 2.0 + 20\log_{10}(R_A(f)) \tag{3.2}$$

$$R_B(f) = \frac{12200^2 \cdot f^3}{(f^2 + 20.6^2)\sqrt{(f^2 \cdot 158.2^2)}(f^2 + 12200^2)} \tag{3.3}$$

$$B(f) = 0.17 + 20\log_{10}(R_B(f)) \tag{3.4}$$

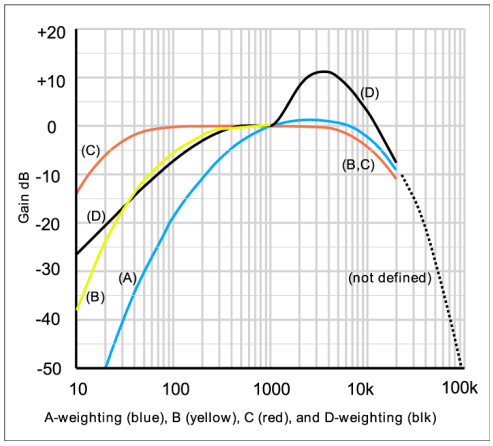
$$R_C(f) = \frac{12200^2 \cdot f^3}{(f^2 + 20.6^2)(f^2 + 12200^2)} \tag{3.5}$$

$$C(f) = 0.06 + 20\log_{10}(R_C(f)) \tag{3.6}$$

$$R_D(f) = \frac{f}{6.8966888496476 \cdot 10^{-5}}\sqrt{\frac{h(f)}{(f^2 + 79919.29)(f^2 + 1345600)}} \tag{3.7}$$

$$D(f) = 20\log_{10} R_D(f) \tag{3.8}$$

$$h(f) = \frac{(1037918.48 - f^2)^2 + 1080768.16f^2}{(9837328 - f^2)^2 + 11723776f^2} \quad (3.9)$$



Σχήμα 2-3 Καμπύλες απόκρισης των φίλτρων A, B, C και D[6]

2.4 Συνεδρίες μέτρησης

Η εφαρμογή ενσωματώνει ένα διαχειριστή συνεδριών μέτρησης που του επιτρέπει (α) τη δημιουργία νέας συνεδρίας μέτρησης, (β) τη διαγραφή συνεδρίας μέτρησης, (γ) τη συνέχιση συνεδρίας μέτρησης και (δ) την εύκολη αποστολή των δεδομένων μιας συνεδρίας μέσω e-mail. Σε κάθε συνεδρία αποθηκεύονται χρήσιμα δεδομένα μιας μέτρησης όπως (α) η χρονική διάρκεια μέτρησης, (β) η τοποθεσία μέτρησης με χρήση γεωγραφικών συντεταγμένων μέσω GPS, (γ) η μέγιστη στάθμη ήχου, (δ) η ελάχιστη στάθμη ήχου, (ε) η μέση στάθμη ήχου, (στ) πίνακας με τις τιμές στάθμης συναρτήσει του χρόνου, (ζ) σχόλια συνεδρίας.



Σχήμα 2-4 Διαχείριση συνεδριών μέτρησης και οθόνη ρύθμισης

3. Ρύθμιση

Η εφαρμογή είναι ρυθμισμένη κατάλληλα για κάθε μοντέλο iPhone (3GS, 4, 4S) έτσι ώστε να αναιρεί τη μη γραμμική απόκριση του εσωτερικού μικροφώνου και τις διαφορές που υπάρχουν στο κέρδος (gain). Ωστόσο, εάν ο χρήστης επιθυμεί, μπορεί να πραγματοποιήσει ρύθμιση (calibration) της εφαρμογής (χρήση εξωτερικού μικροφώνου). Η ρύθμιση δίνει τη δυνατότητα μεταβολής του κέρδους σε 8 περιοχές με βάση τη συχνότητα όπως και του συνολικού. Για τη ρύθμιση, πρέπει σε πρώτο στάδιο να διορθωθεί η ισοστάθμιση και σε δεύτερο το συνολικό κέρδος της μέτρησης.

Προκειμένου να επιτευχθεί επίπεδη ισοστάθμιση, και κατά συνέπεια σωστή ρύθμιση, παράγουμε ροζ θόρυβο από μια πηγή αναφοράς και είτε τροποποιούμε χειροκίνητα το κέρδος σε κάθε συχνοτική περιοχή με βάση τις ενδείξεις, είτε επιλέγουμε την αυτόματη ρύθμιση.

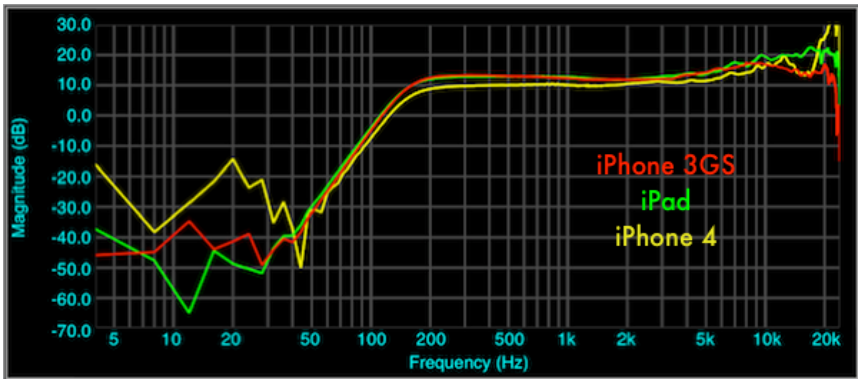
Για την ρύθμιση του συνολικού κέρδους, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηχομέτρου αναφοράς. Στην προκειμένη περίπτωση, η διαδικασία που ακολουθήθηκε και μπορεί να ακολουθηθεί και σε κάθε φάση νέας ρύθμισης είναι η ακόλουθη. Παράγουμε ροζ θόρυβο από μια πηγή και τροποποιούμε το συνολικό κέρδος της εφαρμογής κατάλληλα, έτσι ώστε να πάρουμε ένδειξη ίση με αυτήν του ηχόμετρου που έχουμε σαν αναφορά.

Σημειώνεται, πως για να πραγματοποιήσουμε ορθή ρύθμιση, πρέπει οι επιλογές όσον αφορά το φίλτρο και την ταχύτητα να είναι ίδιες τόσο στην εφαρμογή «Ηχόμετρο» όσο και στο ηχόμετρο που έχουμε σαν αναφορά.

4. Προδιαγραφές μέτρησης - Αξιολόγηση

Η ποιότητα του μικροφώνου αλλά και των κυκλωμάτων ήχου που ενσωματώνει η συσκευή iPhone δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων με μικρή απόκλιση από τις πραγματικές. Το μικρόφωνο των συσκευών έχει σχετικά επίπεδη συχνοτική απόκριση στην περιοχή 200Hz-18000Hz, αλλά όχι τέτοια που να μας επιτρέπει την διεξαγωγή αξιόπιστων μετρήσεων χωρίς ισοστάθμιση.

Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή είναι διαθέσιμη στα τρία τελευταία μοντέλα iPhone (3GS, 4, 4S) και είναι προ-ισοσταθμισμένη για κάθε μοντέλο έτσι ώστε να παράγει επίπεδη καμπύλη απόκρισης στην περιοχή 125Hz-16KHz.



Σχήμα 4-1 Συχνοτική απόκριση για διάφορα μοντέλα iPhone συσκευών χωρίς ισοστάθμιση [8]

Η δυναμική περιοχή μέτρησης βρίσκεται στα 70dB, δίνοντας τη δυνατότητα μέτρησης στο εύρος 30-100dB SPL(A). Η ρύθμιση των παραμέτρων κέρδους συνολικά αλλά για κάθε συχνοτική ζώνη έγινε με σύγκριση με επαγγελματικό ηχόμετρο. Η απόκλιση των μετρήσεων κυμαίνεται στο +/-1dB για το εύρος συχνοτήτων 125Hz-16kHz.

5. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις

Το γεγονός ότι το «Ηχόμετρο» αποτελεί προϊόν λογισμικού διευκολύνει την εύκολη και γρήγορη ανάπτυξή και τροποποίησή του. Ένας τομέας που θα βελτίωνε την αξιοπιστία των μετρήσεων είναι η χρήση διαφορετικού - εξωτερικού μικρόφωνου. Οι συσκευές iPhone φέρουν θύρα jack 3.5mm για σύνδεση μικροφώνου, οπότε υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικού μικροφώνου. Η δυνατότητα ρύθμισης των παραμέτρων μέτρησης υφίσταται, οπότε ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα εξωτερικό μικρόφωνο αφού πραγματοποιήσει ρύθμιση. Έτσι, για μεγαλύτερη ευχρηστία και ακρίβεια μέτρησης, θα μπορεί να προτείνεται ένα καταλληλότερο εξωτερικό μικρόφωνο για το οποίο η εφαρμογή να

φέρει προ-ρυθμισμένη ισοστάθμιση. Ακόμη, δυνατή είναι η προσθήκη γραφικής αναπαράστασης του φασματικού περιεχομένου του υπό μέτρηση ήχου όπως και η ενσωμάτωση επιπλέον στατιστικών για τις συνεδρίες μέτρησης όπως η ισοδύναμη συνεχής στάθμη L_{EQ}, η μέση στάθμη L_{50}, οι στάθμες φόντου L_{90}, κορυφής L_{10}, και γενικότερα L_X. Τέλος, σημαντική εξέλιξη θα αποτελούσε η ανάπτυξη της εφαρμογής και σε άλλες πλατφόρμες λογισμικού, όπως Windows Phone 8 και Android OS.

6. Αναφορές

[1] Βρύσης Λ., Κατσίμπας Φ., «SPL MASTER: Λογισμικό προσομοίωσης ηχομέτρου για iPhone/iPad» εργασία στο μάθημα Τεχνικές λήψης, επεξεργασίας και διαχείρισης ήχου (Διδάσκοντες Γ. Παπανικολάου, Γ. Καλλίρης, Χ. Δημούλας), ΔΔΠΜΣ Προηγμένα Συστήματα Υπολογιστών και Επικοινωνιών, Θεσσαλονίκη, 2011

[2] Studio Six Digital «SPL Meter», http://www.studiosixdigital.com/spl.html (τελ. Προσπέλαση 24/6/2012)

[3] Bofinit Corporation «AudioTool», http://sites.google.com/site/bofinit/ (τελ. Προσπέλαση 22/6/2012

[4] Apple «iOS Developer Library», https://developer.apple.com/library/ios/ (τελ. προσπέλαση 20/7/2012

[5] Malcolm J. Crocker, George S. K. Wong «Handbook of Noise and Vibration Control», Willey (2008)

[6] ANSI Standards S1.4-1983 και S1.42-2001

[7] Lindos «A-weighting in detail», http://www.lindos.co.uk/test_and_ measurement/SOURCE=Articles/SOURCE=Articles|VIEW=full|id=2 (τελ. προσπέλαση 16/6/2012)

[8] Faber Acoustical «iPhone 4 Audio and Frequency Response Limitations», http://blog.faberacoustical.com/2010/ios/iphone/iphone-4-audio-and-frequency-response-limitations/ (τελ. Προσπέλαση 27/7/2012)

Επεξεργασία μετρήσεων θορύβου ελικοπτέρου

Πηνελόπη Μενούνου
Επίκουρη Καθηγήτρια
Πανεπιστήμιο Πατρών
menounou@mech.upatras.gr

Πέτρος Κονδύλης
Προπτυχιακός Φοιτητής
Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επεξεργαζόμαστε διαθέσιμες μετρήσεις θορύβου ελικοπτέρου μελετώντας τις διαφορές μεταξύ των μετρήσεων σε μικρόφωνα πιστοποίησης και μικρόφωνα εδάφους. Θεωρητικά οι διαφορές αυτές οφείλονται στην επίδραση του εδάφους. Η σύγκρισή τους όμως με προλέξεις από γνωστά μοντέλα διάδοσης και ανάκλασης θορύβου σε πραγματικό έδαφος δεν μπορεί να δικαιολογήσει πλήρως τις διαφορές στα δύο ύψη μικροφώνων.

Analysis of helicopter noise measurements

ABSTRACT

In the present paper we analyze available helicopter noise measurements in order to investigate the differences between measurements at certification microphones and at ground microphones. Theoretically these differences are attributed to ground effects. Nevertheless, comparisons between measurements and predictions from well known models of sound propagation and reflection on natural ground do not fully justify the differences at these two microphones heights.

Εισαγωγή

Κατά τις μετρήσεις πιστοποίησης θορύβου ελικοπτέρων ακολουθούνται τα πρότυπα της Διεθνούς Οργάνωσης Πολιτικής Αεροπορίας ICAO (International Civil Aviation Organization) [1] που καθορίζουν μεταξύ των άλλων και τις θέσεις των μικροφώνων, όπου καταγράφεται ο θόρυβος. Το ύψος των μικροφώνων ορίζεται σε όλες τις περιπτώσεις σε 1,2 m από το έδαφος. Σε αυτό το ύψος, τα μικρόφωνα καταγράφουν το θόρυβο που έρχεται κατευθείαν από το ελικόπτερο καθώς και το θόρυβο που έχει προηγουμένως ανακλαστεί στο έδαφος. Έτσι, οι μετρήσεις στα μικρόφωνα των πιστοποιήσεων καταγράφουν το πραγματικό (δηλαδή το συνιστάμενο) ακουστικό πεδίο στην συγκεκριμένη θέση, αλλά όχι το θόρυβο που εκπέμπει το ίδιο το ελικόπτερο (σε ελεύθερο πεδίο). Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται συχνά μικρόφωνα πάνω στο έδαφος σε μεταλλική επιφάνεια. Στα μικρόφωνα εδάφους, λόγω πλήρους ανάκλασης του ήχου πάνω στην μεταλλική επιφάνεια, έχουμε διπλασιασμό της πίεσης που εκπέμπει η ηχητική πηγή σε

ελεύθερο πεδίο, ανεξάρτητα από το είδος του εδάφους γύρω από τη μεταλλική πλάκα.

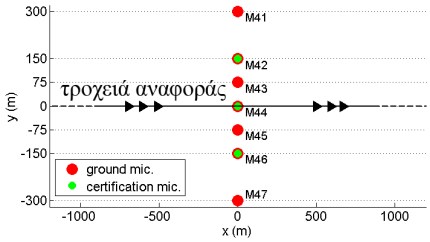
Στην παρούσα εργασία επεξεργαζόμαστε διαθέσιμες μετρήσεις θορύβου ελικοπτέρου μελετώντας τις διαφορές μεταξύ των μετρήσεων σε μικρόφωνα πιστοποίησης και μικρόφωνα εδάφους. Θεωρητικά οι διαφορές αυτές οφείλονται στην επίδραση του εδάφους. Η σύγκρισή τους όμως με προλέξεις από γνωστά μοντέλα διάδοσης και ανάκλασης θορύβου σε πραγματικό έδαφος δεν μπορεί να δικαιολογήσει πλήρως τις διαφορές στα δύο ύψη μικροφώνων.

1. Περιγραφή μετρήσεων και πειραματικών δεδομένων

Οι μετρήσεις θορύβου [2] [3] αφορούν τις πτητικές καταστάσεις αιώρησης και ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης ελικοπτέρου Agusta A109 σε συνθήκες νηνεμίας και πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσια του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος FRIENDCOPTER.

Ο θόρυβος καταγράφεται σε συστοιχία μικροφώνων (Σχήμα 1.1) τόσο στις τυποποιημένες θέσεις μικροφώνων κατά τις μετρήσεις για πιστοποίηση θορύβου (ICAO), όσο και σε μικρόφωνα στο έδαφος. Τα μικρόφωνα πιστοποίησης βρίσκονται σε ύψος 1,2 m, ενώ τα μικρόφωνα εδάφους είναι ανεστραμμένα πάνω από μεταλλική επιφάνεια διαμέτρου 0,4 m επίπεδη με το έδαφος. Το διάφραγμα του μικροφώνου εδάφους είναι παράλληλο προς το έδαφος και σε ύψος 0,007 m. Η μεταλλική επιφάνεια κάτω από τα μικρόφωνα εδάφους λειτουργεί ιδεατά ως μια ακουστικά σκληρή επιφάνεια δηλαδή επιφάνεια τέλεια ανακλαστική. Το έδαφος στο γενικότερο χώρο των μετρήσεων είναι καλυμμένο με πολύ χαμηλή βλάστηση (γρασίδι). Το ύψος της τροχιάς αναφοράς στην πτητική κατάσταση ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης είναι 150 m, ενώ η ακριβής θέση του ελικοπτέρου καταγράφεται για το σύνολο της διάρκειας των μετρήσεων θορύβου κατά την ευθύγραμμη οριζόντια πτήση. Στην κατάσταση αιώρησης το ελικόπτερο αιωρείται εκτός επίδρασης εδάφους (HOGE) σε ύψος 30,48 m (100 ft) στο σημείο με συντεταγμένες x=-150 m και y=0 m.

Για κάθε πτητική κατάσταση η ηχητική στάθμη, SPL(i,k), όπου i ο δείκτης της τριτοοκτάβας και k ο δείκτης της χρονικής δειγματοληψίας, καταγράφεται σε κάθε μια από τις 31 τριτοοκτάβες από τα 20 έως και τα 20000 Hz με χρονική δειγματοληψία 0,5 δευτερολέπτων. Η χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι 60 δευτερόλεπτα.

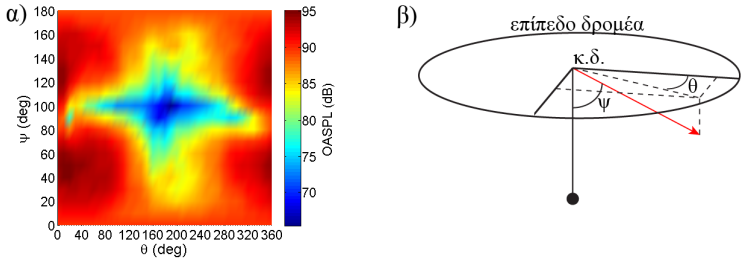


Σχήμα 1.1Συστοιχία μικροφώνων και τροχιά αναφοράς ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης

2. Το μοντέλο της πηγής

Το ελικόπτερο μοντελοποιείται ως μια σημειακή κατευθυντική πηγή. Η έντονη κατευθυντικότητα του ακουστικού πεδίου γύρω από το ελικόπτερο είναι αποτέλεσμα του πολύπλοκου πεδίου ροής που αναπτύσσεται από τον περιστρεφόμενο δρομέα. Ο κατασκευαστής του ελικοπτέρου παρέχει [4] τις ηχητικές στάθμες για κάθε τριτοοκτάβα σε μια επιφάνεια σφαίρας ακτίνας 150 m και κέντρο το σημείο περιστροφής του δρομέα. Τιμές δίνονται σε πλέγμα σημείων καθώς οι δύο γωνίες κατεύθυνσης μεταβάλλονται ανά 10 μοίρες. Για τον υπολογισμό των ηχητικών σταθμών έχουν συνεκτιμηθεί αλληλεπιδράσεις αεροελαστικών, αεροδυναμικών και αεροακουστικών φαινομένων [5].

Το Σχήμα 2.1 δείχνει την ολική ηχητική στάθμη στο πλέγμα των σημείων συναρτήσει των γωνιών κατεύθυνσης θ και ψ. Η γωνία θ διατρέχει το επίπεδο του δρομέα, ενώ η γωνία ψ είναι μηδέν ακριβώς κάτω από το κέντρο του δρομέα. Τα ζεύγη μικροφώνων που θα εξεταστούν (πιστοποίησης και εδάφους) έχουν την ίδια γωνία θ αλλά διαφορετική γωνία ψ. Για τις σχετικές θέσεις πηγής και μικροφώνων που θα εξεταστούν οι διαφορές στην τιμή της γωνίας ψ είναι αμελητέες και μπορούν να αγνοηθούν.



Σχήμα 2.1 α) Ολική ηχητική στάθμη OASPL συναρτήσει β) των γωνιών κατεύθυνσης θ και ψ

3. Το μοντέλο διάδοσης θορύβου

Το ολικό ακουστικό πεδίο πηγής που εκπέμπει σφαιρικά αρμονικά κύματα στην ατμόσφαιρα πάνω από το έδαφος είναι

$$P = A\frac{e^{-\alpha r_1}e^{jk_0 r_1}}{r_1} + R_{sp}A\frac{e^{-\alpha r_2}e^{jk_0 r_2}}{r_2} \qquad (0.1)$$

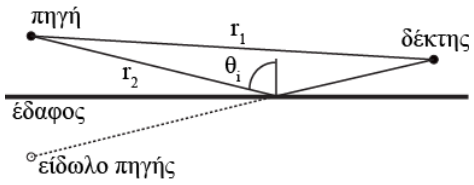
όπου A είναι σταθερά χαρακτηριστική της πηγής, r_1 είναι η απ' ευθείας απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη, r_2 η απόσταση μεταξύ ειδώλου της πηγής και δέκτη (σχήμα 3.1), k_0 ο αριθμός κύματος στον ατμοσφαιρικό αέρα, α ο συντελεστής ατμοσφαιρικής απορρόφησης και R_{sp} ο συντελεστής ανάκλασης σφαιρικού κύματος. Ο συντελεστής ανάκλασης σφαιρικού κύματος, για τοπικά αντιδρούσες επιφάνειες, είναι συνάρτηση της απόστασης r_2, της γωνίας πρόσπτωσης θ_i του ανακλώμενου κύματος και της κανονικοποιημένης ακουστικής εμπέδησης του

εδάφους Z_n. Για λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται σε βιβλία αναφοράς (π.χ. [6]).

Η κανονικοποιημένη ακουστική εμπέδηση Z_n του εδάφους, που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης σφαιρικού κύματος R_{sp}, υπολογίζεται από την σχέση

$$Z_n = 1 + 0,0511\left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,75} + i\left[0,0768\left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,73}\right] \tag{0.2}$$

όπου σ η αντίσταση ροής του εδάφους και f η συχνότητα του ανακλώμενου κύματος.



Σχήμα 3.1 Γεωμετρία διάδοσης ήχου από σημειακή πηγή πάνω από επίπεδη επιφάνεια

4. Συγκρίσεις μετρήσεων θορύβου με το μοντέλο διάδοσης

Η σύγκριση των μετρήσεων θορύβου με το μοντέλο διάδοσης γίνεται στη βάση της διαφοράς της ηχητικής στάθμης ανάμεσα στο μικρόφωνο πιστοποίησης και στο μικρόφωνο εδάφους. Η διαφορά ηχητικής στάθμης για τις μετρήσεις του θορύβου υπολογίζεται για κάθε μια από τις θέσεις μικροφώνων M42, M44 και M46 (Σχήμα 1.1) ως

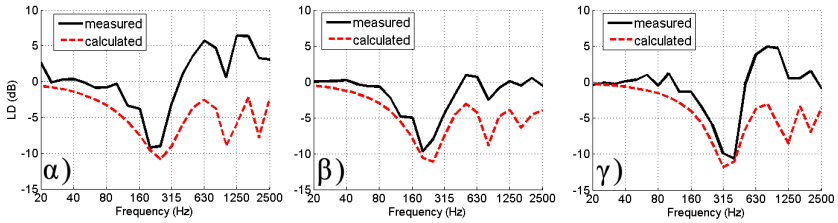
$$LD(i,k) = SPL_c(i,k) - SPL_g(i,k) \tag{0.3}$$

όπου SPL_c η ηχητική στάθμη στο μικρόφωνο πιστοποίησης και SPL_g η ηχητική στάθμη στο μικρόφωνο εδάφους.

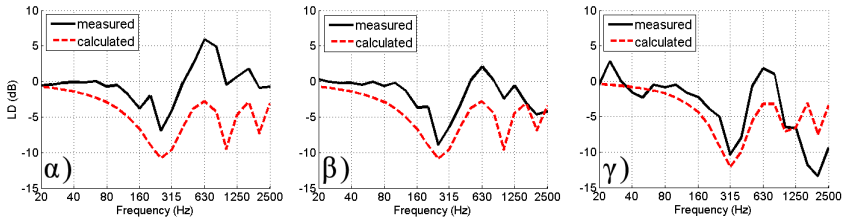
Η πηγή στο μοντέλο διάδοσης θεωρείται μη-κατευθυντική. Η κανονικοποιημένη ακουστική εμπέδηση Z_n της μεταλλικής επιφάνειας κάτω από τα μικρόφωνα εδάφους υπολογίζεται με αντίστασης ροής σ = 200000 kPa s m^{-2}. Η αντίσταση ροής της επιφάνειας πάνω στην οποία ανακλώνται τα ηχητικά κύματα που φθάνουν στα μικρόφωνα πιστοποίησης χρησιμοποιείται ως προσαρμόσιμη παράμετρος για την καλύτερη δυνατή σύμπτωση μετρήσεων και προλέξεων μέσα στα πλαίσια που θεωρούνται τυπικά για τέτοιου είδους επιφάνειες (γρασίδι), δηλαδή από 100 έως 300 kPa s m^{-2}. Συγκεκριμένα για τις θέσεις M42 και M44 χρησιμοποιήθηκε η τιμή σ=100 kPa s m^{-2} ενώ στη θέση M46 η τιμή σ=230 kPa s m^{-2}. Οι αποστάσεις μεταξύ των θέσεων των μικροφώνων καθώς και η ανομοιομορφία του εδάφους δικαιολογεί αυτές τις διαφορές.

Η διαφορά ηχητικής στάθμης για τις τρείς θέσεις μικροφώνων M42, M44 και M46 στην κατάσταση αιώρησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Στην περιοχή των συχνοτήτων μέχρι το πρώτο τοπικό ελάχιστο, περίπου 315 Hz, η ηχητική στάθμη του μικροφώνου πιστοποίησης στις μετρήσεις του θορύβου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, 1 με 2 dB, από αυτή που προβλέπεται από το μοντέλο διάδοσης. Σε συχνότητες άνω των 315 Hz οι διαφορές μετρήσεων και προλέξεων αυξάνουν. Οι

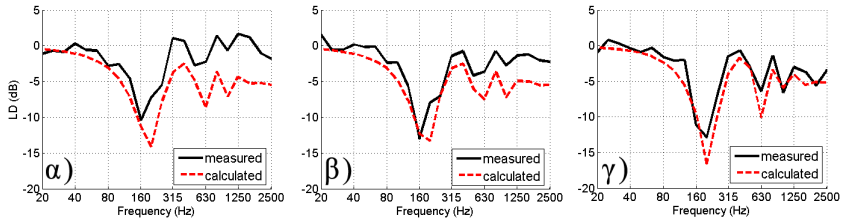
μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στις θέσεις M42 και M46 όπου στα 630 Hz περίπου υπερβαίνουν τα 5 dB. Στην κατάσταση ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης και για μεγάλες αποστάσεις πηγής και γραμμής συστοιχίας μικροφώνων (Σχήμα 4.2) παρατηρούνται ανάλογες διαφορές με εκείνες που παρατηρήθηκαν στην κατάσταση αιώρησης. Καθώς όμως η πηγή πλησιάζει την γραμμή συστοιχίας των μικροφώνων οι μετρήσεις και οι προλέξεις συγκλίνουν (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.1 Διαφορά ηχητικής στάθμης ανάμεσα στα μικρόφωνα πιστοποίησης και εδάφους και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες προλέξεις του μοντέλου διάδοσης για τις θέσεις α)M42 β)M44 και γ)M46. Πτητική κατάσταση αιώρησης



Σχήμα 4.2 Διαφορά ηχητικής στάθμης ανάμεσα στα μικρόφωνα πιστοποίησης και εδάφους και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες προλέξεις του μοντέλου διάδοσης για τις θέσεις α)M42 β)M44 και γ)M46. Πτητική κατάσταση ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης. Η πηγή βρίσκεται σε οριζόντια απόσταση 960 m από τη γραμμή συστοιχίας των μικροφώνων



Σχήμα 4.3 *Διαφορά ηχητικής στάθμης ανάμεσα στα μικρόφωνα πιστοποίησης και εδάφους και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες προλέξεις του μοντέλου διάδοσης για τις θέσεις α)M42, β)M44 και γ)M46. Πτητική κατάσταση ευθύγραμμης οριζόντιας πτήσης Η πηγή βρίσκεται σε οριζόντια απόσταση 430 m από τη γραμμή συστοιχίας των μικροφώνων*

5. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Οι διαφορές μεταξύ μετρήσεων και προλέξεων παρατηρούμε ότι παρουσιάζονται στο πλάτος, αλλά όχι στη θέση των μεγίστων και ελαχίστων, τα οποία προβλέπονται με ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε προβλέπει αρκετά καλά την αλληλεπίδραση του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου πεδίου. Οι διαφορές στο πλάτος μπορεί να οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Αναφέρονται μερικοί στη συνέχεια.

Κατά τον υπολογισμό της διαφοράς ηχητικής στάθμης LD έγινε η υπόθεση ότι η πηγή είναι σημειακή και ότι στο εύρος των γωνιών που εκπέμπει τον θόρυβο που φθάνει στο μικρόφωνο πιστοποίησης και στο μικρόφωνο εδάφους μπορεί να θεωρηθεί μη-κατευθυντική. Ένα ακριβέστερο μοντέλο του ελικοπτέρου ως ηχητική πηγή πιθανόν να βελτίωνε τις συγκρίσεις.

Το μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιήθηκε είναι μονοπαραμετρικό, περιγράφοντας το έδαφος με μια μόνη παράμετρο, την αντίσταση ροής του εδάφους. Συμπεριλαμβάνει επίσης φαινόμενα γεωμετρικής εξασθένησης και ατμοσφαιρικής απορρόφησης, αλλά όχι φαινόμενα διάθλασης, ατμοσφαιρικής τύρβης ή ασυνέχειας της εμπέδησης του εδάφους.

Η συνεισφορά καθενός από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν αναμένεται να είναι μικρή, αλλά η συνολική συνεισφορά θα πρέπει να εξεταστεί.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι το γνωστό μονοπαραμετρικό μοντέλο εδάφους δεν μπορεί μόνο του να εξηγήσει τις διαφορές ανάμεσα στις μετρήσεις στα μικρόφωνα πιστοποίησης και εδάφους. Μελλοντική εργασία θα συμπεριλαμβάνει βελτιωμένους τρόπους για την επιλογή της μοναδικής παραμέτρου του μοντέλου, τη χρήση πολυπαραμετρικών μοντέλων εδάφους, και τον συνυπολογισμό πρόσθετων φαινομένων διάδοσης (όπως η διάθλαση και η ατμοσφαιρική τύρβη).

6. Αναφορές

[1] ICAO Environmental Technical Manual on the Use of Procedures in the Noise Certification of Aircraft, DOC 9501, Third Edition (2004)

[2] F. Cenedese, L.de Vivo, and A. Chaves, "Test Report and Date Base on A109 Noise (Phase1)", FRIENDCOPTER Technical Report, FC-D2.3-3 (2007)

[3] F. Cenedese, "A109 Phase 1 Flight Test Results Exploitation" FRIENDCOPTER Technical Report, FC-D2.4-2 (2009)

[4] H.H. Brouwer, "Numerically generated database – Hemisphere Definition", FRIENDCOPTER Technical Report, FC-NLR-TR2.2-6 (2006)

[5] R. Ponza, "Helicopter acoustic characterization by simulation: comparison with flight test results and predicted impact of new design solutions", 59th American Helicopter Society Annual Forum, Phoenix (2003), AZ.

[6] E.M. Salomons *Computational Atmospheric Acoustics* Kluwer Academic Publishers Dordrecht, pp 129-134 (2001)

Αλφαβητική Λίστα Συγγραφέων

Brennan,	M.	311
Neocleous,	A.	134, 303
Panteli,	M.	134
Petkov,	N.	134
Joseph,	P.	311
Schizas,	Ch.	134
Schubert,	G.	196
Αγγελάκης,	Κ.	37
Αθανασάκη,	Ε.	303
Αθανασιάδου,	Ε.	14
Αυγουστοπούλου,	Ε. Σ.	222, 228
Βάινος,	Ν.	120
Βογιατζής,	Κ.	89, 97
Βρύσης,	Λ.	329
Γεωργαντή,	Ε.	178
Γιανναkουλόπουλος,	Α.	250
Γιουβανάνκης,	Μ.	258
Γιανναkουλόπουλος,	Α.	250
Δασκαλάκη,	Ν.	295
Δεληγιαννίδου,	Ρ.	204
Δημητρίου,	Β.	120
Δημούλας,	Χ.	161, 329
Δρόσος,	Κ.	234, 250
Εμμανουήλ,	Μ.	273
Ζαφρανάς,	Β.	43
Θάνος,	Α.	29
Καλλίρης,	Γ.	161, 329
Καμαρής,	Γ.	142

Καμπουράκης,	Γ.	22, 59
Κανελλόπουλος,	Γ. Ν.	267
Καραγιάννης,	Ι.	1
Καραδέδος,	Γ.	43
Καραμήτας,	Κ.	186
Καραμπατζάκης,	Π.	43
Καραποστόλη,	Α.	289
Καρατζάς,	Τ.	22, 222, 228
Καρνάρη,	Ε.	222, 228
Κασελούρης,	Ε.	120
Κατερέλος,	Δ.	234, 273
Καφάση,	Α.	59
Κεφαλόπουλος,	Στ.	89
Κόκκινος,	Α.	234
Κονδύλης,	Π.	337
Κοτσώνησ-Τζάννες,	Ε. Μ.	169
Κουζούπης,	Σπ.	295, 303
Κουντουράς,	Μ.	68
Κυριακίδου,	Α.	289
Κωστάζος,	Η.	105
Κωστής,	Γ.	80
Κωτσάκης,	Η.	161
Λουφόπουλος,	Α.	273
Μαραγκός,	Θ.	273
Μενούνου,	Π.	337
Μιμηλάκης,	Στ. Ι.	234
Μουρτζόπουλος,	Ι.	128, 142, 178, 186, 242
Μουστάκας,	Ν.	267
Μπακαρέζος,	Ε.	8, 120
Μπακογιάννης,	Κ.	22

Μπάρκας,	Κ.	14, 37, 80, 204
Μπούση,	Μ.	14
Μπρέζας,	Π.	8
Ορφανός,	Ι.	120
Παϊδάς,	Ελ.	80
Παπαδάκης,	Π.	295
Παπαδάκος,	Χ.	242
Παπαδογιάννης,	Ν.	8, 120
Παπανικολάου,	Γ.	258, 329
Παπαστεφάνου,	Α.	311
Πάστερναχ,	Ξ.	14
Πλιάτσικας,	Δ.	80
Πολυχρονόπουλος,	Σπ.	128
Ποτηράκης,	Στ.	153
Πουλάκος,	Γ.	1, 222, 228
Σαββοπούλου,	Ν.	1
Σακαντάμης,	Κ.	281
Σαρρής,	Α.	321
Σεβαστιάδης,	Χ.	258
Σκαρλάτος,	Δ.	128
Σωτηροπούλου,	Α.	1, 43, 222, 228
Ταρουδάκης,	Μ.	112
Ταταράκης,	Μ.	120
Τάτλας,	Ν. Α.	153
Τερζάκης,	Μ. Ε.	8
Τιμαγένης,	Θ.	213
Τριπολιτάκη,	Ζ.	295
Τσιλφίδης,	Α.	169, 186
Τσινίκας,	Ν.	289
Φλώρος,	Α.	234, 250, 267, 321

Χατζηγεωργίου,	Γ.	29
Χουρμουζιάδου,	Κ.	281
Ψαρράς,	Σ.	68

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012
8 - 10 ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ
ΚΕΡΚΥΡΑ, ΕΛΛΑΔΑ
ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ACOUSTICS 2012
8 - 10 OCTOBER
CORFU, GREECE
IONIAN UNIVERSITY