

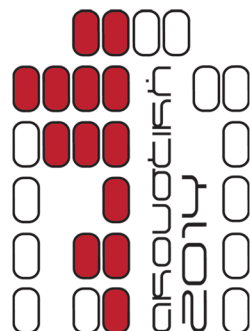
# Πρακτικά Συνεδρίου

7ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2014

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ  
20 - 21 Οκτωβρίου

Ελληνικό Ινστιτούτο Ακουστικής (ΕΛ.ΙΝ.Α.) -  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.)

<http://conferences.helina.gr/2014/gr>



## **Οργανωτική επιτροπή**

Πρόεδρος:

Νίκος Τσινίκας, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Μέλη:

Χρήστος Αντωνόπουλος, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Βασίλης Βασιλειάδης, *Δρ. Μηχανολόγος Α.Π.Θ.*

Χρήστος Γούσιος, *Λέκτορας Α.Π.Θ.*

Γιώργος Καλλίρης, *Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Αιμιλία Καραποστόλη, *Υποψήφια Δρ. Αρχιτέκτων Α.Π.Θ.*

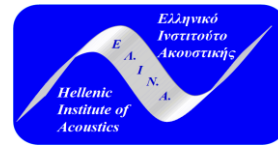
Ρήγας Κωτσάκης, *Υποψήφιος Δρ. Ηλεκτρολόγος Α.Π.Θ.*

Γιώργος Παπαδέλης, *Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Γιώργος Παπανικολάου, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Πέπη Χουμουζιάδου, *Δρ. Αρχιτέκτων Α.Π.Θ.*

## **Οργανωτές**



## **Χορηγός**



## **Επιμέλεια πρακτικών**

Γιώργος Παπαδέλης

## **Λογότυπο – Μακέτα εξωφύλλου**

Αιμιλία Καραποστόλη, Πέπη Χουμουζιάδου



## ***Επιστημονική επιτροπή***

Πρόεδρος:

Γιώργος Παπανικολάου, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Μέλη:

Χρήστος Αντωνόπουλος, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Βασίλης Βασιλειάδης, *Δρ. Μηχανολόγος Α.Π.Θ.*

Χαράλαμπος Δημουλάς, *Λέκτορας Α.Π.Θ.*

Γιώργος Καλλίρης, *Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Γεώργιος Καμπουράκης, *Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

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

Πηνελόπη Μενούου, *Επίκουρη Καθηγήτρια, Πανεπιστήμιο Πατρών*

Γιάννης Μουρτζόπουλος, *Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών*

Γεώργιος Μπάμνιος, *Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης*

Νίκος Μπάρκας, *Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θράκης*

Παναγιώτης Παπαδάκης, *Διευθυντής εφαρμογών, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών*

Γιώργος Παπαδέλης, *Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Κωνσταντίνος Παστιάδης, *Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Στέλιος Ποτηράκης, *Επίκουρος Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Πειραιά*

Χρήστος Σεβαστιάδης, *Δρ. Ηλεκτρολόγος Α.Π.Θ.*

Δημήτρης Σκαρλάτος, *Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών*

Χαράλαμπος Σπυρίδης, *Καθηγητής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου, *Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.*

Μιχάλης Ταρουδάκης, *Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης*

Νικόλαος – Αλέξανδρος Τάτλας, *Καθηγητής Εφαρμογών Τ.Ε.Ι. Πειραιά*

Νίκος Τσινίκας, *Καθηγητής Α.Π.Θ.*

Ανδρέας Φλώρος, *Επίκουρος Καθηγητής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο*

Gottfried Schubert, *Δρ. Ακουστικής Αθήνα*

## ***Προσκεκλημένοι ομιλητές***

Χαράλαμπος Σπυρίδης, *Καθηγητής Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών*

Αθανάσιος Τροχίδης, *Ομότιμος Καθηγητής Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης*

## ***Ένας θερμός χαιρετισμός από την οργανωτική επιτροπή***

Αγαπητοί/ές

Το Συνέδριο «Ακουστική 2014» είναι το 7ο κατά σειρά εθνικό συνέδριο μετά από τα συνέδρια της Πάτρας το 2002, της Θεσσαλονίκης το 2004, του Ηρακλείου 2006, της Ξάνθης 2008, της Αθήνας 2010 και της Κέρκυρας 2012.

Τα συνέδρια ακουστικής, συμβάλλουν στην εξέλιξη της επιστήμης, στην επικοινωνία των ερευνητών και την ανάπτυξη νέων συνεργασιών.

Στην εποχή του διαδικτύου και της ταχύτητας των πληροφοριών, η διαθεματικότητα προτρέπει σε καινοτομίες και η σύγχρονη έρευνα δεν διστάζει να ψάξει σχέσεις και εξαρτήσεις ανάμεσα στην επιστήμη και τις τέχνες.

Στις θεματικές περιοχές του συνεδρίου της ακουστικής συνυπάρχουν ειρηνικά η κτιριακή ακουστική με την επεξεργασία ηχητικών σημάτων, η ψυχοακουστική με την περιβαλλοντική ακουστική, η κυματική ακουστική με την αλγοριθμική σύνθεση μουσικής, η υποβρύχια ακουστική με τα ηχοτοπία, η ηλεκτροακουστική με την ηχορύπανση και το περιβάλλον.

Το συνέδριο διεξάγεται στο κτίριο της επιτροπής ερευνών του ΑΠΘ, που αποτελεί ένα φιλόξενο και λειτουργικό χώρο, κατάλληλο για την άρτια διεξαγωγή του. Το πρόγραμμα του συνεδρίου περιλαμβάνει ποικίλες δράσεις και προβολές στο φουαγιέ των αμφιθεάτρων καθώς και μουσική βραδιά από μέλη της οργανωτικής επιτροπής.

Εύχομαι καλή διαμονή και θετικά αποτελέσματα.

Εκ μέρους της οργανωτικής επιτροπής του συνεδρίου

Νίκος Τσινίκας, *Αρχιτέκτων, Καθηγητής ΑΠΘ*

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2014

ΔΕΥΤΕΡΑ 20/10/20014

8.30 - 9.30 Εγγραφή συνέδρων

**ΑΙΘΟΥΣΑ II**

**ΑΙΘΟΥΣΑ III**

9.30 - 10.00 Τελετή έναρξης - Χαιρετισμοί  
**Κεντρική ομιλία:** Έγχορδα μουσικά όργανα  
μετά τόξου εις την αρχαίαν Ελλάδα, **Χ. Σπυρίδης**

**Προεδρείο:** Ν. Τσινίκας

11.00 - 12.00 **Συνεδρία Α1** Μουσική Ακουστική

**Προεδρείο:** Χ. Σπυρίδης, Γ. Παπαδέλης

**Συνεδρία Β1** Κτιριακή - Αρχιτεκτονική Ακουστική

**Προεδρείο:** Ν. Τσινίκας, Α. Σωτηροπούλου

11.00 - 11.15 Ανακατασκευή αρχαίων λυρών με χρήση 3d τεχνολογιών και μεθόδων ακουστικής ανάλυσης: The Lyre 2.0 Project

Ν. Κουμαρτζής, Ρ. Κωτσάκης, Γ. Καλλίρης, Α. Βέγλης

Αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης σε ξενοδοχεία: κατασκευαστικές ελλείψεις, διαφήμιση, παράπονα

Ν. Μπάρκας

11.15 - 11.30 Δονητικά χαρακτηριστικά παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με τη χρήση λείζερ και θεωρητικών προσομοιώσεων

Ι. Σιδηράς, Ε. Κοκκινάκης, Ι. Ορφανός, Ε. Μπακαρέζος, Ε. Κασελούρης, Β. Δημητρίου, Ν. Παπαδογιάννης

Ακουστική άνεση σε ξενοδοχείο. Πρόβλεψη και σχεδιασμός ηχομονωτικών παραμέτρων σε ξύλινες κατασκευές.

Γ. Χατζηγεωργίου

11.30 - 11.45 Μια καθόλου τυχαία ομοιότητα: Μπουζούκι- νεροκολοκύθα

Ι. Κουκουρίγκος

Μελέτη ακουστικής σε σχολικές αίθουσες

Π. Χατζηαντωνίου, Γ. Φύττας, Φ. Κοντομίχος

11.45 - 12.00 Ένα μπάσο στο χαμάμ

Γ. Χρηστίδης

Σύγκριση ακουστικών μετρήσεων μεταξύ πραγματικού χώρου και προσομοίωσης με το πρόγραμμα ODEON

Α. Σωτηροπούλου, Γ. Πουλάκος, Ι. Καραγιάννης, Ε. Περδικάρη

12.00 - 12.30

**Διάλειμμα**

**Συνεδρία Α2** Επεξεργασία Ηχητικών Σημάτων - Ανάσυρση Πληροφοριών - Δικτυακές Εφαρμογές

**Προεδρείο:** Γ. Καλλίρης, Α. Φλώρος

**Συνεδρία Β2** Κτιριακή - Αρχιτεκτονική Ακουστική

**Προεδρείο:** Ν. Μπάρκας, Π. Χουρμουζιάδου

12.30 - 12.45 Ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων για την κατασκευή E-Soundmaps: Παράγοντες σχεδίασης του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού.

Ν.-Α. Τάτλας, Σ. Ποτηράκης, Σ. Μυτιληναίος, Ε. Κυριάκης-Μπιτζάρος, Μ. Ραγκούση

Ανασκόπηση σύγχρονων εξελίξεων στην ακουστική αιθουσών jazz

Α. Σωτηροπούλου, Γ. Ξανθούλης, Γ. Καραγιάννης, Σ. Τρισπιώτης

12.45 - 13.00 Αποθορυβοποίηση και ανακατασκευή μουσικών ηχογραφήσεων: Συγκρίσεις μέσω εμπειρικής έρευνας και εξαγωγής ηχητικών ιδιοτήτων

Α. Σαρακατσιάνος, Γ. Ζαΐμης, Ρ. Κωτσάκης, Γ. Καλλίρης

Ακουστικές μετρήσεις σε αίθουσες rock μουσικής στην Αθήνα

Α. Σωτηροπούλου, Ι. Τζουβαδάκης, Ι. Καραγιάννης, Α. Πάνος, Π. Ρεμπής, Σ. Τσούκα

13.00 - 13.15 Βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε δικτυοκεντρικά μουσικά περιβάλλοντα (NMP) για πραγματοποίηση ζωντανών απομακρυσμένων συναυλιών

Κ. Τσιούτας, Α. Φλώρος

Διερεύνηση παραμέτρων ευελιξίας χώρων θεάματος με δυνατότητα μετασχηματισμού

Γ.-Ν. Τσάρας, Δ. Γιουζέπας, Π. Γούλιαρης

13.15 - 13.30 Υπολογισμός κατευθυντικότητας συστοιχίας συντονιστών Helmholtz

Σ. Πολυχρονόπουλος, Κ. Παπαναγιώτου, Ι. Μουρτζόπουλος, Δ. Σκαρλάτος

Σεβαστοπούλειο εκπαιδευτικό συγκρότημα, Αθήνα' ακουστικός σχεδιασμός αμφιθεάτρου 180 θέσεων

Α. Σωτηροπούλου

## ΔΕΥΤΕΡΑ 20/10/20014

13.30 - 15.00

### Μεσημεριανό Διάλειμμα

<p><b>15.00 - 16.00</b> <b>Συνεδρία Α3</b> Επεξεργασία Ηχητικών Σημάτων - Ανάσυρση Πληροφοριών - Δικτυακές Εφαρμογές</p>	<p><b>Προεδρείο:</b> Ν.Α. Τάτλας, Χ. Δημούλας</p>	<p><b>Συνεδρία Β3</b> Κτιριακή - Αρχιτεκτονική Ακουστική</p>	<p><b>Προεδρείο:</b> Γ. Πουλάκος, Α. Καραποστόλη</p>
<p>15.00 - 15.15 Εργαλεία και τεχνικές μηχανικής μάθησης για την σημασιολογική ανάλυση ήχου</p>	<p>Ν. Τσίπας, Λ. Βρύσης, Χ. Δημούλας, Γ. Παπανικολάου</p>	<p>Η ακουστική ορθόδοξων ναών της νεωτέρας Ελλάδος: σύγχρονες προσεγγίσεις</p>	<p>Α. Σωτηροπούλου, Ι. Καραγιάννης, Α. Στάμος, Θ. Σερβετάς</p>
<p>15.15 - 15.30 Διερεύνηση της δυνατότητας μεταφοράς συναισθηματικής πληροφορίας από το ακουστικό στο οπτικό κανάλι</p>	<p>Κ. Δρόσος, Α. Φλώρος</p>	<p>Παρατηρήσεις πάνω στην εξέλιξη της ακουστικής των χριστιανικών λατρευτικών κτισμάτων της Θεσσαλονίκης</p>	<p>Παναγιώτης Καραμπατζάκης</p>
<p>15.30 - 15.45 SreakGreek: Ανάπτυξη διαδικτυακού συστήματος εκπαίδευσης της ομιλίας</p>	<p>Κ. Νικολαΐδου, Γ. Παπανικολάου, Κ. Αβδελίδης</p>	<p>Εφαρμογή του προτύπου EN 12354: Λογισμικό Knauf Sound Insulation (KSI)</p>	<p>D. Todorović, V. Čelebić, M. Stanojević, M. Radosavljevic, Y. Kontoulis</p>
<p>15.45 - 16.00 Αναγνώριση και άμεσος χαρακτηρισμός ψαλτικής φωνής σε πραγματικό χρόνο στη βυζαντινή μουσική</p>	<p>Α. Μαντισάρης, Κ. Κοκκινίδης, Α. Γκλουσκόβα, Σ. Μαντισάρης</p>	<p>Μελέτη και κατασκευή θαλάμου αναφοράς για ακουστικές μετρήσεις στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας</p>	<p>Θ. Τιμαγένης</p>

16.00 - 16.15

### Διάλειμμα

<p><b>16.15 - 17.15</b> <b>Συνεδρία Α4</b> Ψυχοακουστική</p>	<p><b>Προεδρείο:</b> Γ. Παπανικολάου, Κ. Παστιάδη</p>	<p><b>Συνεδρία Β4</b> Περιβαλλοντική Ακουστική - Ηχορύπανση - Ηχοπροστασία</p>	<p><b>Προεδρείο:</b> G. Schubert, Γ. Καμπουράκης</p>
<p>16.15 - 16.30 Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας κωδικοποίησης του προτύπου MPEG-1 Layer III, για διαφορετικά είδη μουσικής, με χρήση της μεθόδου Semantic Differential</p>	<p>Ι. Αρώνη, Ν. Παπαδάκης</p>	<p>Εκτίμηση μέτρων μείωσης θορύβου και κραδασμών μετά την εφαρμογή σταθερής επιδομής στην σιδηροδρομική γραμμή 1 του ΗΣΑΠ</p>	<p>Θ. Αργουδέλης, Ν. Αργουδέλης, Α. Αργουδέλης</p>
<p>16.30 - 16.45 Καταγραφή και μελέτη δυναμικών ψυχοακουστικών χαρακτηριστικών με εφαρμογή στη μελέτη της αντίληψης πλευρίωσης ηχητικών πηγών</p>	<p>Ν. Νικολαΐδης, Κ. Παστιάδης, Γ. Παπαδέλης</p>	<p>Μοντέλο αξιολόγησης αντιθορυβικών μέτρων</p>	<p>Β. Βασιλειάδης</p>
<p>16.45 - 17.00 Η επίδραση του τονικού ύψους στην εκτίμηση της συμφωνίας/διαφωνίας δίφωνων μουσικών συνηρήσεων</p>	<p>Λ. Μητσκόπουλος, Γ. Παπαδέλης, Φ. Καργόπουλος, Γ. Παπανικολάου</p>	<p>Ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων για την κατασκευή E-Soundmaps: Η επίδραση της συμπίεσης στην πολυπλοκότητα του ηχητικού σήματος</p>	<p>Σ. Ποτηράκης, Ν.-Α. Τάτλας, Σ. Μυτιληναίος, Μ. Ραγκούση</p>
<p>17.00 - 17.15 Εισαγωγή στις Head Related Transfer Functions και διερεύνηση της χρήσης μη εξατομικευμένων HRTF για την σύνθεση binaural σημάτων</p>	<p>Ν. Μπούρας, Γ. Παπανικολάου</p>	<p>Δυναμική ανάλυση πλωτής πλάκας τραμ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων</p>	<p>Σ. Μουζακίτης, Γ. Χαραλαμπίδης, Ι. Κουκούλης, Γ. Μπαμπάνης</p>

ΔΕΥΤΕΡΑ 20/10/20014

17.15 - 17.45

**Διάλειμμα**

17.45 - 19.45

**Γενική συνέλευση ΕΛΙΝΑ**

19.45

**Δείπνο συνεδρίου**

ΤΡΙΤΗ 21/10/20014

ΑΙΘΟΥΣΑ II

ΑΙΘΟΥΣΑ III

10.00 - 10.45	<b>Κεντρική ομιλία:</b> ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ: παρελθόν-παρόν-μέλλον, <b>A. Τροχίδης</b>	<b>Προεδρείο:</b> Μ. Ταρουδάκης	
11.00 - 12.00	<b>Συνεδρία A5</b> Κυματική Ακουστική - Εκπαίδευση και Ακουστική	<b>Προεδρείο:</b> Α. Τροχίδης, Μ. Ταρουδάκης	<b>Συνεδρία B5</b> Αλγοριθμική σύνθεση μουσικής - Ηχοτοπία
11.00 - 11.15	Χρήση θεμελιωδών λύσεων για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες	Π. Μενούνου, Χ. Κλάγκος	Πληροφορική μουσική και χειρονομικός έλεγχος ηχητικών χώρων στο «Δυναμει Ον».
11.15 - 11.30	Αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από σφήνα	Π. Μενούνου, Π. Νικολάου, Π. Σουρίδη	Αλγοριθμική σύνθεση και αυτόματη ηχοποίηση/ μουσικοποίηση βίντεο με χρήση Η/Υ
11.30 - 11.45	Νανοακουστικά κύματα με τη χρήση υπερβραχέων παλμών laser και οι εφαρμογές τους σε σύνθετα υλικά	Ε. Τζιανάκη, Ι. Ορφανός, Ε. Κασελούρης, Ε. Μπακαρέζος, Β. Δημητρίου, Μ. Ταταράκης, Ν. Παπαδογιάννης	Αξιοποίηση οικονομικών δεδομένων και δεικτών της ελληνικής κρίσης για μουσική σύνθεση μέσω αλγορίθμων σε Η/Υ
11.45 - 12.00	Πρόγραμμα ΕΥΑΙΣΘΟ: η αναπλαισίωση εννοιών της ακουστικής με στόχο την παραγωγή εκπαιδευτικού υλικού για παιδιά	Ν. Μπάρκας, Α. Δημητρίου, Β. Χρηστίδου, Μ. Παπαδοπούλου	FOR-EST: Η άλλη διάσταση του τοπίου - Η άλλη όψη του ηχητικού υλικού
			Σ. Μανιτσάρης, Β. Τσεκουροπούλου, Β. Γκατζιάκη, Χ. Βολιώτη, Α. Γκλουσκόβα
			Χ. Καραμήτσος, Κ. Μπακογιάννης, Γ. Καμπουράκης
			Κ. Μπακογιάννης, Γ. Καμπουράκης
			Β. Τσεκουροπούλου, Δ. Παπαδόπουλος

12.00 - 12.30 **Διάλειμμα**

12.30 - 13.30	<b>Συνεδρία A6</b> Υποβρύχια Ακουστική	<b>Προεδρείο:</b> Μ. Ταρουδάκης, Π. Μενούνου	<b>Συνεδρία B6</b> Ηχοτοπία
12.30 - 12.45	Ένα μοντέλο Nx2D για τον υπολογισμό της διάδοσης ακουστικών σημάτων στη θάλασσα σε περιβάλλοντα με τρισδιάστατη γεωμετρία.	Μ. Ταρουδάκης	On the Sound of Urban Centres: EU COST Action TD0804 "Soundscape of European Cities and Landscapes"
12.45 - 13.00	Παραμετρική ανάλυση του συντελεστή ανάκλασης από στρωματοποιημένο πυθμένα δύο στρωμάτων με επικλινή διεπιφάνεια	Π. Παπαδάκης, Γ. Πυτεράκης, Μ. Καλογεράκης	Χρόνο-Σφαίρες: μελέτη του αστικού οσμο-ηχο-τοπίου της Θεσσαλονίκης
13.00 - 13.15	Ακουστικές μετρήσεις στον κόλπο του Ηρακλείου	Π. Παπαδάκης, Ε. Σκαρσουλής, Γ. Πυτεράκης, Μ. Καλογεράκης, Ε. Ορφανάκης	Αναπαράσταση των ηχοτοπιών της Θεσσαλονίκης του 1912
13.15 - 13.30			Τα ηχητικά «μυστήρια» που καθιστούν την καθημερινότητα στη σύγχρονη Θεσσαλονίκη μοναδική
			Δ. Ψαρρά, Χ. Γούσιος, Α. Καραποστόλη
			Α. Καραποστόλη, Ν.Τσινίκας

13.30 - 16.00 **Μεσημεριανό Διάλειμμα - sound walks**

ΤΡΙΤΗ 21/10/20014

16.00 - 17.30	<b>Συνεδρία Α7</b> - Ηλεκτρακουστική - Υπολογιστική Ακουστική - Δικτυακές Εφαρμογές	<b>Προεδρείο:</b> Δ. Σκαρλάτος, Ρ. Κωτσάκης	<b>Συνεδρία Β7</b> Περιβαλλοντική Ακουστική - Ηχορύπανση - Ηχοπροστασία	<b>Προεδρείο:</b> Γ. Μπάμνιος, Β. Βασιλειάδης
16.00 - 16.15	Κατασκευή και αξιολόγηση μικροφώνου ηχητικού πεδίου (soundfield)	Κ. Γκάλιος, Χ. Δημούλας, Γ. Καλλίρης	Προστασία από θορύβους μουσικής κέντρων διασκέδασης στην Ελλάδα: συμβολή στη μελέτη του σχετικού νομοθετικού πλαισίου	Α. Σωτηροπούλου, Γ. Καμπουράκης, Γ. Βλάχος, Β. Γεωργιοπούλου
16.15 - 16.30	Ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία	Χ. Παπαδάκος, Ι. Μουρτζόπουλος	Μείωση θορύβου από νυχτερινά κέντρα με χρήση πολυκάναλου συστήματος ενεργού ελέγχου του θορύβου	Ν. Ζαφειρόπουλος, Σ. Ποτηράκης
16.30 - 16.45	Educational Examples in Structural Acoustics Using the Finite Element Method	N. Tsagarakis, S. Kouzouris	Ακουστική μελέτη στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου	Α. Καρατζούνης, Χ. Σοφianού, Κ. Μπακογιάννης, Γ. Καμπουράκης
16.45 - 17.00	Προσομοίωση χαμηλόσυχνου ηχητικού πεδίου σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους, παραγόμενου από σύνθετες πηγές προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας, με την εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	Χ. Σεβαστιάδης, Μ. Γιουβανάκης, Γ. Παπανικολάου	The QUIET-TRACK Project - Noise Mitigation Measures at ISAP Line 1	Κ. Vogiatzis, C. Antoniadis, V. Liapis, N. Konstantopoulos, A. Argyroulos
17.00 - 17.15	Μελέτη απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων σε χώρους μέσω συστήματος πολλαπλών subwoofer	Γ. Καμάρης, Θ. Αλτάνης, Ι. Μουρτζόπουλος	Ηχοαπορροφητική επένδυση γραμμής στο δίκτυο ΗΣΑΠ: συμβολή στην αστική ηχοπροστασία	Γ. Πουλάκος, Α. Μπαλλής, Α. Σωτηροπούλου, Α. Στογιάννου, Ε. Χατζηλιάδη
17.15 - 17.30	Audio Semantic and Intelligent Processing Concepts in the New Media Environment: A Cloud Computing Model	Ε. Σιδιροπούλου, Ρ. Kotsakis, C. Dimoulas, G. Kalliris, A. Veglis	Η μέχρι σήμερα πορεία της στρατηγικής χαρτογράφησης του περιβαλλοντικού θορύβου στην Ελλάδα	Β. Δαλαμάγκας, Κ. Βογιατζής, Χ. Αντωνιάδης, Ν. Κωλέττης

17.30 - 18.00

**Διάλειμμα**

18.00 - 18.45	<b>Συνεδρία Α8</b> Υποβρύχια Ακουστική - Γεωλογικές εφαρμογές - Εφαρμογές υπερήχων - Εκπαίδευση και Ακουστική	<b>Προεδρείο:</b> Π. Παπαδάκης, Σ. Ποτηράκης
18.00 - 18.15	Μελέτη της διάδοσης θορύβου σεισμού στο υποθαλάσσιο περιβάλλον	Μ. Ταρουδάκης, Γ. Μαστρόκαλος
18.15 - 18.30	Χαρακτηρισμός υποθαλάσσιων ακουστικών σημάτων με χρήση βίο-μαθηματικού μοντέλου των ψυχο-ακουστικών μηχανισμών των Μεγάπττερων φαλαινών.	Κ. Σμαραγδάκης, Μ. Ταρουδάκης
18.30 - 18.45	Ανάπτυξη πολυμεσικής εφαρμογής για τη διδασκαλία του ήχου και της μουσικής σε μαθητές με ειδικές εκπαιδευτικές δυσκολίες	Ε. Καψούρα, Ρ. Κωτσάκης, Γ. Καλλίρης

18.45 - 19.00

**Λήξη συνεδρίου**

***Ανακατασκευή αρχαίων λυρών με χρήση 3d τεχνολογιών  
και μεθόδων ακουστικής ανάλυσης:  
The Lyre 2.0 Project***

N. Κουμαρτζής<sup>a</sup>, P. Κωτσάκης<sup>b</sup>, Γ. Καλλίρης<sup>c</sup> & A. Βέγλης<sup>d</sup>

Εργαστήρια Εφαρμογών Πληροφορικής στα Μ.Μ.Ε. & Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε.  
Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

<sup>a</sup>[nkoumartzis@gmail.com](mailto:nkoumartzis@gmail.com), <sup>b</sup>[rkotsakis@gmail.com](mailto:rkotsakis@gmail.com), <sup>c</sup>[gkal@jour.auth.gr](mailto:gkal@jour.auth.gr), <sup>d</sup>[veglis@jour.auth.gr](mailto:veglis@jour.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία προτείνει μία πρωτότυπη προσέγγιση στην έρευνα πάνω στις αρχαίες ελληνικές λύρες: α. ξεκινώντας από τη μελέτη αρχαίων γραπτών πηγών και αναπαραστάσεων σε αμφορείς για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οργάνων (product specifications), β. χρησιμοποιώντας σύγχρονες μεθόδους τρισδιάστατης σάρωσης (3d Scanning ως μέθοδο reverse engineering) και τρισδιάστατης σχεδίασης (3d modeling) για τη δημιουργία λεπτομερών κατασκευαστικών σχεδίων, γ. εκμεταλλευόμενη την πλούσια παράδοση οργανοποιίας έγχορδων οργάνων της Ελλάδας (χρησιμοποιώντας μόνο φυσικά υλικά διαθέσιμα στην αρχαιότητα) για την κατασκευή δύο πρώιμων μοντέλων (χέλυσ και βάρβιτος) και τέλος δ. ελέγχοντας τα από ακουστικής άποψης για τον προσδιορισμό των ηχητικών τους χαρακτηριστικών (με συγκριτική ανάλυση 6 επιμέρους βασικών χαρακτηριστικών όπως centroid, standard deviation κ.ά.). Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται ορισμένα μεταγενέστερα πρωτότυπα πιο εξελιγμένων λυρών, μιας και απώτερος στόχος της προσπάθειας αυτής είναι η ανάδειξη τους εκ νέου ως μουσικά όργανα άξια της προσοχής της παγκόσμιας μουσικής κοινότητας. Στο εν λόγω project συμμετείχαν η εταιρία “Μουσικά Όργανα Αναστάσιος”, τα 3d Labs του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδας, καθώς και το εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε. του Τμήματος Δημοσιογραφίας & Μ.Μ.Ε του Α.Π.Θ.*

***Reconstruction of ancient lyres using 3d technologies  
and methods of sound analysis:  
The Lyre 2.0 Project***

## **ABSTRACT**

*In this paper, the authors suggest a novel approach regarding the research of the ancient Greek lyres: a. beginning with literature research of ancient written sources and related representations of amphorae (known too as melanomorpha) for*



*defining lyre's product specifications, b. by using state-of-the-art 3d technologies for scanning turtle shells and modelling the music instrument in order to create detailed product drawings, c. by relying at the today's Greek luthier's methods of constructing stringed instruments in order to produce two types of the ancient lyre (helys and barbiton, using only natural materials available during the antiquity), and at last d. testing the instruments to define their audio properties (thanks to a comparative analysis of 6 basic audio features such as centroid, standard deviation etc.). In addition, more advanced prototypes are being presented having in mind that the final goal of this project is to re-introduce the ancient lyre as a modern music instrument for the worldwide music community. In the Lyre 2.0 Project participated "Anastasios Music Instruments" company, International Hellenic University's 3d Labs and Dept. of Journalism & Media's Electronic Media Lab (Aristotle University of Thessaloniki).*

## **1. Εισαγωγή**

Το πεδίο κατασκευής μουσικών οργάνων αποτελεί πλέον έναν άκρως ανεπτυγμένο κλάδο, ο οποίος προσφέρει πληθώρα οργάνων ικανών να παράξουν μία μεγάλη ποικιλία ήχων και μουσικών κομματιών. Όλα αυτά φυσικά οφείλονται σε σημαντικά βήματα προόδου που έχουν γίνει κατά καιρούς, από την συμβολή του Πυθαγόρα στη μουσική θεωρία έως τη βιομηχανική επανάσταση και την εξέλιξη των μουσικών οργάνων σε ένα προϊόν προσβάσιμο στην πλειοψηφία της ανθρωπότητας.

Σήμερα πλέον, είναι ξεκάθαρο ότι η κατασκευή μουσικών οργάνων εισέρχεται σε μία νέα περίοδο καινοτομιών, χάρη στην εξέλιξη σύγχρονων μεθόδων αναπαράστασης και καταγραφής (βλ. 3d scanning, 3d modelling κ.ά.). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το "εκτυπωμένο φλάουτο", το οποίο για πρώτη φορά εισήγαγε την τρισδιάστατη εκτύπωση στην κατασκευή μουσικών οργάνων [1] και αναμένεται να επηρεάσει βαθύτατα το μέλλον του κλάδου από πολλές απόψεις.

Μέσα στο διεθνές αυτό πλαίσιο εντάσσεται και η παρούσα εργασία, η οποία επιδιώκει την ανακατασκευή αρχαίων μουσικών λυρών με απώτερο στόχο να γίνουν προσβάσιμα, στην πλειοψηφία των σύγχρονων (επαγγελματιών και μη) μουσικών, ποιοτικές εκδοχές αυτών σε χαμηλή τιμή. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, σύγχρονες μέθοδοι τρισδιάστατης καταγραφής και αναπαράστασης έχουν χρησιμοποιηθεί.

## **2. Αρχαίες πηγές και αναπαραστάσεις σε αμφορείς**

Δεν υπάρχει πλέον καμία αμφιβολία ότι πολλοί λαοί της Ανατολής χρησιμοποιούσαν παρόμοια μουσικά όργανα αρκετά προτού τα ανακαλύψουν οι αρχαίοι Έλληνες [2], έστω και αν σύμφωνα με την ελληνική μυθολογία ο Θεός Ερμής ήταν αυτός που εφηύρε τη λύρα: ένα έγχορδο μουσικό όργανο με καύκαλο χελώνας για ηχείο, έντερα για χορδές, ξύλο και κόκκαλο για τα υπόλοιπα μέρη του [3]. Ως όργανο ήταν ανάμεσα στα πλέον διαδεδομένα της αρχαιότητας, με αρκετές μάλιστα εκδοχές και "απογόνους": λύρες τύπου χέλως και βάρβιτος, επιγώνιον, φόρμιγξ κ.ά. [4]

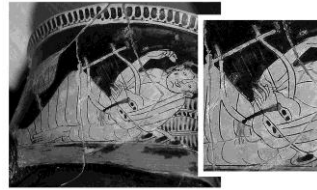
Μία από τις πλέον σημαντικές σχετικές αρχαίες πηγές είναι ο "Ύμνος στον Ερμή" του Ομήρου, η συγγραφή του οποίου τοποθετείται ανάμεσα στον 12ο και 8ο

αίωνα π.Χ. [5] και περιγράφει την ιστορία του εφευρέτη της πρώτης λύρας (τύπου χέλυσ). Μεταξύ άλλων, εξηγεί πως κατασκευάστηκε η πρώτη λύρα, χρησιμοποιώντας καύκαλο χελώνας και έντερα για χορδές [6]. Περαιτέρω πληροφορίες για την κατασκευή της υπάρχουν στο έργο του Φιλόστρατου του Γηραιού, Έλληνας ρήτορα του 3ου αιώνα [7].

Πέρα από τις γραπτές πηγές, πολλά χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και από αναπαραστάσεις αρχαίων λυρών σε πλήθος αρχαιοελληνικών αγγείων, κυρίως από τον 8ο έως τον 5ο αιώνα π.Χ. (βλ. εικόνες 1 και 2).



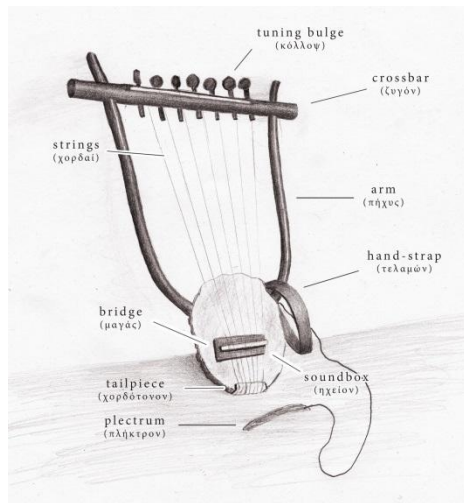
Εικόνα 1



Εικόνα 2

### 3. Τα χαρακτηριστικά μίας αρχαίας λύρας

Σύμφωνα με τις παραπάνω πηγές, μία λύρα αποτελείται από 9 βασικά μέρη όπως εμφανίζονται στο σκίτσο 1.



Σκίτσο 1: Τα μέρη μίας αρχαίας ελληνικής λύρας

α) Καύκαλο χελώνας για ηχείο (υπολείμματα καυκάλων ως μέρος μουσικών οργάνων έχουν βρεθεί σε διάφορες ανασκαφές όπως στην Άρτα, το Άργος, την Ελευσίνα και την Κέρκυρα [8].

β) Δύο βραχίονες από ξύλο (πήχυς στην αρχαία Ελλάδα).

γ) Ο ζυγός από ξύλο.

δ) Οι *κόλλοπες* (αρχαίος μηχανισμός κουρδίσματος) που αποτελούνταν από ένα κομμάτι δέρματος στο οποίο δενόταν η χορδή και στη συνέχεια τύλιγε τον ζυγό.

ε) Οι *χορδές*, κατασκευασμένες από έντερα ζώου (όπως αναφέρει και ο Όμηρος στον “Ύμνο προς τον Ερμή”).

στ) Η *γέφυρα* (*μαγάς* στην αρχαία Ελλάδα), ο σημερινός *καβαλάρης* στα έγχορδα όργανα (σύμφωνα με τον Ησύχιο τον Αλεξανδρεύς, ο *μαγάς* ήταν ένα ορθογώνιο κομμάτι ξύλου με καμπύλες).

ζ) Ο *χορδοκράτης* (*χορδότονον* στην αρχαία Ελλάδα), κατασκευασμένος από μέταλλο για να κρατάει τις χορδές.

η) Ο *τελαμώνας*, ένα κομμάτι δέρματος που χρησιμοποιούνταν για να σταθεροποιεί ο μουσικός τη λύρα πάνω του.

θ) Τέλος, το *πλήκτρον*, ένα μικρό επίπεδο κομμάτι από ξύλο ή κόκκαλο που χρησιμοποιούνταν ως πένα.

#### 4. Τρισδιάστατη αναπαράσταση και μοντελοποίηση

Έχοντας ανά χείρας τα product specifications της αρχαίας λύρας, επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία λεπτομερών κατασκευαστικών σχεδίων. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε μία σύγχρονη (καθώς και νέα, για τα δεδομένα της σύγχρονης οργανοποιίας) προσέγγιση μέσω χρήσης 3d τεχνολογιών.

Εξαιτίας του οργανικού σχήματος των καυκάλων, ήταν εξαιρετικά δύσκολο να προχωρήσουμε άμεσα στη 3d σχεδίαση – μοντελοποίηση της λύρας. Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκε αρχικά ένα 3d μοντέλο καυκάλου μέσω τρισδιάστατου σκαναρίσματος. Η διαδικασία έγινε στα 3d Labs του Διεθνούς Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, όπου χρησιμοποιήθηκε ένα μεσαίου μεγέθους καύκαλο (το οποίο είχε συλλεχθεί στην ευρύτερη περιοχή της Παιονίας, Κιλκίς). Χάρη στον NextEngine 3D laser scanner τα πρώτα αρχεία συλλέχθηκαν, τα οποία στη συνέχεια δέχθηκαν επεξεργασία στο software ScanStudio για να μετατραπούν σε αρχεία .STL και να εισαχθούν στο software Solidworks για την περαιτέρω 3d μοντελοποίηση του μουσικού οργάνου.

Ενδεικτικά, παρακάτω παρουσιάζονται δύο εικόνες (3 & 4) από τις δύο αυτές φάσεις του σχεδιασμού, καθώς και μέρος των κατασκευαστικών σχεδίων που παράχθηκαν στη συνέχεια αυτόματα χάρη στο software Solidworks.



Εικόνα 3



Εικόνα 4

## 5. Κατασκευάζοντας μία αρχαία ελληνική λύρα

Εν συντομία, θα αναφερθούμε εδώ στα φυσικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αρχαίων λυρών του The Lyre 2.0 Project. Δεν θα προχωρήσουμε σε περιγραφή των διαδικασιών παραγωγής, μιας και κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Πιστοί στην πρώιμη αρχαία παράδοση, καύκαλα χελώνας χρησιμοποιήθηκαν για το ηχείο του οργάνου. Για το “καπάκι” του ηχείου, χρησιμοποιήθηκε δέρμα αγελάδας, ενώ για τους βραχίονες, τον ζυγό και τον μαγά επιλέχθηκε σφενδάμι (ένα ξύλο γνωστό για τη “μουσικότητα” του). Για τον χορδοκράτη επιλέχθηκε τόσο ξύλο όσο και μέταλλο, ενώ για το κούρδισμα του οργάνου προτιμήθηκαν σύγχρονα “κλειδιά” και όχι κόλλοπες για πρακτικούς λόγους (μιας και όπως αναφέρθηκε, στόχος του project είναι η παραγωγή ποιοτικών μουσικών οργάνων που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από σύγχρονους οργανοπαίκτες).

Τέλος, έντερα ζώου επιλέχθηκαν για τις χορδές, μιας και αυτά συμπεριφέρονται ως ελαστομερή (είναι δηλαδή ιδιαίτερα εύκαμπτα). Αν και χορδές κατασκευασμένες από πλαστικό ή μέταλλο είναι σήμερα διαθέσιμες, δεν είναι λίγοι οι σύγχρονοι μουσικοί που προτιμούν τις εντέρινες εξαιτίας της ανώτερης μουσικής τους συμπεριφοράς [9].



Εικόνες 5,6: Οι Λύρες τύπου «Χέλως» και «Βάρβιτος», οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των ηχογραφήσεων.

## 6. Ακουστική ανάλυση των μουσικών οργάνων

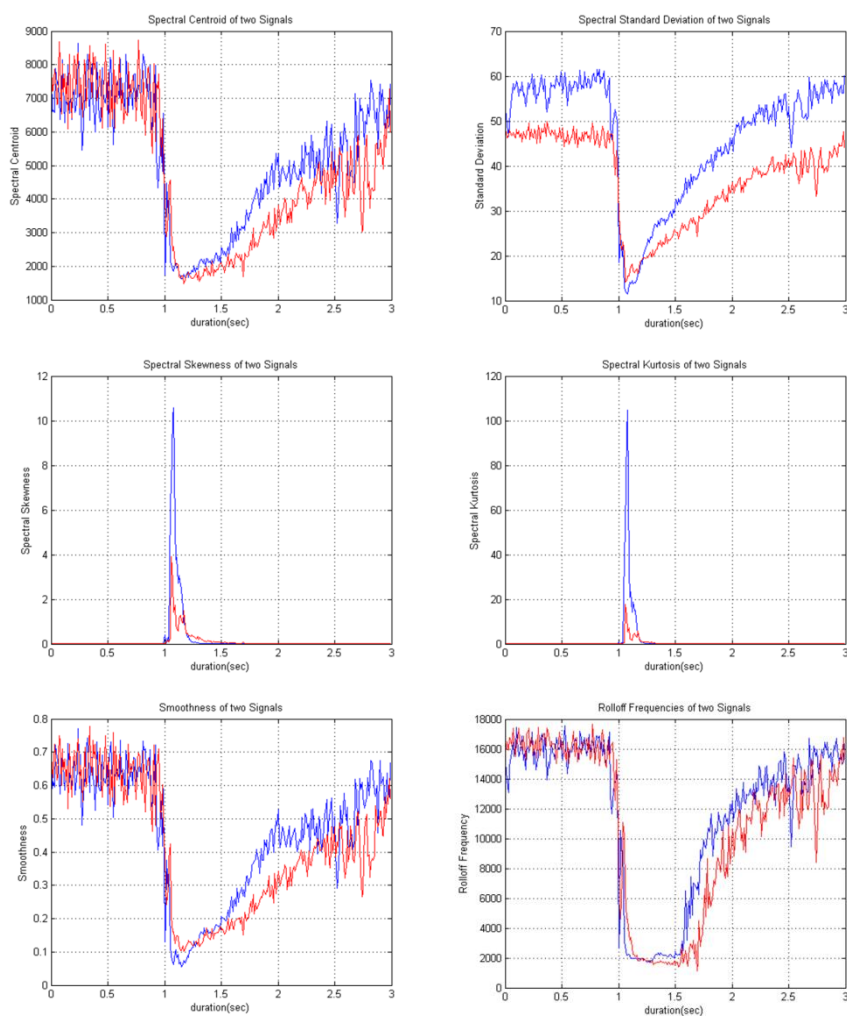
Όπως αναφέρθηκε ήδη, δύο πρώιμα μοντέλα αρχαίων λυρών χρησιμοποιήθηκαν για την ηχογράφιση, μία λύρα τύπου *βάρβιτος* (με κυρτούς βραχίονες, κουρδισμένη στον φρυγικό τρόπο, βλέπε εικόνα 6) και μία τύπου *χέλως* (με κερατοειδούς μορφής βραχίονες, κουρδισμένη στον λύδιο τρόπο, βλέπει εικόνα 5).

Η ηχογράφιση έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε. του τμήματος Δημοσιογραφίας & Μ.Μ.Ε. του Α.Π.Θ. Για τις ανάγκες των ηχογραφήσεων χρησιμοποιήθηκαν: α. ένα Phonic PAA3 audio analyzer, β. ένα Behringer ECM8000 πυκνωτικό μικρόφωνο και γ. ένα Zoom H4n για στερεοφωνική ηχογράφιση. Κατά τη διάρκεια των ηχογραφήσεων, ένας παίκτης έπαιξε και με τις δύο λύρες, μία νότα τη φορά [10].

Στο τέλος των ηχογραφήσεων, παρήχθησαν μία σειρά από σύντομα audio αρχεία κάθε νότας των αρχαιοελληνικών λυρών, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για συγκριτική ανάλυση 6 επιμέρους βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως περιγράφονται στη συνέχεια [11].

Τα δύο σήματα που εμφανίζονται σε κάθε ανάλυση παρακάτω αντιπροσωπεύουν τις δύο αντίστοιχες νότες που παρήχθησαν από τις λύρες βάρβιτος και χέλυς. Τα δύο σήματα έχουν αρχική διάρκεια 3 δευτερόλεπτα, ενώ κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν διαδικασίες κανονικοποίησης σήματος στο λογισμικό Adobe Audition, ώστε να ανταποκρίνονται στην ίδια δυναμική περιοχή κατά τη σύγκρισή τους. Στη συνέχεια, με το λογισμικό ανοιχτού κώδικα Rhythm [12], τα ηχητικά σήματα καταμήθηκαν σε χρονικά παράθυρα διάρκειας 100 ms, για να πραγματοποιηθεί φασματική ανάλυση στα νέα δείγματα (segments, frames). Χρησιμοποιώντας το εργαλείο MIRtoolbox [13] στο περιβάλλον του λογισμικού Matlab, πραγματοποιήθηκε εξαγωγή έξι βασικών χαρακτηριστικών του σήματος και εν προκειμένω είναι: a. Centroid, b. Spread (Standard Deviation), c. Skewness, d. Kurtosis, e. Flatness (Smoothness) και f. Rolloff Frequency [14] [15].

Οι τιμές των προαναφερθέντων ηχητικών χαρακτηριστικών που εξήχθησαν απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Το μπλέ χρώμα αποδίδεται στο σήμα της λύρας βάρβιτος και το κόκκινο στο σήμα της λύρας χέλυς.



Από τα παραπάνω σχήματα μπορούμε να συμπεράνουμε πως ο μέσος όρος (centroid) και η τυπική απόκλιση (standard deviation) στη φασματική περιοχή είναι πολύ κοντά για τα δύο σήματα αναδεικνύοντας μεγάλες ομοιότητες στο φασματικό τους περιεχόμενο. Αξίζει να σημειωθεί πως η διαφοροποίηση είναι μεγαλύτερη στα χαρακτηριστικά της ασυμμετρίας και κύρτωσης, γιατί αποτελούν στατιστικές τρίτης και τέταρτης τάξης αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η μικρή απόκλιση του μέσου όρου (centroid), τετραγωνίζεται στην διακύμανση (spread), ενώ στην ασυμμετρία (skewness) και κύρτωση (kurtosis) εμφανίζονται πλέον οι δυνάμεις του 3 και 4 αντίστοιχα, αποδίδοντας ελαφρώς μεγαλύτερες αποκλίσεις στην αρχική διαφοροποίηση του σήματος.

Εν κατακλείδι όμως, αυτό που συνάγεται ως κύριο συμπέρασμα είναι πως οι δύο νότες παρουσιάζουν μεγάλες φασματικές ομοιότητες, όπως φαίνεται καταρχήν από τις στατιστικές πρώτης και δεύτερης τάξης και εν συνεχεία από τα χαρακτηριστικά της ομαλότητας (smoothness) και συχνότητας αποκοπής (rolloff frequency) του σήματος, που περιγράφονται στα παραπάνω διαγράμματα.

Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας, αν αναλογιστεί κανείς τη ακαθόριστη φύση των φυσικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (δύο διαφορετικά καύκαλα χελώνας φέρουν μεγάλες διαφορές σε μέγεθος, δύο κομμάτια ξύλου διαφέρουν ως προς τη σύσταση τους κ.λπ.) και πως συγκεκριμένες κατασκευαστικές μέθοδοι δύνανται τελικά να εξασφαλίσουν πανομοιότυπα ηχητικά χαρακτηριστικά.

## 7. Συμπεράσματα και μελλοντικά σχέδια

Ήδη το *The Lyre 2.0 Project* βρίσκεται στη τρίτη φάση ανάπτυξης του, μιας και έχει ήδη κατασκευαστεί η τρίτη γενιά λυρών. Πλέον, πέρα από τα καύκαλα χελώνας για ηχεία, έχουν παραχθεί λύρες με ηχείο από ξύλο (τόσο με τη μέθοδο του σκαψίματος, όσο και με τη μέθοδο των “ντουγών” που συναντάται στην κατασκευή μπουζουκιών [16]) προσφέροντας έτσι πολύ πιο πλούσιο ήχο και μεγαλύτερη τυποποίηση των παραγόμενων μουσικών οργάνων.



Εικόνα 7: Λύρα με σκαφτό ξύλινο ηχείο



Εικόνα 8: Λύρα με ξύλινο ηχείο από ντούγιες



Τέλος, το The Lyre 2.0 Project έχει ήδη εισέλθει στο στάδιο συνεργασίας με μουσικούς, τόσο από Ελλάδα όσο και από εξωτερικό, για τη διοργάνωση συναυλιών και ηχογράφηση των πρώτων μουσικών album με τις αρχαίες λύρες. Για το σκοπό αυτό, έχουν ήδη συλλεχθεί περί των 40 αρχαίων μουσικών κομματιών [17] τα οποία και ηχογραφούνται σταδιακά, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον *Επιτάφιο του Σείκιλου* (2ος αι. π.Χ.), την παλαιότερη ολοκληρωμένη μελωδία που σώζεται σήμερα.

## 8. Βιβλιογραφία

- [1] Zoran A., (2011). The 3D Printed Flute: Digital Fabrication and Design of Musical Instruments. *Journal of New Music Research*, 40, 379–387.
- [2] Wilkinson, J. G. (2013). *Manners and Customs of the Ancient Egyptians*, pp. 272 and 280. Cambridge Library Collection - Archaeology. September 2013.
- [3] Creese D. E., *The Origin of the Greek Tortoise-Shell Lyre*. Dalhousie University Halifax, Nova Scotia. August 1997.
- [4] Georgiou, M.P. (2007). *Ancient Greek Music instruments*, p. 34. En *Tipis Publications*, 2007.
- [5] Athanasakis A., *The Homeric Hymns*, 2nd Edition, 2004.
- [6] Wilson N., *Encyclopedia of Ancient Greece*, Taylor and Francis Group LLC, New York, 2006.
- [7] Fairbanks A., *Philostratus the Elder, Imagines. Philostratus the Younger, Imagines. Callistratus, Descriptions*. (Loeb Classical Library No. 256), 1931.
- [8] Renfrew, C. (1985). *The Archaeology of Cult: The Sanctuary at Phylakopi*, p. 325. Thames and Hudson, London.
- [9] Rossing, Thomas (2010). *The Science of String Instruments*. Standford, CA: Springer Science Business Media, LLC. pp. 20–21.
- [10] Ν. Κουμαρτζής (2013). *The Lyre 2.0 Project*, διπλωματική εργασία στο MSc in Strategic Product Design του Διεθνούς Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.
- [11] Μουσικά Όργανα Αναστάσιος (2013). “Αρχαία Λύρα”, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://luthieros.com/what-i-do>
- [12] Rossum G. et al. (1991). Python Language Website, online [www.python.org](http://www.python.org)
- [13] Lartillot O., Toiviainen P. (2007). *Mir in matlab (ii): A toolbox for musical feature extraction from audio*, in *Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval*, Vienna.
- [14] Kotsakis R., Kalliris G., Dimoulas C. (2012). Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification, *Speech Communication*, Vol. 54, no. 6, pp. 743-762, 2012.
- [15] Kotsakis R., Kalliris G., Dimoulas C. (2012). Investigation of salient audio-features for pattern-based semantic content analysis of radio productions, in *proceedings of the 132nd AES Convention*, Budapest (paper no. 8663), 2012.
- [16] Koumartzis A. (2011). *A.N.E.M.O.*, iWrite Publications.
- [17] Pohlmann E., West M. L. (2001). *Documents of Ancient Greek Music, The Extant Melodies and Fragments* edited and transcribed with commentary, Oxford University Press.

## ***Δονητικά χαρακτηριστικά παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με τη χρήση λέιζερ και θεωρητικών προσομοιώσεων***

I. Σιδηράς<sup>1,a</sup>, E. Κοκκινάκης<sup>1,b</sup>, I. Ορφανός<sup>2,c</sup>, E. Μπακαρέζος<sup>1,2,d</sup>, E. Κασελούρης<sup>2,e</sup>,  
B. Δημητρίου<sup>2,3,f</sup> & N.A. Παπαδογιάννης<sup>1,2,g</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100 Ρέθυμνο

<sup>2</sup> Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Laser, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

<sup>3</sup> Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρωμανού 3, Χαλέπα, 73133 Χανιά

<sup>a</sup> [johnironf2vs@hotmail.com](mailto:johnironf2vs@hotmail.com), <sup>b</sup> [kokkis.manos@hotmail.com](mailto:kokkis.manos@hotmail.com), <sup>c</sup> [yorphanos@staff.teicrete.gr](mailto:yorphanos@staff.teicrete.gr),

<sup>d</sup> [bakarezos@staff.teicrete.gr](mailto:bakarezos@staff.teicrete.gr), <sup>e</sup> [v.kaselouris@chania.teicrete.gr](mailto:v.kaselouris@chania.teicrete.gr),

<sup>f</sup> [dimvasi@chania.teicrete.gr](mailto:dimvasi@chania.teicrete.gr), <sup>g</sup> [npapadogiannis@staff.teicrete.gr](mailto:npapadogiannis@staff.teicrete.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή γίνεται μια πρώτη προσπάθεια συστηματικής επιστημονικής μελέτης των δονητικών χαρακτηριστικών τέτοιων παραδοσιακών κρουστών. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται μια ολοκληρωμένη μέθοδος που περιλαμβάνει τόσο οπτικές και μηχανικές πειραματικές τεχνικές, αλλά και θεωρητική μοντελοποίηση. Μελετήθηκαν πειραματικά οι χαρακτηριστικές ιδιοσυχνότητες και οι αντίστοιχοι κανονικοί τρόποι δόνησης, τόσο της μεμβράνης όσο και του πλαισίου, με τη χρήση ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφιδών (*Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI*) με λέιζερ, αλλάζοντας παραμέτρους όπως τάσεις χορδίσματος, μεμβράνες, θερμοκρασία και αέρινη κοιλότητα. Αναπτύχθηκε θεωρητικό μοντέλο ακριβούς CAD-προσομοίωσης της δομής ενός τέτοιου οργάνου και μελετήθηκαν τα δονητικά του χαρακτηριστικά με την χρήση αλγορίθμων πεπερασμένων στοιχείων με αναλυτική διακριτοποίηση της κυματικής εξίσωσης για την ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων (*modal analysis*). Η συμφωνία των πειραματικών αποτελεσμάτων και των θεωρητικών προβλέψεων επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της μεθόδου, η οποία μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο για την μελέτη, κατασκευή, πιστοποίηση και προτυποποίηση κρουστών μουσικών οργάνων.

### ***Vibrational characteristics of traditional percussion instruments studied with the use of laser-based techniques and theoretical simulations***

#### **ABSTRACT**

*This work constitutes an initial effort of a systematic scientific study of the vibrational characteristics of traditional percussion instruments. For this purpose,*



*an integrated method is applied, which includes both optical and mechanical experimental techniques, as well as theoretical modeling. The characteristic eigenfrequencies and the corresponding normal vibrational modes, of both the drumhead membrane and the instrument's body, are experimentally studied with the use of a laser-based Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) technique, while varying parameters such as tuning tension, membrane type, temperature and sound enclosures. In addition, the instrument is accurately modeled using a CAD-based simulation and its vibrational characteristics are theoretically studied using finite element algorithms with analytical discretization of the wave equation for modal analysis. The agreement between the experimental results and the theoretical predictions confirm the validity of the applied method, which can be a valuable tool for the study, construction, quality control and standardization of percussion musical instruments.*

## **Εισαγωγή**

Τα κρουστά όργανα είναι τα αρχαιότερα μουσικά όργανα και είναι διεθνώς εκτενώς μελετημένα ως προς τις ακουστικές τους ιδιότητες [1]. Όμως ελάχιστες και μη-συστηματικές μελέτες έχουν γίνει σε παραδοσιακά κρουστά του νοτιοανατολικού μεσογειακού χώρου. Αυτά συνήθως αποτελούνται από ένα κυλινδρικό πλαίσιο με ειδική στεφάνη πάνω στην οποία έχει τεντωθεί μεμβράνη δέρματος ζώου ή πλαστική μεμβράνη. Οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης τόσο της μεμβράνης όσο και του πλαισίου παίζουν σημαντικό ρόλο στα ακουστικά χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου ήχου.

Στην εργασία αυτή μελετώνται οι χαρακτηριστικές ιδιοσυχνότητες και οι αντίστοιχοι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης μπεντίρ, τόσο της μεμβράνης όσο και του πλαισίου, με την χρήση ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) με laser [2], αλλάζοντας παραμέτρους όπως τάσεις κourδίσματος, μεμβράνες, θερμοκρασία και όγκο αέρινης κοιλότητας. Το όργανο προσομοιώνεται μέσω ακριβούς CAD-προσομοίωσης της δομής του. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε με την χρήση αλγορίθμων πεπερασμένων στοιχείων με αναλυτική διακριτοποίηση της κυματικής εξίσωσης για την ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων (modal analysis).

### **1. Το μπεντίρ (bendir): περιγραφή και φυσική αντιμετώπιση**

Το μπεντίρ είναι ένα κρουστό όργανο αποτελούμενο από ένα κυλινδρικό ξύλινο πλαίσιο και μια μεμβράνη [3]. Έχει καταγωγή από την βόρεια Αφρική. Οι διαστάσεις του ποικίλουν, με τις πιο συνηθισμένες να είναι 35–45cm όσον αφορά την διάμετρο της στεφάνης. Κατασκευάζεται τοποθετώντας σε ένα κυλινδρικό ξύλινο πλαίσιο μια μεμβράνη από φυσικό δέρμα (ενίοτε και συνθετικό) μόνο από την μία μεριά χωρίς να προστίθενται κάποιες «ζήλιες» (μεταλλικά πλακίδια). Το μπεντίρ κατά το παίξιμο βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση και στηρίζεται από τον αντίχειρα του αριστερού χεριού σε ειδικές τρύπες στο πλαίσιο.

Για να βρούμε τους τρόπους δόνησης της κυκλικής μεμβράνης επιλύουμε την κυματική εξίσωση των ταλαντώσεων σε πολικές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right) \quad (1.1)$$

με τη μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών, θέτοντας  $u(r, \theta, t) = R(r) \Theta(\theta) e^{j\omega t}$ , από την κυματική εξίσωση μεταβαίνουμε σε κανονικές διαφορικές εξισώσεις, μία εκ των οποίων είναι η

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{dR}{dr} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{r^2}\right) R = 0 \quad (1.2)$$

Αντικαθιστώντας όπου  $y = R$  και  $x = kr = \omega r/c$  η εξίσωση ανάγεται στη

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{m^2}{x^2}\right) y = 0 \quad (1.3)$$

η οποία είναι εξίσωση Bessel, η λύση της οποίας είναι  $R(r) = J_m(k_{mn}r)$  για  $m=0,1,\dots$  και  $n=1,2,\dots$ , όπου  $k_{mn} = \frac{\alpha_{mn}}{r_0}$ ,  $\alpha_{mn}$  η n-ιστή θετική ρίζα του  $J_m$  και  $r_0$  η

ακτίνα της μεμβράνης. Η τελική εξίσωση της μετατόπισης έχει τη μορφή:

$$u_{mn}(r, \theta, t) = J_m(k_{mn}r)(A \cos m\theta + B \sin m\theta)e^{j\omega t} \quad (1.4)$$

για  $m=0,1,\dots$  και  $n=1,2,\dots$ . Η νιοστή τιμή της  $J_m(k_{mn}r)$  δίνει την συχνότητα του τρόπου δόνησης  $f(m,n)$ , η οποία θα έχει  $m$  κομβικές διαμέτρους και  $n$  κομβικούς κύκλους.

Το πλαίσιο παράγει ήχο με δυο τρόπους δόνησης. Οι πρώτοι, χαμηλότεροι επεκταμένοι τρόποι δόνησης, οι οποίοι σχετίζονται με τις ελαστικές δυνάμεις του πλαισίου κι έτσι δημιουργούνται δυνάμεις επαναφοράς. Οι δεύτεροι είναι οι μη επεκταμένοι ή καμπτικοί τρόποι δόνησης. Όταν η μεμβράνη διεγείρεται προς τα άκρα της, μακριά από το κέντρο, προκύπτουν πιέσεις με γωνιακή εξάρτηση  $\sim \cos n\varphi$  στο πλαίσιο, οι οποίες είναι ικανές να διεγείρουν τους μη επεκταμένους τρόπους δόνησης με την ίδιο γωνιακό πρότυπο. Στην περίπτωση των υψηλών τρόπων δόνησης η μετατόπιση είναι της μορφής  $\cos(knz + \beta)\cos m\varphi$ , όπου  $z$  η αξονική συντεταγμένη και  $\varphi$  η γωνιακή συντεταγμένη.

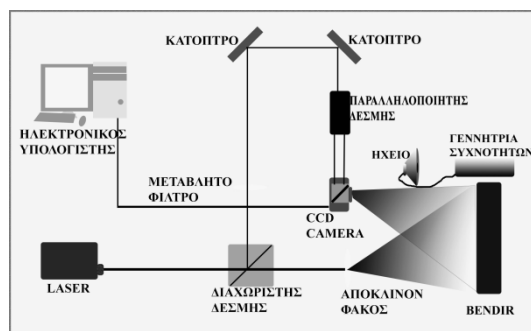
Η αέρια κοιλότητα επιδρά σημαντικά στη χροιά και την τονικότητα του οργάνου. Βασική προϋπόθεση για την δημιουργία του ήχου είναι οι δονήσεις που προκύπτουν λόγω της ελαστικότητας του αερίου. Έτσι στη περίπτωση όπου υπάρχει μία προσαρμοσμένη μεμβράνη στο υποστηρικτικό πλαίσιο η συχνότητα συντονισμού μπορεί να υπολογιστεί είτε ως αντηχείο Helmholtz είτε ως ένα σύστημα ανοιχτού – κλειστού σωλήνα.

Μία άλλη παράμετρος που συντελεί στην τελική χροιά και στην τονικότητα των κρουστών μουσικών οργάνων, είναι η θερμοκρασία. Μια αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας θα αλλάξει της ιδιότητες του υλικού, όπως είναι η επιφανειακή πυκνότητα, και κατ' επέκταση τη ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Γι αυτό το λόγο επηρεάζονται περισσότερο οι μεμβράνες φυσικών δερμάτων και όχι τόσο οι πλαστικές. Είναι γνωστό ότι πρακτικά οι οργανοπαίκτες χρησιμοποιούν αυτό για την αύξηση ή μείωση της τονικότητας του οργάνου.

## 2. Πειραματικές τεχνικές & αποτελέσματα

Χρησιμοποιήθηκαν δύο φυσικές μεμβράνες από δέρματα ζώων (κατσίκας και αγελάδας), σε ένα bendir 18 ιντσών με πλαίσιο από μαόνι.

Η πειραματική διάταξη ESPI που χρησιμοποιήθηκε (Σχ. 2.1) αποτελούνταν από πηγή λέιζερ στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης ενεργού υλικού Nd:YAG, συνεχούς εκπομπής (CW), με μήκος κύματος  $\lambda=532\text{nm}$  και μέγιστη ισχύ 150mW. Οι λεπτομέρειες της αναπτυχθείσας διάταξης και της καταγραφής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων έχει περιγραφεί αναλυτικά αλλού [2,3].



Σχήμα 2.1. Πειραματική διάταξη ESPI

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η διέγερση, τόσο των μεμβρανών όσο και των ξύλινων μερών, έγινε με ηχοβόλιση χρησιμοποιώντας ηχείο (Genelec - 8030arm) συνδεδεμένο με ειδική γεννήτρια συχνοτήτων και με παλμογράφο. Το εύρος συχνοτήτων περιορίστηκε από 50 έως 2100Hz και το πλάτος της τάσης διέγερσης ως τα 2.5V λόγω προδιαγραφών του ηχείου. Το ηχείο τοποθετήθηκε σε απόσταση 1m από το όργανο, ώστε να μην βρίσκεται στο εγγύς πεδίο του ηχείου και με όσο τον δυνατόν μικρότερη γωνία ακτινοβολίας. Η στήριξη του οργάνου έγινε σε βάση στήριξης από ειδικό απορροφητικό υλικό (sorbothane), ώστε να απομονώνονται τυχόν κραδασμοί από τη βάση στήριξης προς τα κρουστά, και με τρόπο που να προσομοιώνει την στήριξη που έχει ο οργανοπαίκτης κατά την εκτέλεση.

Ο προσδιορισμός του φάσματος ακουστικής εκπομπής έγινε μέσω ηχογραφήσεων βάσει ειδικού πρωτοκόλλου [3], στο ειδικά διαμορφωμένο χώρο του ψηφιακού στούντιο ηχογραφήσεων του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής. Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επεξεργάστηκε με ειδικά προγράμματα εμπορικά διαθέσιμα (π.χ. Praat, Matlab).

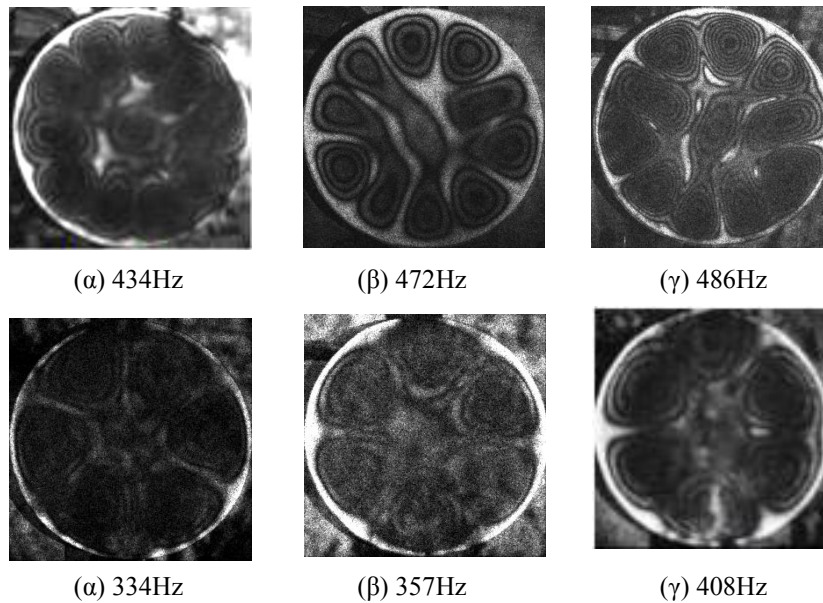
Τέλος, για την διερεύνηση της εξάρτησης των δονητικών χαρακτηριστικών από τη θερμοκρασία, χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη ελεγχόμενης θέρμανσης με ειδική λάμπα θέρμανσης και προσαρμοσμένο ψηφιακό θερμομέτρο [3].

### 2.1. Πειραματικά αποτελέσματα

Αρχικά μετρήθηκε η ταχύτητα του ήχου των δύο φυσικών μεμβρανών σε τρεις τάσεις χορδίσματος μέσω διέγερσης και ανίχνευσης με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες [3]. Οι ταχύτητες ήχου που προέκυψαν για τις δυο μεμβράνες είναι οι εξής:

	Χαμηλό χορδίσμα	Μέτριο χορδίσμα	Υψηλό χορδίσμα
Ταχύτητα ήχου μεμβράνης κατσίκας (m/s)	48.9	59.1	62.3
Ταχύτητα ήχου μεμβράνης αγελάδας (m/s)	26.5	47.1	74.6

Τυπικά πειραματικά αποτελέσματα ESPI για τον ίδιο κανονικό τρόπο δόνησης, για τα τρία διαφορετικά χορδίσματα και τις δύο διαφορετικές μεμβράνες παρουσιάζονται στο Σχ. 2.2.



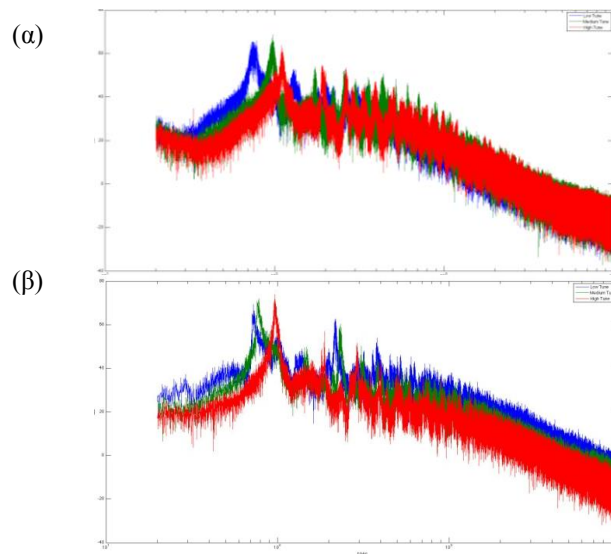
Σχήμα 2.2. Τυπικά αποτελέσματα ESPI (ίδιος κανονικός τρόπος δόνησης) για τις δύο μεμβράνες σε τρία διαφορετικά χορδίσματα: (α) χαμηλό, (β) μέτριο, (γ) υψηλό (πάνω σειρά: μεμβράνη κατσίκας, κάτω σειρά: μεμβράνη αγελάδας).

Οι τιμές των συχνοτήτων συντονισμού που προσδιορίστηκαν πειραματικά για τη μεμβράνη του φυσικού δέρματος κατσίκας (λεπτότερη μεμβράνη), είναι σε εξαιρετική συμφωνία με τις θεωρητικά υπολογισμένες με βάση τα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 1. Δεν συμβαίνει το ίδιο για τη μεμβράνη αγελάδας (παχύτερη μεμβράνη) όπου υπάρχει μερική μόνο συμφωνία.

Μετρήθηκαν επίσης με τη μέθοδο ESPI τα δονητικά χαρακτηριστικά του πλαισίου, για τις δύο μεμβράνες και τα τρία χορδίσματα αυτών [3]. Οι κανονικοί τρόποι δόνησης του πλαισίου βρέθηκαν σε παρόμοιες συχνότητες, με τη συμπεριφορά του πλαισίου να είναι, εν γένει, σταθερή. Επίσης παρατηρήθηκε ότι συντονισμοί του ξύλου δεν επηρεάζουν μόνο την χροιά του κρουστού αλλά και την τονικότητά του.

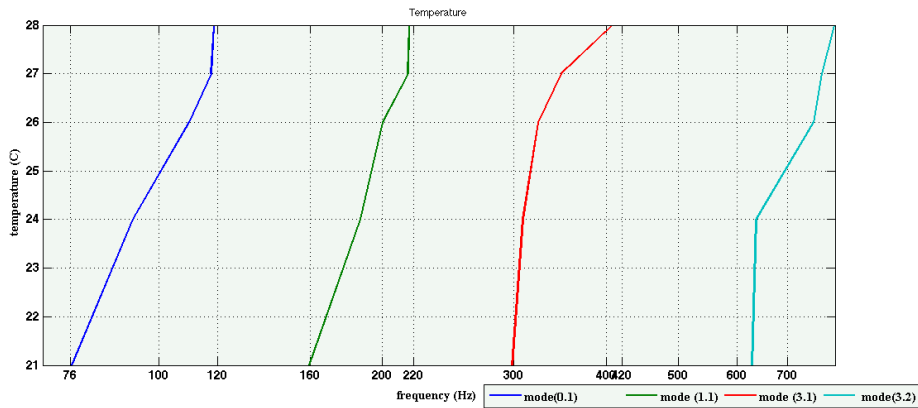
Τυπικά αποτελέσματα φασματικής εκπομπής για τα δύο είδη μεμβρανών και τα τρία διαφορετικά χορδίσματα φαίνονται στο Σχ. 2.3. Παρατηρείται ότι και για δύο μεμβράνες αλλά και στις τρεις τάσεις χορδίσματος, υπάρχει μία γρήγορη μείωση

όσο αυξάνεται η συχνότητα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στην μεμβράνη της κατσίκας υπάρχει μια συχνοτική ολίσθηση προς υψηλότερες συχνότητες όσο αυξάνεται η τάση χορδίσματος, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στην μεμβράνη της αγελάδας. Σε αυτή τη μεμβράνη συναντήθηκε διαφορετική χροιά - διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης όσο αυξανόταν η τάση χορδίσματος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στη μέτρια τάση χορδίσματος και στις δυο μεμβράνες οι συντονισμοί του οργάνου είναι πιο ισχυροί και ευδιάκριτοι από το υπόλοιπο φάσμα τους σε σχέση με την υψηλή και τη χαμηλή τάση.



*Σχήμα 2.3: Τυπικά αποτελέσματα φασματικής εκπομπής (db vs. Hz) μεπεντίρ με δέρμα κατσίκας (α) και δέρμα αγελάδας (β) σε τρία διαφορετικά χορδίσματα (χαμηλό, μέτριο, και υψηλό, με μπλε, πράσινο και κόκκινο χρώμα, αντίστοιχα).*

Τέλος, για να διερευνηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε το δέρμα αγελάδας, το οποίο βρέθηκε να είναι περισσότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μικρο-αλλαγές. Το δέρμα θερμάνθηκε από τους 20° C (θερμοκρασία δωματίου) έως τους 28° C. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4, οι ίδιοι κανονικοί τρόποι δόνησης εμφανίζονται σταδιακά σε ολοένα υψηλότερη συχνότητα (αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1° C προκαλεί αύξηση της τονικότητας περίπου ενός ημιτόνιου).



Σχήμα 2.4: Αποτελέσματα επίδρασης θερμοκρασιακών αλλαγών στις συχνότητες συντονισμού των ίδιων κανονικών τρόπων δόνησης μπεντίρ με δέρμα αγελάδας.

### 3. Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων & σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των τρόπων ταλάντωσης σε κρουστά μουσικά όργανα [5-7]. Για την ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων (Modal Analysis) καθορίζονται τα χαρακτηριστικά δόνησης (ιδιοσυχνότητες και μορφή ρυθμών) μιας κατασκευής ή ενός στοιχείου μιας μηχανής ενώ σχεδιάζεται. Οι ιδιοσυχνότητες και η μορφή των ρυθμών είναι σημαντικές παράμετροι και πρέπει να είναι γνωστοί πριν από κάθε άλλου είδους ανάλυση.

Σε μια τυπική ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων χωρίς απόσβεση, η βασική εξίσωση που επιλύεται είναι (4.1):

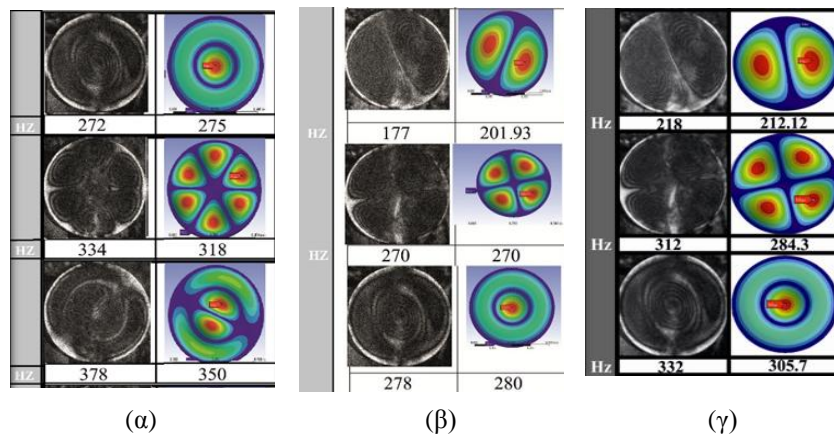
$$[K]\{\varphi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\varphi_i\} \quad (3.1)$$

όπου  $[K]$  είναι ο πίνακας ακαμψίας,  $[M]$  είναι ο πίνακας μάζας,  $\{\varphi_i\}$  είναι ιδιοδιάνυσμα του  $i$  ρυθμού,  $\omega_i$  είναι η φυσική κυκλική συχνότητα του  $i$  ρυθμού και  $\omega_i^2$  είναι η ιδιοτιμή.

Για την μοντελοποίηση του κρουστού Bendir, το όργανο αναλύθηκε σε τρία βασικά μέρη: α) ξύλινη στεφάνη – κυλινδρικό πλαίσιο, β) δακτυλιοειδής ελαστικός σωλήνας για το κούρδισμα και γ) μεμβράνη από δέρμα. Για την μελέτη αυτή κατασκευάστηκε αρχικά τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο σε λογισμικό CAD τρισδιάστατης παραμετρικής μοντελοποίησης, προσομοιώνοντας τα όργανα που μελετήθηκαν πειραματικά. Σε αυτό αποδόθηκαν βιβλιογραφικές τιμές για τις ιδιότητες υλικού για κάθε τμήμα του συναρμολογήματος του. Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Ansys-WorkBench πραγματοποιήθηκε συζευγμένη στατική ανάλυση και ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων (modal analysis) [8] χρησιμοποιώντας το μοντέλο CAD που κατασκευάστηκε. Αρχικά έγινε επίλυση του στατικού μηχανικού προβλήματος (static structural), έπειτα επίλυση του modal

προβλήματος για την συζευγμένη αυτή ανάλυση χρησιμοποιώντας την πίεση ως φόρτιση (για την προσομοίωση του πραγματικού χορδίσματος) και υπολογίσθηκαν οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του μουσικού οργάνου.

Τυπικά αποτελέσματα σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων ESPI και των θεωρητικών προβλέψεων, παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1, για μεμβράνη δέρματος αγελάδας και για τα τρία χορδίσματα. Από την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν με την χρήση της συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI) και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEM) προκύπτει πολύ καλή συμφωνία πράγμα που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της μεθόδου, η οποία μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο για την μελέτη, κατασκευή, πιστοποίηση και προτυποποίηση κρουστών μουσικών οργάνων.



Σχήμα 3.3. Σύγκριση πειραματικών & προσομοιωμένων συχνοτήτων συντονισμού και ιδιομορφών για (α) χαμηλό, (β) μέτριο, και (γ) υψηλό χορδίσμα.

## 6. Αναφορές

- [1] Thomas D. Rossing, *Science of Percussion Instruments*, World Scientific, Series in Popular Science, Singapore (2000).
- [2] M. Bakarezos, V. Vathis, S. Brezas, Y. Orphanos and N.A Papadogiannis, «Acoustics of the Chelys - An ancient Greek tortoise-shell lyre», *Applied Acoustics* 73, pp 478-483 (2012)
- [3] Ιωάννης Σιδηράς, Μελέτη δονητικών χαρακτηριστικών παραδοσιακών κρουστών μουσικών οργάνων με τη χρήση οπτικών συμβολομετρικών τεχνικών, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης (2013).
- [4] Εμμανουήλ Κοκκινάκης, Προσομοίωση συμπεριφοράς και δονητικών χαρακτηριστικών τυμπάνου, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης (2013).

- [5] R. Worland, «Normal modes of a musical drumhead under non-uniform tension» J. Acoust. Soc. Am. 127, pp 525-533 (2010).
- [6] T.D. Rossing, J. Yoo and A. Morrison, «Acoustics of percussion instruments: An update» Acoust. Sci. & Tech. 25, pp. 406-412 (2004).
- [7] F. Young, «The natural frequencies of muted circular drums» in Proceedings of Meetings on Acoustics, 11, 035003 (2011).
- [8] R. Bedri, M.O. Al-Nais, «Prestressed modal analysis using finite element package ANSYS» Lect. Notes Comput Sc. 3401, pp. 171-178 (2005).

Οι συγγραφείς ευχαριστούν ιδιαίτερος τον μουσικό/οργανοποιό κ. Ιωάννη Παπατζανή, ο οποίος μας παρείχε τα μουσικά όργανα, συνεργάστηκε μαζί μας κατά τη διάρκεια των ηχογραφήσεων, και μας πρόσφερε την πολύτιμη εμπειρία του πάνω στα παραδοσιακά κρουστά.



# ***Μια καθόλου τυχαία ομοιότητα: Μπουζούκι - νεροκολοκύθα***

Ιωάννης Κουκουρίγκος

Φυσικός- Οργανοποιός , Σιδηροχώρι Σερρών

[info@lutherie.gr](mailto:info@lutherie.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Μια σύντομη οργανολογική αναφορά αποκαλύπτει πως, εδώ και δυο χιλιετηρίδες τουλάχιστον, οι οργανοποιοί της Ανατολικής Μεσογείου, γνώριζαν μια σημαντική αλήθεια: τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην γεωμετρία του αντηχείου και την περιοχή των συχνοτήτων. Η διατύπωσή της σε μια προσβάσιμη μορφή συνδέει τον τρόπο ταλάντωσης με την καμπυλότητα του αντηχείου. Η μεταφορά στην κιθάρα αποδεικνύει την καθολική της ισχύ, όπως αυτό επιβεβαιώνεται από τα ηχητικά γραφήματα.*

## ***A non-accidental resemblance: Bouzouki - pumpkin***

### **ABSTRACT**

*A brief orgalologic report reveals that for at least two millennia ago the luthiers of the Eastern Mediterranean were aware of an important truth: the relationship between the geometry of the sound box and the range of frequencies. The formulation in an accessible form connects "inversely proportionally" the order of the vibration mode of the top plate with curvature of the sound box. The transportation to the guitar demonstrates the universal validity, as it is confirmed by sound graphics.*

### **Εισαγωγή**

Στην εισήγηση αυτή θα γίνει μια προσπάθεια απομόνωσης και κατάδειξης ενός τμήματος της ισχυρής επαγωγικής γνώσης που υπάρχει στην πολυχιλιετή τέχνη της οργανοποιίας. Αυτό αφορά στην σχέση ανάμεσα στην γεωμετρία του αντηχείου και στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ήχου. Η επαγωγική αυτή γνώση, a priori ασφαλής (αποτέλεσμα του χρονοβόρου και κοπιωδούς τρόπου παραγωγής της), ρίχνει φώς στην

λειτουργία του αντηχείου. Τα συμπεράσματα από αυτή θα χρησιμοποιηθούν στην βελτίωση του ήχου της κιθάρας.

#### 1. Οικογένεια λαούτου

Αντικείμενο πολυχρηστικό και καθημερινής χρήσης το κέλυφος της νεροκολοκύθας, θα μεταπηδήσει στην τέχνη της οργανοποιίας, όταν γίνουν αντηληπτές οι ακουστικές του ιδιότητες. Αυτές σχετίζονται με την θετική συνεισφορά στην ενίσχυση του ήχου, και για τον λόγο αυτό θα βρεθεί αυτέγκλητα στην θέση του αντηχείου.

Συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του (φθαρτό, εύθραυστο, περιορισμένος όγκος) γίνονται αιτία αντικατάστασής του από ξύλινα σκαφτά αντηχεία. Η μορφή τους παραπέμπει σταθερά στον φυτικό πρόγονο, όμως ελαττώματα του υλικού γίνονται αφορμή αποκλίσεων. Αυτές θα ενισχύσουν την αισθητική άποψη των οργανοποιών, και γρήγορα θα γίνει αντιληπτή η σχέση τους με το ακουστικό αποτέλεσμα. Στην νέα γενιά αντηχείων η φυτική αντίληψη θα διατηρηθεί, όχι από αρχετυπικό σεβασμό αλλά από γνώση της λειτουργικότητάς της.

Τα αντηχεία νέας γενιάς πρωτοποριακά ως προς την κατασκευή τους (η καμπύλη επιφάνεια προσεγγίζεται από ευθειογενείς αναπτυκτές επιφάνειες), αυξάνουν τον όγκο του παραγόμενου ήχου, καθιστώντας πλέον προφανή την σχέση γεωμετρίας-ήχου. Η γνώση αυτή θα εφαρμοστεί με επιτυχία σε όλα τα νυκτά έγχορδα της Ανατολικής Μεσογείου .

Το ούτι εξοπλίζεται με αντηχείο έντονων καμπύλων όψεων, χαρακτηριστικό σημαντικό για τον σολιστικό χαρακτήρα του οργάνου, που απαιτεί ανάδειξη της χαμηλής περιοχής συχνοτήτων (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1

Αντίθετα, η θέση του λαούτου ως συνοδευτικού οργάνου, (μεσαία περιοχή), θα οδηγήσει τους κατασκευαστές σε ένα ηπιώτερον καμπύλων αντηχείο (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2

## 2. Ανάλυση

Μια αναλυτική προσέγγιση των παραπάνω επαγωγικών συμπερασμάτων θα καταδείξει μια σαφή αναλογική σχέση ανάμεσα στον τρόπο δόνησης του αρμονικού επιπέδου και του αντηχείου. Ένας έντονα γεωμετρικός χαρακτήρας διαπερνά την σχέση στο σύνολό της, αντιστοιχίζοντας το ύψος του θόλου του δονόμενου αρμονικού επιπέδου με την καμπυλότητα του αντηχείου.

Θεωρώντας την περιοχή γέφυρας και τα υπόλοιπα σημεία του αρμονικού σαν σημειακές ακουστικές πηγές, αυτά θα δημιουργούν ένα ακουστικό κύμα που θα διαδίδεται προς όλες τις διευθύνσεις υπακούοντας στην αρχή του Huygens. Η μορφή της καμπύλης του μετώπου κύματος θα εξαρτάται από τον τρόπο δόνησης και η καμπυλότητά της θα μειώνεται στους ανώτερους τρόπους δόνησης. Όταν η μορφή του αντηχείου είναι όμοια ή κοντινή στο προσπίπτον παραγόμενο μέτωπο, το τελευταίο θα ανακλαστεί σύγχρονα στην πλάτη του αντηχείου. Διαφορετικά μια σειρά ασύγχρονων πτώσεων θα είναι υπεύθυνη για δημιουργία χαοτικών φαινομένων που θα μειώνουν την ποιότητα του παραγόμενου ήχου.

### 3. Νεροκολοκύθα

Μια εγκάρσια τομή του νεροκολόκυθου θα αποκαλύψει μια κυματική μορφή. Οι εξι ομάδες σπόρων τοποθετημένες σε ίσες αποστάσεις από το κέντρο, τους σπόρους της κάθε ομάδας σε μια προσπάθεια σχηματισμού κύκλου και τις κορυφές των σπόρων να υποδεικνύουν το κέντρο. Η αρχή του Huygens, οι δευτερεύουσες πηγές, και ο φλοιός, το φυτικό μέτωπο κύματος (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1

### 4. Κιθάρα

Η περίπτωση της ακουστικής κιθάρας ( nylon ή ατσάλινων χορδών) θα αποτελέσει τον  $(n+1)$  όρο της επαγωγικής μεθόδου απόδειξης σχετικής με την καθολική ισχύ του παραπάνω νόμου. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην εξαγωγή συμπερασμάτων, λόγω των ακραίων σχημάτων των τομών των αντηχείων της κρατούσας και αυτής της προτεινόμενης μορφής. Στην πρώτη και κυρίαρχη μορφή, τόσο η εγκάρσια, όσο και η διαμήκης τομή έχουν ένα σχήμα αντεστραμμένου κεφαλαίου Π. Θεωρώντας ότι το αρμονικό επίπεδο δονείται στο σύνολό του, το προτεινόμενο αντηχείο του θα έχει μια μορφή κατοπτρικά ανάλογη του α τρόπου δόνησής. Δύο θόλοι συνδεδεμένοι με ένα σάγμα θα σχηματίσουν ένα νεοτεριστικό κατασκευαστικό εγχείρημα, το διθολικό αντηχείο (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1

Για την μορφή αυτή υπάρχει απο το 2005 μια μόνιμη αναφορά στην ιστοσελίδα της συντεχνίας Αμερικάνων οργανοποιών (G.A.L.), a radical view for guitar. Στην περίπτωση της κιθάρας με ασάλινες χορδές η απαίτηση για συνολική ταλάντωση του αρμονικού επιπέδου διασφαλίζεται από τον X-brace οπλισμό (Εικόνα 4.2). Προκειμένου να διασφαλιστεί η συνολική δόνηση του αρμονικού επιπέδου της κιθάρας των nylon χορδών, ο οπλισμός βεντάλιας θα αντικατασταθεί από ένα υβριδικό (Εικόνα 4.3)



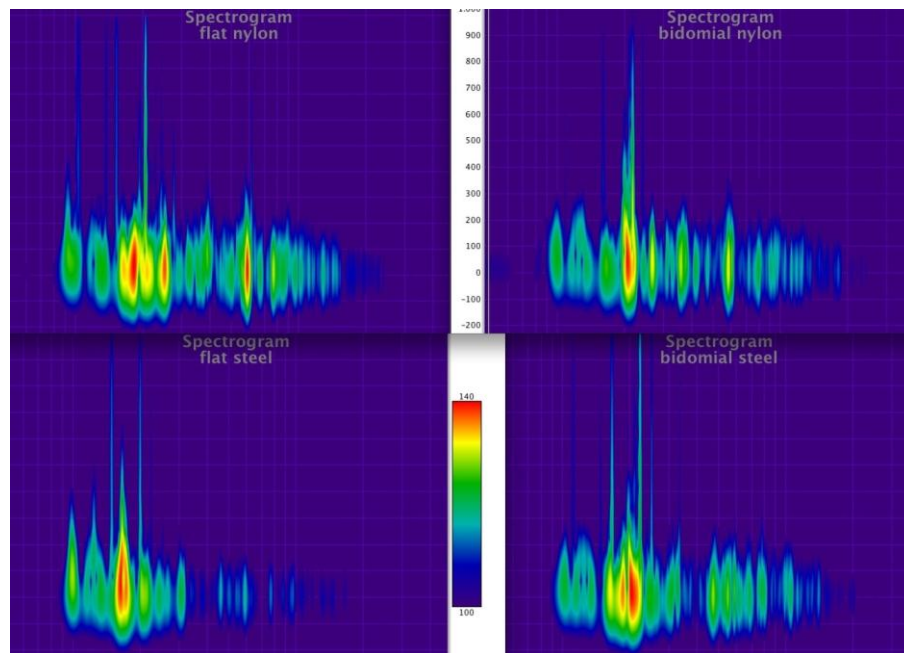
Εικόνα 4.2





Εικόνα 4.3

Έτσι τα δύο υπό ανάλυση ζεύγη κιθαρών ( nylon και μεταλλικών χορδών) είναι καθ' όλα όμοια, πλὴν της μορφῆς των αντηχείων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρατίθενται στην συνέχεια είναι απογοητευτικά για τις κιθάρες επίπεδης πλάτης επιβεβαιώνοντας την καθολική ισχύ του επαγωγικού νόμου (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4

Απρόσκλητη, αλλά επιβεβαιώνοντας την ενότητα της φύσης σε όλο της το μεγαλείο, θα εμφανιστεί η διπλή κολοκύθα (Εικόνα 4.5)



Εικόνα 4.5

### **Αναφορές**

- [1] Φοίβος Ανωγιαννάκης , *Ελληνικά Λαϊκά Μουσικά Όργανα*, Μέλισσα, Αθήνα (1991).
- [2] Werner Bachmann, *The Origin of the Bowing*, Oxford University Press, London (1969).
- [3] Thomas D. Rossing, *The Science of Sound*, Addison-Wesley Publishing Company, (1990).
- [4] James Tyler & Paul Sparks, *The early Mandolin*, London (1989).



## **Ένα μπάσο στο χαμάμ**

Γιάννης Χρηστίδης

Σχεδιαστής Ήχου, Χρ. Κολόμβου 1, 3026, Λεμεσός, Κύπρος

[Yiannis.christidis@gmail.com](mailto:Yiannis.christidis@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το χαμάμ ως ιστορικός χώρος χαλάρωσης, ξεκούρασης και καθαριότητας, διακρίνεται από την ανάπτυξη χαρακτηριστικών που καλλιεργούν την έντονη και ενίοτε ακραία σχέση του νερού και του χώρου με το ανθρώπινο σώμα, και λειτουργεί θεραπευτικά για τον επισκέπτη/λουόμενο διεγείροντας τις αισθήσεις του. Αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της ιδιότυπης διέγερσης αποτελεί η ηχητική εμπειρία. Ακριβώς σε αυτή την εμπειρία εστιάζει η συγκεκριμένη σύνθεση, της οποίας η βάση αποτελείται από έναν εξελισσόμενο διάλογο μεταξύ ενός κοντραμπάσου και ήχων που κανείς συναντά ή/και συναντούσε σε ένα χαμάμ. Η καλλιτεχνική προσέγγιση αυτής της θεματικής φιλοδοξεί να εξερευνήσει και να πειραματιστεί με τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζεται η ηχητική εμπειρία στο χώρο ενός χαμάμ.*

### ***A Bass in a Bath***

### **ABSTRACT**

*The turkish bath, as an historical place of relaxation, resting and cleanness, is characterized by elements which encourage the intense and sometimes radical relation between water, space and the human body, functioning therapeutically for the visitor/bather and triggering his/her senses. The sound experience forms an important aspect of this triggering procedure. The particular composition focuses exactly on this kind of experience, and its basis consists of an evolutionary dialogue between a double bass and the sounds that someone hears or/and used to hear in a hamam. The artistic approach of this thematic field wishes to explore and experiment with the way in which the sound experience in a turkish bath is constructed.*

## **Εισαγωγή**

Σήμερα, όπως άλλωστε και στο παρελθόν, ένα χαμάμ συγκεντρώνει χαρακτηριστικά ενός χώρου χαλάρωσης και διέγερσης ταυτόχρονα: Κατά την παραμονή του στα λουτρά, το σώμα εισέρχεται σε μια ιδιαίτερη κατάσταση, στη διάρκεια της οποίας καθαρίζει και παράλληλα αφήνεται να χαλαρώσει σε υψηλή θερμοκρασία. Παράλληλα, η ίδια η λειτουργία του χώρου αποσκοπεί στο να προκαλέσει τη διέγερση των αισθήσεων ώστε να φτάσουν στα άκρα, με σκοπό να επιτευχθεί ένα είδος κάθαρσης – μια διαδικασία που νοηματοδοτεί επιπλέον τον καθαρισμό της ψυχής, εκτός από τον προφανή, αυτόν του σώματος. Η εμπειρία λοιπόν των αισθήσεων, η οποία κρίνεται εξαιρετικής σημασιολογικής βαρύτητας, δε θα μπορούσε παρά να συμπεριλαμβάνει και την ηχητική εμπειρία: Η παρούσα εργασία αποσκοπεί σε μια απόπειρα προσέγγισης αυτής, που καταλήγει σε μια σύνθεση, αποτέλεσμα συνδιάλεξης μεταξύ ενός κοντραμπάσου που αντηχεί στο χώρο ενός χαμάμ, και ήχων που συναντά/συναντούσε κανείς στα λουτρά.

### **1. Η εμπειρία στο χαμάμ**

Για να προσεγγίσει κανείς την ηχητική εμπειρία στο χαμάμ, θα όφειλε αρχικά να μελετήσει τα στοιχεία εκείνα που συνθέτουν τη συνολικότερη εμπειρία του λουόμενου, αναπόσπαστα κομμάτια της οποίας είναι η εμπειρία της αρχιτεκτονικής ακουστικής. Η εργασία, λοιπόν, εισάγει τον αναγνώστη σε αυτές τις δύο θεματικές, εστιασμένες στη μελέτη της συγκεκριμένης περίπτωσης, προτού προχωρήσει στην επεξήγηση της σύνθεσης.

#### *1.1 Χωροταξία*

Το χαμάμ είναι ένα κτίσμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όπου οι αισθήσεις διεγείρονται, ένας διαφορετικός, μοναδικός χώρος σε μία ‘κοινή’ τοποθεσία. Ανήκει δηλαδή σε ένα χώρο που τοποθετείται ανάμεσα στην πραγματικότητα και την ουτοπία, μια περίπτωση την οποία ο Φουκώ ονομάζει ‘ετεροτοπία’ [1]. Αναμφίβολα λοιπόν, η αρχιτεκτονική του χώρου θα πρέπει να δικαιολογεί αυτή την εξωπραγματική ιδιότητα-ταυτότητα των λουτρών. Ο τρόπος με τον οποίο είναι οικοδομημένα τα (περισσότερα) χαμάμ αποσκοπεί στην ομαλότερη δυνατή μετάβαση του λουόμενου από τον εξωτερικό χώρο, ανεξάρτητα της θερμοκρασίας του, στο τελικό δωμάτιο του μπάνιου, ώστε το σώμα να συνηθίσει σταδιακά στην αύξηση της θερμοκρασίας, μέχρι να φτάσει στη μέγιστη, στην οποία και θα παραμείνει για τη διάρκεια του λουτρού [2]. Κατ’ αντιστοιχία με τη διαδικασία αυτή, συναντώνται συνήθως τρεις βασικοί χώροι σε τέτοια οικήματα: α) η υποδοχή, όπου οι ενδιαφερόμενοι εισέρχονται και κοινωνικοποιούνται πριν το μπάνιο τους, β) ο ενδιάμεσος χώρος όπου οι λουόμενοι ετοιμάζονται και γ) η κύρια αίθουσα του λουτρού, όπου πραγματοποιείται το λουτρό.

Καθώς κανείς μεταβαίνει από τον ένα χώρο στον άλλο, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος όπου βρίσκεται το σώμα πραγματοποιεί επίσης μια σταδιακή αύξηση, στην οποία εκτίθεται ο λουόμενος προσαρμοζόμενος στο περιβάλλον.

## 1.2 Ήχος & Χαμάμ

Οι ποιότητες του ήχου στους χώρους του λουτρού διαφέρουν ως προς την ουσία τους αλλά και την πολυπλοκότητά τους, αφού σε κάθε δωμάτιο, όχι τόσο η ακουστική όσο κυρίως οι διάφορες πηγές των ήχων, διαφοροποιούνται. Στην πρώτη αίθουσα, θα έλεγε κανείς, ότι κυριαρχούν, ως επί το πλείστον, οι καθημερινοί ήχοι των ανθρώπων σε έναν χώρο με αντήχηση, βήματα και ομιλίες, που πηγαινοέρχονται και συνδιαλέγονται, παρά τη συχνή παρουσία μικρών υδάτινων πηγών (π.χ. συντριβάνια ή μικρές πηγές), για λόγους κυρίως αισθητικούς. Στη δεύτερη αίθουσα, στον ενδιάμεσο χώρο, οι επισκέπτες αφήνουν τα ρούχα τους και τους παρέχονται πετσέτες, ενώ ετοιμάζονται να πάρουν το λουτρό τους. Στο συγκεκριμένο τόπο η θερμοκρασία είναι συνήθως ελαφρώς αυξημένη, καθώς αυτός βρίσκεται κοντά στην κυρίως αίθουσα. Το ηχοτοπίο χαρακτηρίζεται επίσης, από τους ήχους των ανθρώπων που αυτή τη φορά, ξεντώνονται και προετοιμάζονται, ενώ κανείς διακρίνει τον ήχο του υγρού στοιχείου από τα δίπλα δωμάτια. Στο τρίτο και κεντρικό δωμάτιο κυριαρχεί ο ήχος του νερού και η επαφή του γυμνού ανθρώπινου σώματος είτε με υφάσματα, είτε με τα μάρμαρα του μπάνιου. Τσίγκινες ή πιο σύγχρονες, σήμερα, πλαστικές λεκάνες που χρησιμοποιούνται για το μπάνιο, αντηχούν στο χώρο και σε συνδυασμό με πολύ λίγες ομιλίες, λίγους αναστεναγμούς και πολλούς ήχους, υποδηλώνεται η δραστηριότητα του λουτρού η οποία δημιουργεί, μέσω των ανακλάσεων των τοίχων, ένα πολύ ξεχωριστό ηχοτοπίο [3].

## 2. Το κοντραμπάσο στο χώρο

Το ηχόχρωμα του κοντραμπάσου επικεντρώνεται εξ' ορισμού στις χαμηλές συχνότητες. Το γεγονός, όμως, πως αυτές οι συχνοτικές περιοχές γίνονται συνειδητά αισθητές και όχι απλά αντιληπτές, όταν αντηχούν σε ένα χώρο με ιδιαίτερα ακουστικά χαρακτηριστικά, κρίθηκε ως μια πρόκληση για τη συγκεκριμένη έρευνα. Ένας τόπος με αυξημένες τις ιδιότητες της αντήχησης και με μεγάλη σημειολογία, μπορεί να 'καλωπίσει' τον ήχο του κοντραμπάσου, και να τον εξελίξει σε κάτι διαφορετικό, τοποθετημένο πια στον ιδιότυπο αυτό χώρο. Με διαφορετικές τεχνοτροπίες εκτέλεσης του αυτοσχεδιασμού, δημιουργούνται και διαφορετικές ποιότητες ήχου, οι οποίες εξελίσσονται ανάλογα στο χαμάμ, εκμεταλλευόμενες τις ακουστικές του ιδιότητες. Με το δοξάρι, με τα δάκτυλα, με αρπισμούς, έντονα ή ήσυχα – διάφορες τεχνοτροπίες παιξίματος του κοντραμπάσου δημιουργούν και τις αντίστοιχες δυναμικές στο χώρο του χαμάμ. Με αυτόν τον τρόπο, παρατηρούνται διαφοροποιημένα πρωτότυπα ηχητικά στοιχεία που εξελίσσονται στο χώρο.

## 3. Η εκτέλεση

### 3.1 Το έργο

Η εκτέλεση του αυτοσχεδιασμού έλαβε χώρα στις 9 Ιουλίου 2014, στο χαμάμ της Πάφου, στην Κύπρο.

Η βάση του αυτοσχεδιασμού του μπάσου σχηματίστηκε επάνω σε παραδοσιακούς - κατ' αντιστοιχία με το πλούσιο ιστορικό παρελθόν των λουτρών- ανατολίτικους δρόμους και εξελίχθηκε αλληλεπιδρώντας με το ηχητικό περιβάλλον του χαμάμ, είτε αυτό επρόκειτο για τα ηχητικά στοιχεία που το απαρτίζουν, είτε για την ίδια την ταυτότητα του ίδιου του χώρου, στον οποίο κυριαρχεί η αντήχηση.

Η σύνθεση του ηχοτοπίου αποσκοπεί στην περιγραφή της τοποθεσίας στον ακροατή, μέσω της δραστηριότητας τόσο του κοντραμπάσου όσο και των μετέπειτα προστιθέμενων ήχων. Εξάλλου, όταν κανείς ακροάζεται ένα ηχοτοπίο, κατασκευάζει μια εσωτερική αίσθηση του χώρου, όπου περιγράφεται με αρκετή ακρίβεια η τοποθεσία και οι δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο συγκεκριμένο μέρος [4].

### 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η ηχογράφηση έγινε στερεοφωνικά στο φορητό εγγραφέα ήχου Edirol R-44, χρησιμοποιώντας δύο μικρόφωνα, AKG C-214 και AKG C-1000S, σε διάταξη που πλησίαζε τη «XY», με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιεί το δημιουργό της σύνθεσης ως προς το ποσοστό εισδοχής 'χώρου' στην ηχογράφιση.



Σχήμα 3.1 Ο χώρος και η διάταξη των μικροφώνων.

Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία της σύνθεσης και μίξη αυτής με ήχους από την πλατφόρμα freesound.org και ήχους που ανήκουν στο δημιουργό, ηχογραφημένους στο παρελθόν, με τη βοήθεια του λογισμικού επεξεργασίας ήχου «Logic Pro Studio».

#### 4. Η σύνθεση

Το συνολικό ηχοτοπίο θα μπορούσε κανείς να το θεωρήσει σαν μια σύνθεση κοντραμπάσου με φυσική αντήχηση και άλλων φυσικών ή/και ανθρώπινων ήχων με κύριο το υγρό στοιχείο, που συναντά/συναντούσε κανείς σε ένα χαμάμ. Οι περαιτέρω ήχοι που εντοπίζονται στη σύνθεση αναφέρονται σε χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την εμπειρία του επισκέπτη/λουόμενου, και είναι ηχογραφημένοι είτε επιτόπου, είτε εκ των προτέρων.

Η λογική γύρω από τον τρόπο επεξεργασίας της ηχογράφησης και μίξης, βασίζεται στην προσπάθεια αναπαράστασης μιας υπερ-αίσθησης/ ηχητικής ετεροτοπίας, η οποία φιλοδοξεί να αποδώσει μια πτυχή της εμπειρίας ενός χαμάμ στον ακροατή/ επισκέπτη.

#### 5. Συμπεράσματα

Η διαδικασία οδήγησης των αισθήσεων στα άκρα ενεργοποιείται από την υψηλή θερμοκρασία σε ένα χώρο, όπως το χαμάμ, όπου η ίδια η ζέστη, το καυτό νερό, και οι επιφάνειες (πέτρινες, μαρμάρινες ή ξύλινες) ανακλούν τον ήχο με συγκεκριμένες ιδιότητες. Μέσα από έναν αυτοσχεδιασμό του κοντραμπάσου στον ίδιο το χώρο του χαμάμ, μπορεί κανείς να προσεγγίσει αυτή την ιδιότυπη διαδικασία καλλιτεχνικά, θέτοντας τη σύνθεση της μελωδίας και των ήχων ως το μέσο για την επίτευξη αυτού του στόχου.

#### 6. Αναφορές

- [1] Foucault, Mich. Dits et écrits 1984 , Des espaces autres (conférence au Cercle d'études architecturales, 14 mars 1967), in Architecture, Mouvement, Continuité, n°5, octobre 1984, pp. 46-49.
- [2] M. Pardoe *The Beauties of the Bosphorus* Virtue and Co., London (1843).
- [3] Chatzitsakou, E., Christidis, Y., «Exploring cultural, spatial and sonic representational structures on the web: the case of a hamam's heterotopia», in *SoundActs*, Aarhus, Denmark 23-25 September 2010
- [4] B. Blesser, R. Salter, «The other half of the soundscape: aural architecture.» in *World Federation Acoustic Ecology Conference*, Mexico City, Mexico, March 23, pp. 1-8.

#### 7. Ευχαριστίες

Ο μουσικός που εμπνεύστηκε και εκτέλεσε τον αυτοσχεδιασμό στο κοντραμπάσο, και συνεπώς σχεδίασε τη βάση για τη σύνθεση είναι ο Νικόλας Τρύφωνος, τον οποίον και ευχαριστώ για την πολύτιμη συνεισφορά του.

# ***Ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων για την κατασκευή E-Soundmaps: Παράγοντες σχεδίασης του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού***

Νικ.-Αλεξ. Τάτλας<sup>1,a</sup>, Στέλιος Ποτηράκης<sup>1,b</sup>, Στέλιος Μυτιληναίος<sup>1,c</sup>, Ευστάθιος Κυριάκης – Μπιτζάρος<sup>1,d</sup> & Μαρία Ραγκούση<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Ηλεκτρονικών Μηχ. ΤΕ, ΤΕΙ Πειραιά, Θηβών 250, Αιγάλεω

<sup>a</sup> [ntatlas@teipir.gr](mailto:ntatlas@teipir.gr), <sup>b</sup> [spoti@teipir.gr](mailto:spoti@teipir.gr), <sup>c</sup> [smitil@teipir.gr](mailto:smitil@teipir.gr), <sup>d</sup> [mpitz@teipir.gr](mailto:mpitz@teipir.gr), <sup>e</sup> [mariar@teipir.gr](mailto:mariar@teipir.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το ερευνητικό έργο E-Soundmaps αφορά την ανάπτυξη ενός κατακευμαμένου μικροηλεκτρονικού συστήματος περιβαλλοντικής επίβλεψης με έμφαση στην ηχητική χαρτογράφηση. Η εργασία ασχολείται με τους κύριους παράγοντες σχεδίασης του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού, καθώς και τον καθορισμό της ανάπτυξης των συνιστωσών του ασύρματου δικτύου ακουστικών αισθητήρων. Παρουσιάζεται η σχεδίαση σε επίπεδο αρχιτεκτονικής δικτύου, η επιλογή του πυρήνα του υλικού καθώς και η επιλογή του είδους ασύρματης ζεύξης και κατανομής επεξεργασίας για κάθε επίπεδο του δικτύου.*

## ***Wireless acoustic sensor network for the E-Soundmaps development: Hardware and embedded software design considerations***

### **ABSTRACT**

*The E-Soundmaps project aims to develop a distributed environmental monitoring microelectronic system emphasizing on sound mapping. This paper discusses the key design factors for the hardware and the embedded software, and the component development of the wireless acoustic sensor network. The design from a network architecture point of view, the selection of the core hardware, the choice of the wireless link and the processing distribution for each level of the network is presented.*

## Εισαγωγή

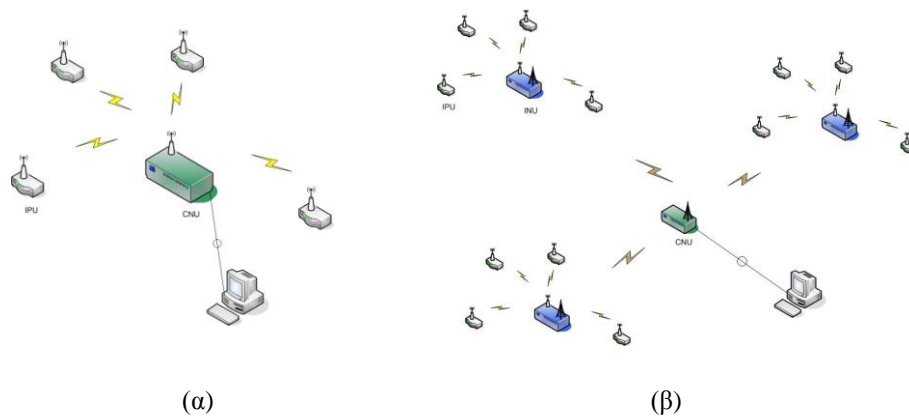
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν τα τελευταία χρόνια μια ελκυστική επιστημονική περιοχή λόγω του μειούμενου κόστους, της επεκτασιμότητας, και την τη διαθεσιμότητα μιας ποικιλίας των εφαρμογών στον τομέα της παρακολούθησης και του ελέγχου [1]. Η ηλεκτρονική παρακολούθηση των περιοχών περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος έχει προσελκύσει πρόσφατα σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο [2]. Αν και τα δίκτυα αισθητήρων εξελίσσονται σε ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία, [3], οι απαιτήσεις της καταγραφής στην ύπαιθρο δημιουργεί πρακτικούς περιορισμούς σχετικά με τη χρήση έτοιμων λύσεων δικτύωσης, οδηγώντας έτσι στη σχεδίαση ειδικού υλικού, εξειδικευμένης αρχιτεκτονικής δικτύου και ενδεχομένως νέο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Αυτό οφείλεται στον τύπο του αισθητήρα, στο χώρο λειτουργίας, στην ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας, το μικρό μέγεθος και την αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες, στην ανάγκη μη-ισοκατανεμημένη χωρική κάλυψη του πεδίου, και στην ύπαρξη απομακρυσμένων σημείων καταγραφής.

Στην εργασία παρουσιάζεται μια μελέτη σχετικά με τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού ενός δικτύου αισθητήρων που θα αποτελέσει βάση ενός συστήματος ηχητικής χαρτογράφησης και εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων [4], χρησιμοποιώντας ακουστική αισθητήρες (μικρόφωνα). Αυτό το είδος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι μια ειδική περίπτωση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων πολυμέσων, δεδομένου ότι μεταφέρουν μόνο ήχο και τα μεταδεδομένα, αντί του ήχου, βίντεο, δεδομένων και των μεταδεδομένων. Ωστόσο, εξακολουθούν να παρουσιάζουν προκλήσεις σε σχέση με την τοπολογία του δικτύου, τα ασύρματα πρωτόκολλα, τη χρήση εύρους ζώνης, την τοπική αποθήκευση δεδομένων, και την κατανάλωση ενέργειας. Μερικοί από αυτούς τους περιορισμούς οδηγούν σε μείζονες παραμέτρους σχεδιασμού του υλικού. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από προσομοιώσεις δικτύων για να αναδειχθεί ο τρόπος που οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού υλικού ανταγωνίζονται μεταξύ τους για συγκεκριμένη αρχιτεκτονική δικτύου και ασύρματα πρωτόκολλα. Τα αποτελέσματα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη μελλοντική επιλογή του υλικού για μια πρωτότυπη υλοποίηση του δικτύου αισθητήρων.

### 1. Δίκτυο ασύρματων αισθητήρων ήχου για περιοχές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος

Ο βασικός στόχος ανάπτυξης του συστήματος ηχητικής παρακολούθησης είναι η αποτελεσματική κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα ήχου πρέπει να καταγραφούν στην περιοχή ενδιαφέροντος και να αναλυθούν είτε τοπικά, είτε κεντρικά, είτε σύμφωνα με ένα σύστημα κατανεμημένης επεξεργασίας. Ένα τέτοιο δίκτυο θα μπορούσε να ακολουθήσει την επεκτάσιμη αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Εάν η περιοχή ενδιαφέροντος είναι περιορισμένη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχιτεκτονική ενός επίπεδου που απεικονίζεται στο Σχ. 1.1α, ενώ σε ευρύτερες περιοχές μια κλιμάκωση στη λύση δύο επίπεδο του Σχ. 1.1β είναι απαραίτητη. Σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση, η βασική μονάδα υλικού είναι η ίδια η απομακρυσμένη μονάδα αισθητήρα (Integrated Peripheral Unit - IPU). Η ίδια βασική μονάδα είναι αναβαθμισίμη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας κόμβο εξυπηρετητή δικτύου, με τη μορφή της κεντρικής μονάδας δικτύου

(Central Network Unit - CNU) του ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN ) (Σχ. 1.1α), ή ως ένα ενδιάμεσο κόμβο δικτύου (Intermediate Network Unit - INU) στην περίπτωση ενός δικτύου ευρείας περιοχής (WAN) αποτελείται από πολλά WLANs (Σχ. 1.1β). Ένα βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου σχεδιασμού HW είναι ότι η νοημοσύνη του συστήματος μπορεί να διανέμεται δυναμικά σε κάθε μία από αυτές τις τρεις μονάδες (IPU, INU, CNU), ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής.



Σχήμα 1.1. Δίκτυο αισθητήρων για περιβαλλοντική επισκόπηση (α) ενός επιπέδου (β) δύο επιπέδων.

### 1.1 Δίκτυο ενός επιπέδου

Στην απλούστερη μορφή της, η τοπολογία του Σχήματος 1.1α παρέχει τοπικό δίκτυο σε ασύρματους ακουστικούς αισθητήρες που έχουν τοποθετηθεί σε σχετικά περιορισμένης έκτασης περιοχές. Η IPU συλλέγει τα πρωτογενή δεδομένα ήχου μέσω ενός ψηφιακού μικροφώνου, τα αποθηκεύει προσωρινά και ακολούθως τα μεταδίδει τα στη CNU. Προκειμένου να μειωθεί το εύρος ζώνης που απαιτείται για αυτή την μετάδοση, τα δεδομένα μπορούν να συμπίεζονται και κατόπιν μεταδίδονται. Από τα πρωτογενή δεδομένα εξάγονται τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν ακουστικά τα δεδομένα, και τελικά αποθηκεύονται στον απομακρυσμένο διακομιστή. Αν είναι δυνατόν, κάποιο επίπεδο του αλγορίθμου εξαγωγής χαρακτηριστικών μπορεί να εκτελείται σε κάθε IPU.

Η ανάπτυξη του ενσωματωμένου υλικού και λογισμικού των διαφόρων συσκευών του συστήματος θεωρείται ότι απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό, αν επιλεγεί ως βάση το πρωτόκολλο 802.11 για την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ IPU και CNU. Το πρωτόκολλο 802.11 παρέχει περισσότερες επιλογές όσον αφορά την υποστήριξη υλικού καθώς και ευρέως διαθέσιμες βιβλιοθήκες λογισμικού για ενσωματωμένους επεξεργαστές.

### 1.2 Δίκτυο δύο επιπέδων

Προκειμένου να αυξηθεί η περιοχή κάλυψης του απομακρυσμένου δικτύου, εξετάζεται η αρχιτεκτονική του Σχήματος 1.1β, όπου η IPU μεταδίδει όλα τα δεδομένα του στην INU. Η INU λαμβάνει τα δυνητικά συμπιεσμένα δεδομένα μέσω του WLAN και στη συνέχεια τα προωθεί σε ένα διαφορετικό ασύρματο



δίκτυο. Αυτό το είδος του δικτύου εξυπηρετεί τους σταθμούς σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από ό, τι το δίκτυο 802.11. Αν και υπάρχουν πιο προηγμένες λύσεις, επιλέχθηκε η χρήση ενός ένα 2G / 3G δικτύου για την επικοινωνία INUs-CNU. Η απόφαση αυτή βασίζεται κατά κύριο στη διαθεσιμότητα συστημάτων υλικού και λογισμικού που υποστηρίζουν το δίκτυο 2G / 3G. Παρά το γεγονός ότι το δίκτυο 3G παρέχει αυξημένο εύρος ζώνης, το υποσύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσει σε περιοχές όπου υπάρχει μόνο κάλυψη δικτύου 2G. Η CNU θα λάβει τα πακέτα δεδομένων 2G / 3G, θα εξάγει την πληροφορία, και θα αποκωδικοποιήσει τα δεδομένα. Τέλος, τα αποκωδικοποιημένα δεδομένα θα πρέπει να διαμορφωθούν έτσι ώστε να μπορούν να αποσταλούν στην βάση δεδομένων υπολογιστή (απομακρυσμένο διακομιστή) για το χειρισμό και την αποθήκευση.

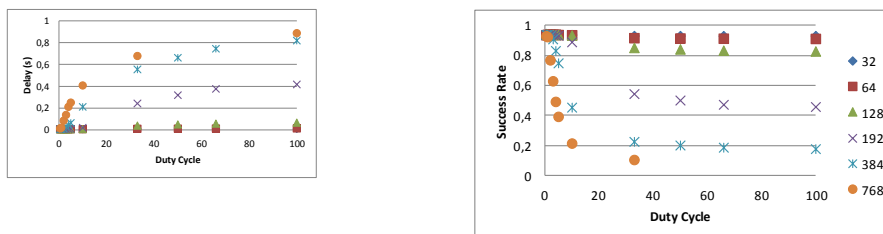
## 2. Ανταγωνιστικοί παράγοντες απόδοσης: Προσομοίωση δικτύου

Βασικό στοιχείο για την επιλογή της αρχιτεκτονικής υλικού σε επίπεδο τόσο δικτύου όσο και κόμβου, αλλά και για την κατανομή της επεξεργασίας μεταξύ των τοπικών και κεντρικών μονάδων επεξεργασίας, είναι απαραίτητη η ανάλυση της απόδοσης των προτεινόμενων δικτύων. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από προσομοιώσεις δικτύου [5]. Στην εργασία εξετάζονται δύο σενάρια προσομοίωσης συστήματος που αποτελείται από τρία δίκτυα WLAN και ένα δίκτυο WAN. Ο κάθε σταθμός βάσης θεωρείται ότι έχει μια διπλή ασύρματη κάρτα δικτύου με μέγιστο ρυθμό ροής δεδομένων τα 11 Mbps, τόσο για το WAN και τα δίκτυα WLAN. Με αυτό τον τρόπο οι δύο περιπτώσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα. 1.1 καλύπτονται για χρήση 802.11 και UMTS. Υποθέτουμε επίσης ότι η καθυστέρηση διέλευσης από το δίκτυο WAN είναι αμελητέα. Ως εκ τούτου, δίνεται έμφαση στην καθυστέρηση πρόσβασης από το IPU προς τα INUs τους και από την INU στο σταθμό βάσης και στις δύο κατευθύνσεις. Και στα δύο σενάρια, ο όρος "duty-cycle" σημαίνει το ποσοστό του χρόνου για τον οποίο ο κόμβος παράγει δεδομένα. Τα πρωτογενή δεδομένα ήχου θεωρούνται 16-bit/48kHz.

### 2.1 Πρώτο σενάριο προσομοίωσης

Στο πρώτο σενάριο προσομοιώνονται τρία δίκτυα WLAN που αποτελούνται από πέντε ενεργούς κόμβους μετάδοσης (IPUs). Διερευνώνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για (α) το duty-cycle μεταξύ του συνόλου των τιμών {0.5,1,2,3,4,5,10,33,50,66,100} (%) και (β) το φορτίο, που προκύπτει από διαφορετικούς λόγους συμπίεσης, μεταξύ των τιμών {32,64,128,192,384,768} (kbps). Χρησιμοποιήσαμε ένα πρότυπο σταθερού φορτίου με διαφορετικές στιγμές εκκίνησης (τυχαία μεταξύ 2 και 20 δευτερόλεπτα) για την προσομοίωση των συμβάντων ανίχνευσης ήχου. Η απόδοση του δικτύου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας σαν κριτήρια την συνολική καθυστέρηση και το ποσοστό επιτυχούς μετάδοσης. Ο στόχος του σεναρίου είναι να προσδιοριστεί το μέγιστο επιτρεπτό duty-cycle για κάθε πρότυπο ή λόγο συμπίεσης, θεωρώντας σας αποδεκτό όριο την επιτυχή μετάδοση σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90%. Στο Σχήματα 2.1 φαίνονται τα αποτελέσματα επιτυχούς μετάδοσης και καθυστέρησης μετάδοσης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η μετάδοση σήματος πιστότητας 16bit/48KHz είναι εφικτή μόνο σε πολύ μικρή συχνότητα εμφάνισης συμβάντων (<1%) και άρα είναι απαραίτητη η εφαρμογή συμπίεσης. Εμφανώς, όσο μεγαλύτερος ο λόγος συμπίεσης τόσο καλύτερη η δυνατότητα κάλυψης του δικτύου.

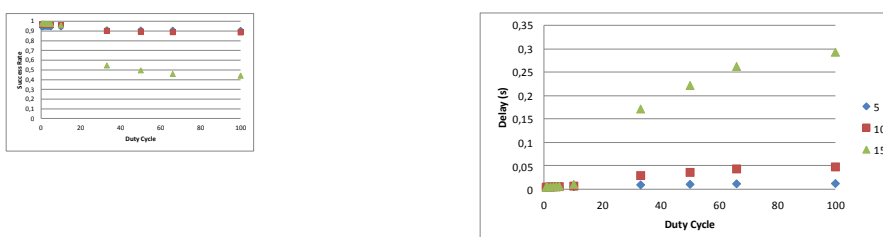


Σχήμα 2.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης πρώτου σεναρίου (α) Ποσοστό επιτυχίας μετάδοσης(β) Χρόνος καθυστέρησης.

## 2.2 Δεύτερο σενάριο προσομοίωσης

Στο δεύτερο σενάριο ο αριθμός των IPU καθενός WLAN μεταβάλλεται μεταξύ 5, 10 και 15 ενώ ο ρυθμός μετάδοσης θεωρείται σταθερός και ίσος με 64kbrps. Οι λοιπές παράμετροι παραμένουν ίδιοι με το πρώτο σενάριο. Ο στόχος της προσομοίωσης αυτής είναι να καθορισθεί τα μέγιστο duty-cycle και διαφορετική πυκνότητα κόμβων. Στο Σχήματα 2.2 φαίνονται τα αποτελέσματα επιτυχούς μετάδοσης και καθυστέρησης μετάδοσης ως προς το duty-cycle για διαφορετικές πυκνότητες κόμβων των WLAN.

Από τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύεται ότι η πυκνότητα του δικτύου επηρεάζει την απόδοση του δικτύου και συνεπώς τη μέγιστη εφικτή πυκνότητα χρονικής παρακολούθησης ηχητικών γεγονότων. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση των περιορισμών ως προς το μέγιστο επιτρεπτό αριθμό των κόμβων. Συνεπώς, πέρα από την επιλογή κατάλληλου λόγο συμπίεσης θα πρέπει να γίνεται και εκτεταμένη μελέτη για τον ορθό σχεδιασμό της τοπολογίας του δικτύου αισθητήρων με στόχο τη βέλτιστη περιβαλλοντική παρακολούθηση.



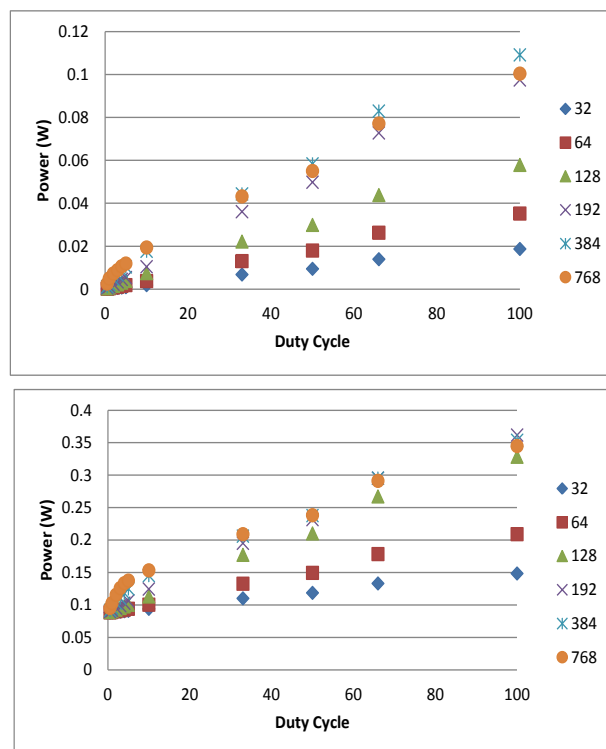
Σχήμα 2.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης δεύτερου σεναρίου (α) Ποσοστό επιτυχίας μετάδοσης(β) Χρόνος καθυστέρησης.

## 3. Εκτίμηση κατανάλωσης ισχύος

Ένα ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων για χρήση σε περιοχές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος θα πρέπει κατά μεγάλο ποσοστό να είναι ενεργειακά αυτόνομο. Από ενεργειακής άποψης, η βέλτιστη λύση θα ήταν οι IPUs και INUs να τροφοδοτούνται από μπαταρία και να είναι σε θέση να λειτουργούν

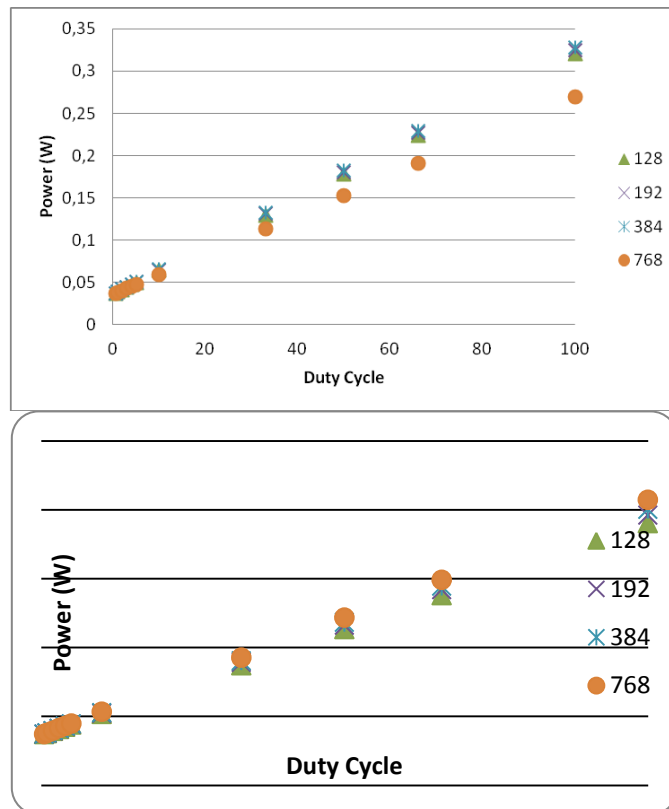
αξιόπιστα για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Φυσικά, η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [6], αποτελεί συμπληρωματική λύση αν η κατανάλωση ενέργειας δεν μπορεί να διατηρείται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, αυτό απαιτεί περαιτέρω υλικό, αυξάνει το κόστος ανά κόμβο και στη συγκεκριμένη περίπτωση της εφαρμογής περιβαλλοντικής παρακολούθησης μπορεί να αποτελεί επιλογή προς αποφυγή λόγω της πιθανής οικολογικής παρεμβατικότητας. Σε κάθε περίπτωση, η κατανάλωση ενέργειας είναι μια βασική παράμετρος σχετικά με το σχεδιασμό υλικού και ενσωματωμένου λογισμικού. Βασίζόμενοι στα αποτελέσματα της Ενότητας 2, μελετήθηκε η κατανάλωση ενέργειας ενός τέτοιου δικτύου, με έμφαση στα τμήματα υλικού ασύρματης επικοινωνίας και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για συμπίεση των δεδομένων.

Για τη μελέτη κατανάλωσης ισχύος χρησιμοποιήθηκαν οι προδιαγραφές από ευρέως χρησιμοποιούμενα αρθρωτά WiFi [7] και UMTS [8]. Η μονάδα WiFi θεωρήθηκε ότι θα λειτουργεί με πρωτόκολλο 802.11b (11 Mbps / DSSS ενώ η μονάδα UMTS με προφίλ WCDMA2100 (0dBm TX). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αντιστοιχούν στο πρώτο σενάριο προσομοίωσης. Το Σχήμα 3.1 δείχνει τη κατανάλωση ενέργειας ενός τυπικού (λειτουργία WLAN μόνο) IPU, και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός τυπικού INU (λειτουργία WLAN/WAN).



Σχήμα 3.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης καταναλισκόμενης ισχύος αρθρωμάτων δικτύου για (α) IPU (β) INU

Για την εκτίμηση της κατανάλωσης ισχύος του μικροεπεξεργαστή χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά ένα SoC (System on Chip) για επεξεργασία ήχου πραγματικού χρόνου. Οι υπολογιστικά απαιτητικές λειτουργίες είναι (α) η σύλληψη/καταγραφή ήχου (β) η συμπίεση και (γ) η μεταφορά στο υποσύστημα δικτύου. Το μικρόφωνο βρίσκεται γενικά σε κατάσταση αναμονής ενώ η λειτουργία του ξεκινάει από μια αναλογική βαθμίδα ενεργειακού κατωφλίου. Σύμφωνα με τα [9] και [10] η μέση χρήση του DSP για τις λειτουργίες συμπίεσης που περιγράφονται δεν αναμένεται να ξεπερνάει το 1%. Αξιοποιώντας εργαλείο εκτίμησης ισχύος [11] και λαμβάνοντας επιπλέον σαν δεδομένα συχνότητα λειτουργίας ίση με 300MHz, τα bitrates ήχου κατά περίπτωση, τη συχνότητα προσπέλασης μνήμης, τη διεπαφή με ασύρματο υποσύστημα και την κατανάλωση αναμονής, προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης καταναλισκόμενης ισχύος του SoC για (α) IPU (β) INU

#### 4. Συμπεράσματα

Στην εργασία παρουσιάζεται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων περιβαλλοντικής επισκόπησης. Οι υψηλές ροές δεδομένων λόγω της απαιτούμενης πιστότητας του

ηχητικού σήματος απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό δικτύου, υλικού και ενσωματωμένου λογισμικού λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως την πυκνότητα του δικτύου, την χρονική και χωρική κάλυψη της περιοχής, τη συμπίεση, την τοπική αποθήκευση και την ενεργειακή αυτονομία.

Οι προσομοιώσεις δικτύου ανέδειξαν ως υποχρεωτική τη συμπίεση πριν την ασύρματη μετάδοση. Ενώ είναι επιθυμητοί οι υψηλότεροι λόγοι συμπίεσης, η απαιτούμενη πιστότητα των ηχητικών δεδομένων για την αυτοματοποιημένη ταξινόμηση αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα. Δεδομένου ότι η πυκνότητα κόμβων του δικτύου περιορίζει τη δυνατότητα χρονικής κάλυψης, θα πρέπει να προηγείται του σχεδιασμού του δικτύου δοκιμαστική συλλογή δεδομένων για να διαπιστώνεται η συχνότητα ηχητικών γεγονότων. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται αναλογικά με την απαιτούμενη επεξεργασία και ταχύτητα μετάδοσης.

## 5. Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «Αρχιμήδης ΙΙΙ – Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στο ΤΕΙ Πειραιά», η οποία υλοποιείται μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» με τη συγχρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και εθνικών πόρων.



## 6. Αναφορές

- [1] N. Saputro, K. Akkaya and S. Uludag: Computer Net. , Vol. 56(11) (2012)
- [2] P. Boonma and J. Suzuki: Proc. 6th IEEE Conf. on Technologies For Homeland Security, (2007).
- [3] L. Yambem, M. Yapici and J.Zou: Proc. 6th Annual IEEE Conference on Sensors, (2007), p. 1311-1314.
- [4] M. Rangoussi, S. M. Potirakis and I. Paraskevas: Proc. AES Convention, Vol. 128 (2010), Paper Number: 8113.
- [5] [http://www.opnet.com/solutions/network\\_rd/modeler\\_wireless.html](http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler_wireless.html)
- [6] Q. He, Z. Yan and X. Wang: Sensor Lett., vol. 9(5) (2011), p. 1869-1873.
- [7] TiWi-SL MODULE datasheet, Integrated 802.11 b/g WLAN Module, LS Research, LLC, 330-0085-R3.0, 2012.
- [8] H24 Hardware User Guide, Telit Communications, 1VV0300918 Rev.0
- [9] Texas Instruments, Ittiam Low Speed MP3 Encoder (v1.5) on C64x+ Product Preview, Document SPRS327- June 2007.
- [10] Texas Instruments, OMAP-L138 C6-Integra DSP+ARM Processor, Document SPRS586D -October 2011.
- [11] Texas Instruments, OMAP-L138 Power Consumption Summary - OMAPL138 Power Spreadsheet (Rev D).

# ***Αποθρομβοποίηση και ανακατασκευή μουσικών ηχογραφήσεων: Συγκρίσεις μέσω εμπειρικής έρευνας και εξαγωγής ηχητικών ιδιοτήτων***

A. I. Σαρακατσιάνος<sup>a</sup>, Γ. Ν. Ζαϊμής<sup>b</sup>, Ρ. Γ. Κωτσάκης<sup>c</sup> & Γ. Μ. Καλλίρης<sup>d</sup>

Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε., Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε., Α.Π.Θ.

<sup>a</sup>[antonismus@yahoo.gr](mailto:antonismus@yahoo.gr), <sup>b</sup>[gzaimis@gmail.com](mailto:gzaimis@gmail.com), <sup>c</sup>[rkotsakis@gmail.com](mailto:rkotsakis@gmail.com), <sup>d</sup>[gkal@jour.auth.gr](mailto:gkal@jour.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ένα από τα κύρια ζητήματα, τα οποία πραγματεύεται η ερευνητική δραστηριότητα της επεξεργασίας σήματος αφορά την αποθρομβοποίηση ηχητικών σημάτων. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανακατασκευή ηχογραφήσεων και πιο συγκεκριμένα, ιστορικών μουσικών αποσπασμάτων παραδοσιακής και κλασικής μουσικής καθώς και η αποκατάσταση των πρωτότυπων ηχητικών σημάτων μέσω αποθρομβοποίησής τους. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των ανακατασκευασμένων/ αποκατεστημένων αποσπασμάτων μέσω εμπειρικής έρευνας με στατιστική επεξεργασία ερωτηματολογίων, καθώς επίσης και μέσω σύγκρισης των αντίστοιχων εξαγόμενων ηχητικών χαρακτηριστικών των σημάτων.

## ***Noise reduction and reconstruction of musical recordings: Comparisons by empirical research and extracted audio characteristics***

## **ABSTRACT**

One of the main research areas in the field of signal processing refers to the noise reduction procedure of audio signals. The main scope of the current work includes the reconstruction of audio recordings of historical musical segments of traditional and classical music, as well as the restoration of the respective original audio signals through noise reduction techniques. The reconstructed and restored audio signals are compared via empirical statistical analysis of questionnaires, as well as by exploiting the extracted audio characteristics of the musical signals.

## **Εισαγωγή**

Η μουσική θα ήταν διαφορετική πέρα κάθε εκτίμησης χωρίς την συμβολή της τεχνολογίας στη σύνθεση, την εκτέλεση και την αναπαραγωγή της, αλλά ακόμα

περισσότερο στην ηχογράφιση. Η εξέλιξη της τεχνολογίας συνέβαλε καθοριστικά στην ανάπτυξη της ψηφιακής ηχογράφησης, η οποία προσφέρει άρτιες και καθαρές ηχογραφήσεις στον ακροατή, γεγονός που καθιστά τις παλαιότερες ηχογραφήσεις λιγότερο αποδεκτές στο πέρασμα του χρόνου. Η αναπόφευκτη σύγκριση παλιάς και νέας ηχογράφησης καθιστά αναγκαία την αποκατάσταση των παλαιότερων ηχογραφήσεων και τη μεταφορά τους σε σύγχρονα μέσα [1]. Οι παλιές ηχογραφήσεις, όπως είναι φυσικό, έχουν καταγραφεί σε αναλογικά μέσα (βινύλιο, κασέτες), γεγονός που αιτιολογεί το φαινόμενο εμφάνισης έντονου θορύβου, ο οποίος συντελεί σε μια ανεπιθύμητη ηλεκτρική ή ηλεκτρομαγνητική παραμόρφωση που υποβαθμίζει την ποιότητα του σήματος και των δεδομένων [2]. Τα είδη θορύβων που συχνά εμφανίζονται σε παλαιότερες αναλογικές ηχογραφήσεις αφορούν ωστικούς θορύβους (clicks), καθώς επίσης και στατικούς θορύβους όπως το φύσημα (hiss) και ο βόμβος ηλεκτρικού δικτύου (hum) [3],[4].

Μια ηχογράφιση με θόρυβο είναι ουσιαστικά μια προσθετική μίξη καθαρού σήματος  $s(t)$  και θορύβου  $n(t)$ . Στην προσπάθεια αφαίρεσης μιας προσέγγισης  $\underline{n}(t)$  του θορύβου  $n(t)$  προκύπτει ένα ανακατασκευασμένο σήμα  $\underline{s}(t)$  του βασικού σήματος  $s(t)$ . Στη συνέχεια, η ποιότητα του ανακατασκευασμένου σήματος εξαρτάται άμεσα από τον υπολογισμό της ακρίβειας μεταξύ του  $\underline{s}(t)$  και  $s(t)$  [5]. Αξίζει να σημειωθεί, πως η διαδικασία αποθορυβοποίησης ενός σήματος απαιτεί σύγχρονα τεχνολογικά μέσα με αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύς και φόρτου εργασίας [6].

## 1. Υλοποίηση – Ανακατασκευή μουσικών αποσπασμάτων

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν ιστορικές ηχογραφήσεις δύο διαφορετικών μουσικών στυλ, παραδοσιακής και κλασικής μουσικής. Όσον αφορά την παραδοσιακή μουσική χρησιμοποιήθηκε ένα απόσπασμα πολιτικού συρτού (1931), ενώ στην κλασική μουσική επιλέχθηκε ένα απόσπασμα ηχογράφησης του Johann Sebastian Bach σε δίσκο βινυλίου 78 στροφών από την Polydor, του Κονσέρτου για Εκκλησιαστικό Όργανο, BWV 596 (1927). Τα παραπάνω αποσπάσματα ηχογραφήθηκαν εκ νέου χρησιμοποιώντας σύγχρονα μουσικά όργανα/ μέσα και πιο συγκεκριμένα, ακορντεόν και ακουστική κιθάρα για το πολιτικό συρτό και προσομοίωση εκκλησιαστικού οργάνου σε περιβάλλον MIDI μέσα από το ειδικό λογισμικό Hauptwerk για την κλασική μουσική. Σε αυτό το στάδιο της ανακατασκευής των μουσικών αποσπασμάτων πραγματοποιήθηκε προσπάθεια μίμησης όσο δυνατόν περισσότερο του ύφους, της ενορχήστρωσης, της αρχικής μουσικής και της ερμηνείας των αρχικών εκτελεστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα σύγκρισή τους. Μετά την ολοκλήρωση της ηχογράφησης παρατηρήθηκε ασταθής εξέλιξη του ρυθμού (tempo) τόσο στην περίπτωση του πολιτικού συρτού όσο και του εκκλησιαστικού οργάνου, που ενδεχομένως οφείλεται στην αναπαραγωγή του αναλογικού μέσου (γραμμόφωνο). Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε συγχρονισμός του tempo στα δύο ζεύγη πρωτότυπων-ανακατασκευασμένων μουσικών αποσπασμάτων. Ολοκληρώνοντας τη χρονική ταύτιση, έγινε επεξεργασία των ανακατασκευασμένων αποσπασμάτων εισάγοντας παραμετρικά φίλτρα ισοστάθμισης και τεχνητής αντήχησης (EQ/REVERB). Ο λόγος της παρέμβασης αυτής συνίσταται στο γεγονός πως έπρεπε να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το ηχόχρωμα των οργάνων της δικής μας

ηχογράφησης με το αντίστοιχο της αυθεντικής, αλλά και για να αποδοθεί η αίσθηση του χώρου, στον οποίο πραγματοποιείται η ηχογράφηση.

## **2. Αποθρομβοποίηση μουσικών αποσπασμάτων**

Μετά την ολοκλήρωση της ανακατασκευής, ακολούθησε το στάδιο της αποθρομβοποίησης των πρωτότυπων μουσικών αποσπασμάτων. Για το λόγο αυτό, έγινε χρήση του αποθρομβοποιητή *iZotope RX*, ο οποίος είναι σχεδιασμένος με σκοπό να αφαιρεί σταθερούς/ στατικούς θορύβους, όπως το φύσημα μαγνητοταινίας, το βουητό μικροφώνου αλλά και το βόμβο ηλεκτρικού ρεύματος. Ειδικότερα, από τους τέσσερις διατιθέμενους αλγόριθμους αποθρομβοποίησης, επιλέχθηκε ο πρώτος (A), λόγω της χαμηλής υπολογιστικής ισχύος που απαιτεί, αλλά και της εύκολης χρήσης του σε πραγματικό χρόνο.

Στην περίπτωση του πολιτικού συρτού εκτός από την παρουσία του στατικού θορύβου παρατηρήθηκε και η ύπαρξη ωστικών θορύβων, οι οποίοι οφείλονται στη φυσιολογική φθορά του βινυλίου λόγω παλαιότητας. Κατά συνέπεια, εφαρμόστηκαν δύο στάδια αποθρομβοποίησης, ένα για τους ωστικούς θορύβους και το άλλο για το θόρυβο από το φύσημα της μαγνητοταινίας. Όσον αφορά το απόσπασμα του εκκλησιαστικού οργάνου στη διαδικασία αποθρομβοποίησης απαιτήθηκε μόνο η αφαίρεση στατικών θορύβων, λόγω της απουσίας αντίστοιχων ωστικών.

Τέλος, στο στάδιο αυτό έπρεπε να απομονωθεί ο θόρυβος των ακουστικών παραδειγμάτων ως ξεχωριστό σήμα, για την μετέπειτα χρήση του στην παρούσα έρευνα. Στο απόσπασμα του Bach η διαδικασία περιελάμβανε απλά την εξαγωγή του θορύβου, η οποία προσφέρεται ως δυνατότητα του *iZotope RX*. Στην περίπτωση του πολιτικού συρτού λόγω των δύο σταδίων αποθρομβοποίησης, η διαδικασία ήταν πιο πολύπλοκη. Για την εξαγωγή του θορύβου, πραγματοποιήθηκε αναστροφή της φάσης της κυματομορφής του αποθρομβοποιημένου αποσπάσματος και στη συνέχεια, κάνοντας μίξη με την αρχική πρωτότυπη ηχογράφηση, το σήμα της καθαρής μουσικής εξουδετερώθηκε με αποτέλεσμα να παραμείνει μόνο ο θόρυβος ως ξεχωριστό σήμα.

## **3. Αξιολόγηση-σύγκριση μέσω εμπειρικής έρευνας**

Ο κύριος σκοπός της εμπειρικής έρευνας είναι η μελέτη και διερεύνηση που αναφέρεται στην ανακάλυψη νέων γεγονότων [7], ενώ στα πλαίσια διεξαγωγής της μπορούν να χρησιμοποιηθούν ποικίλες μέθοδοι όπως ερωτηματολόγια, δομημένες συνεντεύξεις και μελέτες παρατήρησης. Για την διαμόρφωση αποδοτικών αποτελεσμάτων στην έρευνα, απαραίτητη είναι η μη αλληλεπίδραση του ερευνητή με τα άτομα του δείγματος, μειώνοντας έτσι παράγοντες προκατάληψης και υποκειμενικότητας και αυξάνοντας την αξιοπιστία της, στα πλαίσια γενίκευσης συμπερασμάτων που προκύπτουν [8]. Στη παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μέθοδος του δομημένου ερωτηματολογίου με στόχο την αξιολόγηση της ποιότητας των ανακατασκευασμένων και αποθρομβοποιημένων μουσικών αποσπασμάτων, καθώς και τη σύγκριση τους με τα αυθεντικά.

Διεκπεραιώνοντας την ανακατασκευή και αποθρομβοποίηση των μουσικών αποσπασμάτων, δημιουργήθηκαν τέσσερις παραλλαγές ηχογραφήσεων για κάθε ένα από τα μουσικά στυλ (πολίτικο συρτό-εκκλησιαστικό όργανο) σύμφωνα με το παρακάτω υπόδειγμα:



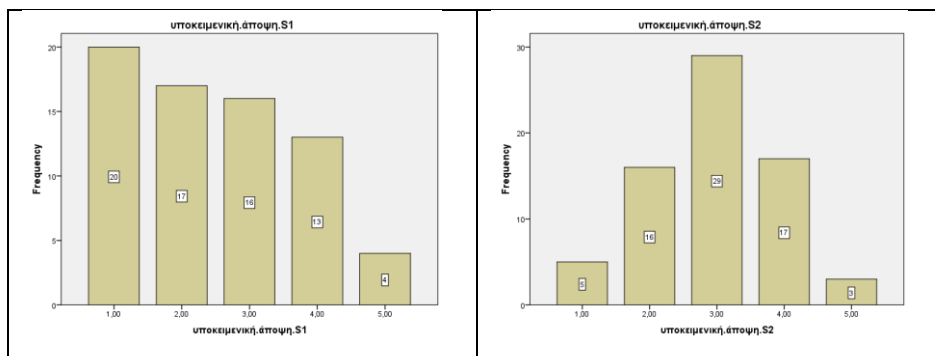
- Πρωτότυπο (αυθεντικό) μουσικό απόσπασμα
- Νέα ηχογράφιση με θόρυβο από το πρωτότυπο
- Αποθρομβοποιημένο πρωτότυπο
- Καινούρια ηχογράφιση (με σύγχρονα μέσα-όργανα)

Κατόπιν, δομήθηκαν κατάλληλα ερωτηματολόγια απευθυνόμενα σε ετερόκλητο δείγμα 70 ατόμων διαφορετικής ηλικίας, μορφωτικού επιπέδου και γνώσεων/εμπλοκής/δραστηριοποίησης στον τομέα της μουσικής.

Αρχικά, το κοινό άκουσε τα αποσπάσματα του πολιτικού συρτού (1-4) και στη συνέχεια τα αποσπάσματα του Bach (5-8), και του ζητήθηκε να αξιολογήσει ποιοτικά τις ηχογραφήσεις, να παραθέσει τις προτιμήσεις του, όπως επίσης και να αποτιμήσει το αποτέλεσμα της αποθρομβοποίησης και ανακατασκευής των διαφόρων μουσικών αποσπασμάτων. Με βάση τις απαντήσεις που δόθηκαν στα ερωτηματολόγια, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό SPSS, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

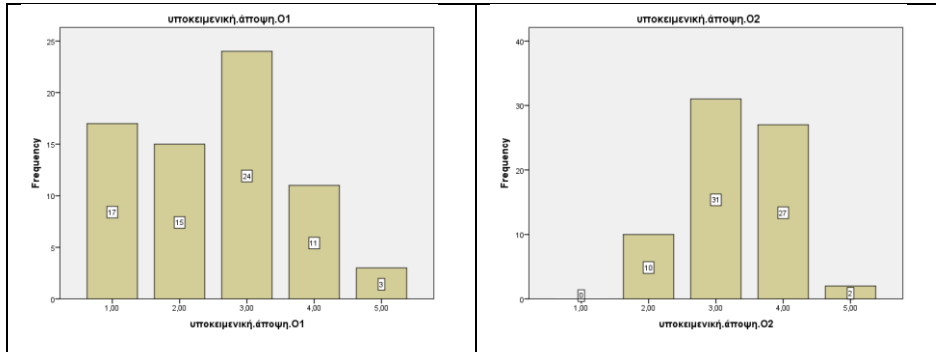
Όσον αφορά τη κλίμακα αξιολόγησης στις απαντήσεις του ερωτηματολογίου χρησιμοποιήθηκε διαβάθμιση 5 επιπέδων (1, 2, 3, 4 και 5) που αντιστοιχεί σε απαντήσεις Πολύ κακή, Κακή, Μέτρια, Καλή, Πολύ καλή. Οι παραλλαγές των μουσικών αποσπασμάτων αποτελούν τις μεταβλητές του ερωτηματολογίου και πιο συγκεκριμένα *Sirto\_noisy\_original* (S1), *Sirto\_noisy\_reconstructed* (S2), *Sirto\_denoised\_original* (S3) και *Sirto\_reconstructed* (S4) αντιστοιχούν στην ερώτηση 1 που αφορά την αξιολόγηση ποιότητας ηχογράφησης στο πολιτικό συρτό. Οι μεταβλητές *Organ\_noisy\_original* (O1), *Organ\_noisy\_reconstructed* (O2), *Organ\_denoised\_original* (O3) και *Organ\_reconstructed* (O4) αντιστοιχούν στην ερώτηση 2 που αφορά την αξιολόγηση ποιότητας ηχογράφησης του εκκλησιαστικού οργάνου. Με τον ίδιο τρόπο καταχωρούνται και οι υπόλοιπες απαντήσεις του ερωτηματολογίου στο SPSS.

Παρατηρώντας τα Διαγράμματα 1-2 (πολιτικό συρτό) και Διαγράμματα 3-4 (απόσπασμα Bach) διαπιστώνουμε μια θετικότερη αξιολόγηση της αποθρομβοποιημένης εκδοχής των αυθεντικών ηχογραφήσεων (S2-O2) σε σχέση με την πρωτότυπες (S1-O1). Κατά συνέπεια, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η αξιολόγηση με βάση το αισθητικό κριτήριο επηρεάζεται από την ποιότητα των ηχογραφήσεων.



Διάγραμμα 1

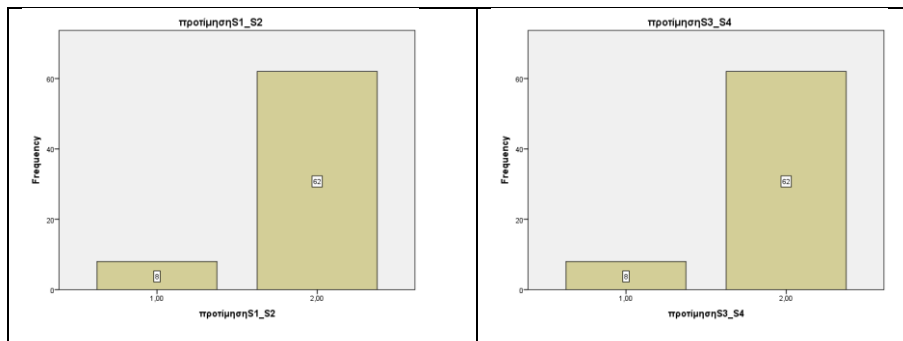
Διάγραμμα 2



Διάγραμμα 3

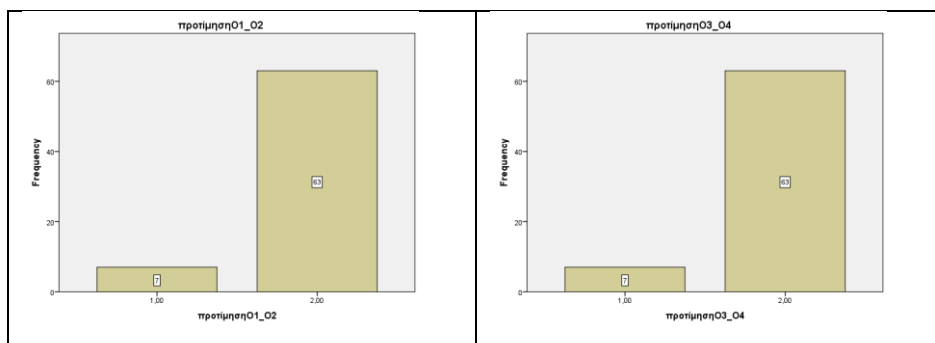
Διάγραμμα 4

Παρατηρώντας τα διαγράμματα 5-6, 7-8 παρατηρείται μια καθολική προτίμηση στις ανακατασκευασμένες ηχογραφήσεις, είτε καθαρές (S4,O4) είτε με την προσθήκη θορύβου (S2,O2).



Διάγραμμα 5

Διάγραμμα 6



Διάγραμμα 7

Διάγραμμα 8

Επιπρόσθετα, από περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε πως η ανακατασκευασμένη εκδοχή με προσθήκη θορύβου δεν διακρίνεται εύκολα από την

αποθρομβωμένη πρωτότυπη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως τα άτομα νεαρής ηλικίας του δείγματος διέκριναν καλύτερα τις αυθεντικές από τις καινούριες ηχογραφήσεις, ενώ αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός πως προτίμησε στις αυθεντικές ηχογραφήσεις (σε όλες τους τις εκδοχές) είχε το κοινό με την ανώτατη εκπαίδευση και καλύτερη μουσική κατάρτιση.

#### 4. Σύγκριση ηχητικών σημάτων

Εκτός όμως από τα υποκειμενικά αποτελέσματα της αξιολόγησης μέσω των ερωτηματολογίων, αναζητήθηκαν οι αποκλίσεις των ανακατασκευασμένων ηχητικών σημάτων σε σχέση με τις αρχικές ηχογραφήσεις, ώστε να διερευνηθεί η διαφοροποίησή τους υπό μια πιο αυστηρή μαθηματική σκοπιά. Η διαδικασία σύγκρισης περιελάμβανε την εξαγωγή φασματικών, χρονικών, ρυθμικών χαρακτηριστικών από τα ηχητικά σήματα και εν συνεχεία τον προσδιορισμό της ποσοστιαίας μεταβολής των αντίστοιχων τιμών τους. Πιο συγκεκριμένα, η σύγκριση επικεντρώθηκε στα δύο αποσπάσματα του πρωτότυπου (noisy original) και του ανακατασκευασμένου με θόρυβο (noisy reconstructed) τόσο στο πολιτικό συρτό όσο και στο απόσπασμα ηχογράφησης του εκκλησιαστικού οργάνου. Τα πειράματα που διεξήχθησαν αρχικά περιελάμβαναν τη διαδικασία κατάτμησης των δύο αποσπασμάτων σε μικρά χρονικά δείγματα, χρησιμοποιώντας παράθυρο διάρκειας 1sec, με τη βοήθεια του προγραμματιστικού εργαλείου ανοικτού κώδικα Python [11].

Από κάθε ηχητικό δείγμα του πρωτότυπου και ανακατασκευασμένου αποσπάσματος εξήχθησαν ποικίλα φασματικά και χρονικά χαρακτηριστικά με τη βοήθεια του εργαλείου MIRtoolbox στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB [12]. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ αυθεντικών και ανακατασκευασμένων αποσπασμάτων προσδιορίστηκαν στη βάση της ποσοστιαίας διαφοράς των τιμών των χαρακτηριστικών, όπως περιγράφει η μαθηματική σχέση (1)

$$\frac{FVn.rec-FVn.origin}{FVn.origin} \quad (1)$$

Τα χαρακτηριστικά τα οποία επιλέχθηκαν για τη σύγκριση των αποσπασμάτων είναι τα εξής:

- **Brightness**: Είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ήχου όταν επρόκειτο να γίνει διάκριση μεταξύ δύο ηχητικών σημάτων. Εκφράζει το ποσοστό της συνολικής ενέργειας του σήματος που αποδίδεται πάνω από μια συχνότητα κατωφλίου, η οποία ορίζεται στα 1500 Hz.
- **Rolloff**: Προσδιορίζει κατά πόσο ένα σήμα περιλαμβάνει υψηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα η μεταβλητή αυτή προσδιορίζει τη μέγιστη συχνότητα έως την οποία περιλαμβάνεται το 85% της συνολικής ενέργειας του σήματος.
- **Attack time**: Η μεταβλητή αυτή προσδιορίζει τους χρόνους ανόδου που χρειάζεται να φτάσει μία κυματομορφή από τοπικό ελάχιστο σε τοπικό μέγιστο του πλάτους της κάθε φορά.
- **Chromagram**: Εκφράζει την κατανομή ενέργειας ανάμεσα στις συχνότητες ή σε περιοχές συχνοτήτων.

- **Tempo:** Εκφράζει την περιοδικότητα του ρυθμικού χαρακτήρα της μουσικής του αποσπάσματος. Μόνο για αυτή τη περίπτωση ορίζουμε στα 15sec τα τεμάχια του αποσπάσματος, διότι στο παράθυρο 1 sec δεν υφίσταται περιοδικότητα στο ρυθμό της μουσικής [9].
- **Lower energy:** Εκφράζει το ποσοστό του σήματος που είναι κάτω από τη μέση ενέργεια.

Στον πίνακα 1 που εμφανίζεται παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών των χαρακτηριστικών με βάση τη μαθηματική σχέση [1]. Σχετικά με την ηχητική παράμετρο Chromagram παρατίθενται οι μικρότερες διαφορές τιμών των περιοχών συχνοτήτων και στα δύο ζεύγη των αποσπασμάτων. Προφανώς όσον αφορά τα δύο αποσπάσματα πολιτικού συρτού και οργάνου, η ομοιότητα στην κατανομή ενέργειας βρίσκεται σε διαφορετικές συχνοτικές περιοχές. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ οι χρόνοι ατάκας (attack time) έχουν σχετικά μεγάλη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των αποσπασμάτων. Τέλος, αξίζει να τονιστεί η μεγαλύτερη απόκλιση στις τιμές της ποσοστιαίας διαφοράς του tempo και στα δύο αποσπάσματα πολιτικού συρτού και οργάνου, οι οποίες παραμένουν σε ανεκτό επίπεδο καθώς προηγήθηκε αρχικά ο συγχρονισμός των δυο κομματιών.

Πολίτικο Συρτό		Εκκλησιαστικό Όργανο	
Ποσ.Δ	Μεταβλητή	Ποσ.Δ	Μεταβλητή
10,78%	Brightness Mean	14,99%	Brightness Mean
20,03%	Rolloff Mean	33,09%	Rolloff Mean
22,95%	Attack time Mean	20,60%	Attack time Mean
10,50%	Chromagram	17,90%	Chromagram
15,76%	Tempo Mean	27,71%	Tempo Mean
13,39%	Low energy Mean	15,96%	Low energy Mean

Πίνακας 1. Ποσοστιαίες διαφορές των τιμών των χαρακτηριστικών

## 5. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως υπάρχουν διαφορετικές ερμηνείες της σύγκρισης των αποσπασμάτων από την εμπειρική έρευνα και τα αντίστοιχα αντικειμενικά μαθηματικά αποτελέσματα με βάση τις ηχητικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα μαθηματικό μοντέλο εξετάζει ένα μικρό δείγμα παραμέτρων που σχετίζονται με χαρακτηριστικά του ήχου, κάτι που φυσικά δεν είναι αρκετό για να αποτυπώσει τα αποτελέσματα που θα έδινε η ανθρώπινη ακουστική αντίληψη. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την ερμηνεία φαινομένων από μαθηματική σκοπιά, αυτή καταγράφει και επεξεργάζεται φυσικά μεγέθη όπως ένταση, πίεση, συχνότητα, κυματομορφή, διάρκεια κ.τ.λ. Ο άνθρωπος όμως αντιλαμβάνεται τα ίδια φαινόμενα με έννοιες όπως ακουστότητα, τονικό ύψος, χροιά κ.τ.λ. που είναι αποτέλεσμα πιο σύνθετων εγκεφαλικών διεργασιών. Πολλές φορές ο ανθρώπινος εγκέφαλος μπορεί να ξεχωρίσει μια μικρή λεπτομέρεια στην παρατήρηση ενός φαινομένου, για παράδειγμα ένα αρμονικό πέρασμα ή μια αλλαγή στη δυναμική ενός ηχητικού αποσπάσματος, η οποία όμως να είναι καταλυτική

στην αντίληψή του, κάτι που δεν μπορεί να προσομοιωθεί με επεξεργασία μέσω μηχανικών αλγόριθμων [10].

## 6. Αναφορές

- [1] Καλλίρης Γ. (1994). Μέθοδοι Μείωσης του Θορύβου σε Αλλοιωμένες Ηχογραφήσεις, Σεμινάριο Τομέα Τηλεπικοινωνιών 1993-1994, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Α.Π.Θ. Τομέας Τηλεπικοινωνιών.
- [2] Διαδικτυακός τόπος: <http://www.thefreedictionary.com/noise>
- [3] Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού αποθορυβοποίησης © 2008 iZotope, Inc.
- [4] Nuzman J. (2004). Audio Restoration: An Investigation of Digital Methods for Click Removal and Hiss Reduction.
- [5] Burlet G. (2012). Digital Audio Restoration, Music Technology, Schulich School of Music, McGill University,
- [6] Καλλίρης Γ. (1995). Νέες Τεχνικές Αποκατάστασης Αλλοιωμένων Ακουστικών Σημάτων Ομιλίας και Μουσικής, Διδακτορική διατριβή,
- [7] Ιωαννίδης Δ. (2011). Μεθοδολογία Έρευνας, Σημειώσεις μαθήματος. <http://users.uom.gr/~dimioan/files/lecture01.pdf>
- [8] Livesey C. (2006). The relationship between Positivism, Interpretivism and sociological research methods. <http://www.sociology.org.uk/revgrm5.pdf>
- [9] Κωτσάκης Ρ. και Γιολτζίδου Γ. (2011). Υλοποίηση και Σύγκριση Κατάτμησης Ταξινόμησης και Κατηγοριοποίησης Σημάτων Ομιλίας και Μουσικής, Διπλωματική Εργασία Α.Π.Θ.
- [10] Παπαδέλης Γ. – Σημειώσεις σε μορφή παρουσιάσεων. <http://www.slideshare.net/arlap/2-16066203>
- [11] G van Rossum et al., 1991, Python Language Website, online [www.python.org](http://www.python.org)
- [12] O. Lartillot and P. Toivainen, “Mir in matlab (ii): A toolbox for musical feature extraction from audio”, in Proceedings of the International Conference on Music Information Retrieval, Vienna, 2007.

# ***Βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε δικτυοκεντρικά μουσικά περιβάλλοντα (NMP) για πραγματοποίηση ζωντανών απομακρυσμένων συναυλιών***

Κωνσταντίνος Τσιούτας<sup>a</sup> & Ανδρέας Φλώρος<sup>b</sup>

Εργαστήριο Επεξεργασίας Οπτικοακουστικών Σημάτων, Σχολή Μουσικής & Οπτικοακουστικών Τεχνών, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Κέρκυρα, <sup>a</sup> [tsioutas1@gmail.com](mailto:tsioutas1@gmail.com) / <sup>b</sup> [floros@ionio.gr](mailto:floros@ionio.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το NMP (Network Music Performance), δικτυοκεντρική υπηρεσία πραγματοποίησης μουσικών συναυλιών μέσω διαδικτύου αποτελεί στις μέρες μας πρόκληση ως προς την υλοποίηση του. Πολυάριθμες διαδικτυακές πλατφόρμες προσφέρουν τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει live music session με το μουσικό του συγκρότημα ακόμα και από το σπίτι του, μέσω της adsl τηλεφωνικής του γραμμής. Η υπηρεσία γίνεται όλο και περισσότερο αναγκαία στους χρήστες αλλά τα τεχνικά εμπόδια για την υλοποίησή της αποτελούν τροχοπέδη. Τα κυριότερα από αυτά εντοπίζονται στη καθυστέρηση μετάδοσης λόγω του διαδικτύου και στην ποιότητα του μεταδιδόμενου ήχου. Το στοιχείο για ικανοποιητική ποιότητα στο μεταδιδόμενο ήχο και χαμηλή καθυστέρηση είναι σαφώς δύσκολο να κερδηθεί. Ο απρόβλεπτος και βαρύς κατά διαστήματα φόρτος πληροφορίας του διαδικτύου αποτελεί τροχοπέδη στην μείωση της καθυστέρησης. Από την άλλη, η μικρή χωρητικότητα των τηλεφωνικών γραμμών η οποία θέτει περιορισμούς στη ταχύτητα μετάδοσης αποτελεί το δεύτερο μεγάλο εμπόδιο. Η λύση επικεντρώνεται στα πρωτόκολλα του διαδικτύου και ειδικότερα στις κωδικοποιήσεις μετάδοσης δεδομένων. Στην εργασία αυτή γίνεται μια ανασκόπηση προτύπων και τεχνολογιών που υφίστανται σε επίπεδο εφαρμογής και αναλύεται η τεχνολογία των δομικών τους στοιχείων.*

## ***Optimizing the quality of service (QoS) in network-centric musical environments (NMP) for making remote live concerts***

## **ABSTRACT**

*NMP (Network Music Performance), network-centric service carrying musical concerts online is nowadays challenging for implementation. Numerous web-based platforms offer the user the opportunity to make live music session with the musical band even from home via the adsl telephone line. This service is becoming increasingly necessary for users but technical obstacles to the implementation of a brake. The main ones identified in the transmission delay due to the internet delay and the quality of the transmitted sound. The bet for good quality in the transmitted audio and low delay is clearly difficult to win. The unpredictable and occasionally heavy traffic of web information constricts the backwardness. On the other hand, the*

*small capacity of telephone lines which places restrictions on the transmission speed is the second major obstacle. The solution focuses on internet protocols and especially in data transmission encodings. In this work we present codec and technologies that exist at the application level and analyze the technology of it's components.*

## **Εισαγωγή**

Το NMP πρωτοεμφανίζεται σαν ιδέα σε έργο του John Cage το 1951 με τίτλο «Imaginary Landscape No. 4 for Twelve Radios»[1]. Στο έργο αυτό τα μουσικά όργανα ήταν 12 ραδιοφωνικοί δέκτες και εκτελεστές ήταν 24 μουσικοί οι οποίοι απλά μετέβαλλαν τη ραδιοφωνική συχνότητα και την ηχητική ένταση κάθε δέκτη με τη χρήση των αντίστοιχων κουμπιών. Αυτό είχε σαν ηχητικό αποτέλεσμα η λαμβανομένη από τους ραδιοφωνικούς δέκτες ηχητική πληροφορία να «ελέγχεται» από τους ερμηνευτές του Cage ως προς τη συχνότητα (αλλάζοντας σταθμό) και ως προς την ένταση. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η συνήχηση των 12 δεκτών.

Στις μέρες μας, με την εξέλιξη των τεχνολογιών του διαδικτύου να προσφέρουν πληθώρα υπηρεσιών και δυνατοτήτων, έχει ήδη αρχίσει να γίνεται εφικτή η ταυτόχρονη και αμφίδρομη μετάδοση ηχητικής πληροφορίας σε εφαρμογές όπως skype, oοnoo κλπ. Διαδραστικές συνομιλίες με ήχο και εικόνα δίνουν τη δυνατότητα στον χρήστη να συνομιλήσει απομακρυσμένα με άλλους χρήστες. Το NMP λαμβάνει χώρα όταν δύο οι περισσότεροι χρήστες-μουσικοί μπορούν να εκτελέσουν απομακρυσμένα μουσικά έργα χρησιμοποιώντας το μουσικό τους όργανο και την κάρτα ήχου τους [2][8][9][10].

Προκειμένου να υλοποιηθεί το NMP είναι απαραίτητη η εξασφάλιση συγκεκριμένων συνθηκών. Οι συνθήκες αυτές έχουν να κάνουν με παραμέτρους όπως η ποιότητα του μεταδιδόμενου ήχου αφενός αλλά και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης της μετάδοσης του. Ως γνωστόν ως ελάχιστη αποδεκτή ποιότητα για Hi-Fi εφαρμογές έχει καθιερωθεί η ποιότητα CD με 44100Hz συχνότητα δειγματοληψίας και 16 Bit βάθος λέξης, οπότε το ίδιο ισχύει και για το NMP [3]. Ο πιο σημαντικός όμως περιοριστικός παράγοντας αυτή τη στιγμή στις εφαρμογές του NMP είναι ο παράγων της καθυστέρησης η οποία οφείλεται στην ίδια την αρχιτεκτονική του διαδικτύου ως μέσου για την διακίνηση πακέτων δεδομένων σε βάση βέλτιστης προσπάθειας κατά κύριο λόγο.

### **1. Ο παράγων της καθυστέρησης μετάδοσης**

Η αποδεκτή καθυστέρηση ώστε να μπορούν οι απομακρυσμένοι μουσικοί να συγχρονιστούν και να υλοποιηθεί το NMP, πρέπει να είναι μικρότερη από το κατώφλι των 25ms το οποίο ονομάζεται EPT (Ensemble Performance Threshold) [4]. Σε αντίθετη περίπτωση, αν η καθυστέρηση ξεπεράσει αυτό το κατώφλι είναι αδύνατος ο συγχρονισμός. Κατά την ακουστική εκτέλεση μουσικών οργάνων και δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου σε φυσιολογικές συνθήκες έχει τιμή 343μ/sec, ένα μικρό μουσικό σύνολο σε χώρο δωματίου δεν θα έχει κανένα πρόβλημα καθυστέρησης στη μετάδοση του φυσικού ήχου των οργάνων. Ακόμα και μια πολυμελή ορχήστρα που καταλαμβάνει αρκετά τετραγωνικά μέτρα χώρου και οι μουσικοί βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους, δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα της

καθυστερήσης του ήχου αφού δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί καθώς παίρνει πολύ μικρές τιμές για τόσο μικρές αποστάσεις. Αν η μετάδοση του ήχου είτε ως φυσικό φαινόμενο είτε ως αναλογικό ή ψηφιακό σήμα έχει καθυστέρηση τότε δημιουργεί στους μουσικούς την αδυναμία να εκτελέσουν ταυτόχρονα μουσική.

Κάνοντας ένα απλό ring σε κάποιο server της κεντρικής Ευρώπης, εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο χρόνος για να μεταδοθούν και να επιστρέψουν τα πακέτα που θα αποσταλούν είναι της τάξης των μερικών δεκάδων έως και εκατοντάδων ms ανάλογα με την ώρα και τη κίνηση του διαδικτύου.

Με βάση το υφιστάμενο πρότυπο της αρχιτεκτονικής των δικτύων κάθε επίπεδο από τα 7 του OSI εισάγει τη δική του καθυστέρηση. Αντίστοιχα για τη στοίβα του TCP-IP κάθε ένα από τα 4 επίπεδα εισάγει καθυστέρηση ενθυλακώνοντας την επικεφαλίδα του η οποία αποτελείται από επιπλέον δεδομένα άσχετα με τα δεδομένα που θα παραδοθούν. Εξάλλου πρωτόκολλα όπως το IP, βασίζονται στην επικοινωνία με τη χρήση αυτοδύναμων πακέτων δεδομένων και επιπλέον χρησιμοποιούν την τεχνική της βέλτιστης προσπάθειας αποστολής πακέτων. Ως εκ τούτου δημιουργούνται πακέτα διαφορετικού μήκους κάθε φορά ανάλογα με το φόρτο του δικτύου. Αυτό το γεγονός επιφέρει αύξηση στη καθυστέρηση.

Από πλευράς αρχιτεκτονικής δικτύων κάθε ένα από τα επίπεδα του TCP/IP εισάγει τη δική του καθυστέρηση. Στο φυσικό επίπεδο για παράδειγμα, σημαντικό ρόλο στη της καθυστέρησης διαδραματίζουν οι διάφορες τεχνολογίες διαδικτύου που υπάρχουν. Η τεχνολογία DSL η οποία καταλήγει στο χρήστη μέσω της τηλεφωνίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Είναι γεγονός ότι τα DSL δίκτυα τα οποία έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης και φτάνουν στο χρήστη περιορίζουν σημαντικά τη ταχύτητα μετάδοσης [5].

## 2. Οι συμπίεστικές κωδικοποιήσεις

Στη γενική περίπτωση προκειμένου να μεταδοθεί ήχος μέσω διαδικτύου, η ιδανική κωδικοποίηση θα ήταν η κωδικοποίηση CD, η οποία όμως όντας ασυμπίεστη έχει μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για να μεταδοθεί. Αν υπολογίσουμε τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης για ποιότητα CD 44100Hz και βάθος τα 16 bit συμπεραίνουμε ότι έχει τιμή,  $44100 \text{ samples/sec} * 16 \text{ bit/sample} * 2 \text{ channel} = 1.4 \text{ Mbit/sec}$ . Η τιμή αυτή είναι δύσκολο να επιτευχθεί για παράδειγμα σε DSL δίκτυα όπου τυπικές τιμές ρυθμού μετάδοσης για upload είναι 128 ή 512 kBit/s [3] με ποικιλία ανά γεωγραφική περιοχή.

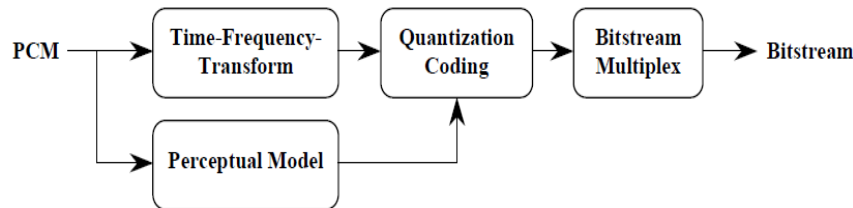
Τη λύση έρχονται να δώσουν οι συμπίεστικές κωδικοποιήσεις ήχου στο επίπεδο εφαρμογής. Αυτές κατά κύριο λόγο βασίζονται στην εξαγωγή του αρμονικού περιεχομένου και την συμπίεση αυτού.

Οι πιο γνωστές συμπίεστικές κωδικοποιήσεις ηχητικών δεδομένων που υπάρχουν αυτή τη στιγμή είναι οι Philips Low-Complexity Subband Codec, η οικογένεια MPEG με τους MPEG-1/2 Layer-1/2/3, MPEG-2/4 AAC, MPEG-4 High Efficiency AAC, και MPEG-4 AAC Low Delay, G722.1 και G722.2, Fraunhofer Ultra Low Delay (ULD) και άλλες [6].



### 3. Η δομή των συμπίεστικών κωδικοποιήσεων

Το γενικό μοντέλο των συμπίεστικών κωδικοποιητών περιλαμβάνει 4 βασικά δομικά στοιχεία [6] και φαίνεται στο Σχήμα 1:



Σχήμα 1. Το γενικό μοντέλο των συμπίεστικών κωδικοποιητών

#### **Τράπεζα φίλτρων, μετασχηματισμός χρόνου σε συχνότητα:**

Το σήμα εισόδου το οποίο αποτελεί PCM ροή μετασχηματίζεται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με χρήση MDCT (Modified Discrete Cosine Transform) η οποία υλοποιείται από μια τράπεζα φίλτρων. Έτσι προκύπτει η πληροφορία του αρμονικού περιεχομένου. Στον αποκωδικοποιητή εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός και ανακτάται το αρχικό σήμα.

**Αντιληπτικό μοντέλο:** Το αρμονικό περιεχόμενο υπόκειται σε επεξεργασία με βάση το φαινόμενο κατά το οποίο ίδιες συχνότητες από διαφορετικές πηγές δεν γίνονται αντιληπτές κάτω από ένα όριο έντασης καθώς η μία καλύπτει (masking) την άλλη. Η τράπεζα φίλτρων υπολογίζει αυτό το κατώφλι το οποίο αποστέλλεται στον παραλήπτη.

**Κβαντισμός και κωδικοποίηση:** Όλα τα υπολογισμένα στοιχεία κβαντίζονται και κωδικοποιούνται με σκοπό τη μετάδοσή τους. Σε αυτό το σημείο συνυπολογίζεται ο θόρυβος κβάντισης ο οποίος πρέπει να είναι χαμηλότερος από προϋπολογισμένο κατώφλι του προηγούμενου βήματος.

**Πολυπλεξία τελικής ροής δεδομένων:** Τα τελικά δεδομένα πολυπλέκονται μαζί με απαραίτητες πλευρικές πληροφορίες και αποστέλλονται στο παραλήπτη με μορφή ροής δεδομένων (bit-stream).

### 4. Η αλγοριθμική καθυστέρηση

Η αλγοριθμική καθυστέρηση που εισάγει η κάθε μια από αυτές τις κωδικοποιήσεις οφείλεται σε κάποιους παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες είναι :

**Τράπεζα φίλτρων:** Η τράπεζα φίλτρων υλοποιείται με δύο τρόπους, είτε με εφαρμογή MDCT (Modified Discrete Cosine Transform) τράπεζας φίλτρων, είτε με QMF τράπεζα φίλτρων η οποία δεν είναι και τόσο διαδεδομένη.

Οι καθυστερήσεις που προκαλείται οφείλεται στην διαδικασία κατά την οποία το σήμα εισόδου αλλάζει συχνότητα δειγματοληψίας προκειμένου να περάσει μέσα

από τη τράπεζα φίλτρων. Συγκεκριμένα η συχνότητα δειγματοληψίας ελαττώνεται (downsampling). Ακόμα, η καθυστέρηση προκαλείται από το σχήμα αλλά και το μήκος της τράπεζας φίλτρων.

Η τράπεζα φίλτρων αποτελείται από ορθογώνια φίλτρα (με μοναδιαίες μήτρες) τα οποία εξορισμού προκαλούν καθυστέρηση η οποία υπολογίζεται ως:

$$N_{\text{filter\_bank}} = \text{length\_of\_filters} - 1 \quad (4.1)$$

Για παράδειγμα ο MPEG-AAC audio coder έχει μήκος τράπεζας φίλτρων 1024 samples οπότε η καθυστέρηση που προκαλεί υπολογίζεται ως  $1024-1=1023$  δείγματα.

**Block Switching:** Οι συμπιεστικές κωδικοποιήσεις συχνά χρησιμοποιούν το λεγόμενο block switching. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται κυρίως για να αποφευχθούν φαινόμενα pre-echo. Κατά το φαινόμενο pre-echo κάποια ακουστική πληροφορία είναι δυνατό να γίνει ακουστή πριν την έναρξη του ηχητικού ντοκουμέντου [6].

Αυτό που γίνεται είναι ο υποβιβασμός του αριθμού των φίλτρων της τράπεζας φίλτρων κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Μεγαλύτερη ανάλυση στο πεδίο του χρόνου απαιτείται σε ήχους με κρουστικά χαρακτηριστικά όπως τα κρουστά. Ο υποβιβασμός του αριθμού της τράπεζας φίλτρων δεν μπορεί να γίνει άμεσα αλλά χρειάζεται ένα παράθυρο μετάβασης (transition window). Προκειμένου να ξεκινήσει η ακολουθία των μεταβολών αυτών είναι απαραίτητη η εφαρμογή του look-ahead με το οποίο ετοιμάζεται ο κωδικοποιητής να δεχθεί κρουστικούς ήχους ή μεγάλες και απότομες αλλαγές στην ηχητική πληροφορία. Η εφαρμογή του look-ahead προκαλεί καθυστέρηση η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$N_{\text{look-ahead}} = \frac{\text{frame\_size\_long}}{2} + \frac{\text{frame\_size\_short}}{2} \quad (4.2)$$

Όπου `frame_size_long` και `frame_size_short` αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των φίλτρων για μεγάλο και μικρό block. Για παράδειγμα στον MPEG-2 AAC το μεγάλο block είναι 1024 samples ενώ το μικρό 128 samples.

**Πρόβλεψη:** Η κωδικοποίηση με χρήση πρόβλεψης έχει 2 εκδοχές. Η μία εκδοχή είναι η πρόβλεψη με βάση το block που έρχεται, γνωστή και ως block wise prediction. Η άλλη εκδοχή είναι πρόβλεψη με βάση το block που πέρασε γνωστή ως back wise prediction.

Κατά τη πρώτη εκδοχή ένα block δεδομένων αναλύεται στον κωδικοποιητή ώστε να υπολογιστούν απαραίτητοι συντελεστές πρόβλεψης προτού το block κωδικοποιηθεί και οι συντελεστές πρόβλεψης αποστέλλονται στον αποκωδικοποιητή σαν πλευρικές πληροφορίες κάτι που φυσικά αυξάνει το overhead των δεδομένων. Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές πρόβλεψης

απαιτείται όλο το block προτού αυτό κωδικοποιηθεί. Οπότε η καθυστέρηση υπολογίζεται ως το μήκος όλου του block σε samples.

Κατά τη δεύτερη εκδοχή οι συντελεστές πρόβλεψης ανανεώνονται σε κάθε δείγμα αλλά υπολογίζονται με βάση τα προηγούμενα δείγματα. Αυτή η εκδοχή έχει το προτέρημα ότι δεν δημιουργούνται επιπλέον πλευρικές πληροφορίες. Ακόμα δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί το block μια φορά για τους υπολογισμούς οπότε δεν υπάρχει η καθυστέρηση της πρώτης εκδοχής. Έτσι το σύστημα εισάγει μηδενική καθυστέρηση [6].

**Bit reservoir:** Πρόκειται για τεχνική η οποία χρησιμοποιείται σε πολλούς κωδικοποιητές με σταθερό μήκος block. Σε ένα σήμα ήχου υπάρχουν ηχητικά μέρη τα οποία απαιτούν περισσότερα και άλλα που ζητάνε λιγότερα bit για να κωδικοποιηθούν. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ελεύθερα bit τα οποία προσπαθούν να προσαρμόσουν τον αριθμό των διαθέσιμων bit προς κωδικοποίηση με τα χαρακτηριστικά του σήματος. Για παράδειγμα, σε τοπικό επίπεδο πρέπει να μπορεί να προσαρμοστεί το μέγεθος του buffer του αποκωδικοποιητή στη λήψη με τον τοπικό ρυθμό μετάδοσης. Εκεί έρχεται η δεξαμενή των bit για να κάνει αυτή τη προσαρμογή. Από μόνη της η δεξαμενή αυτή (reservoir) αποτελεί καθυστέρηση η οποία μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$N_{\text{bitres}} = \frac{\text{bitres\_size}}{\text{bitrate}} * F_s \quad (4.3)$$

Όπου bitres\_size είναι το μέγεθος της αποθήκης σε bit , bitrate είναι ο ρυθμός μετάδοσης και  $F_s$  ο ρυθμός δειγματοληψίας.

Η λειτουργία του γίνεται πιο κατανοητή μέσα από τις δύο εκδοχές του μεγέθους του πακέτου (frame). Στη πρώτη εκδοχή το πακέτο έχει σταθερό μήκος σε bits. Σε αυτή την εκδοχή η πραγματική πληροφορία του ήχου τοποθετείται είτε πριν είτε ακριβώς μετά την επικεφαλίδα (header) του πακέτου. Η αποθήκη τοποθετείται ακριβώς μετά την επικεφαλίδα οπότε και εισάγει καθυστέρηση. Στη δεύτερη εκδοχή το μήκος του πακέτου είναι μεταβλητό. Σε αυτή τη περίπτωση τα δεδομένα ακολουθούν πάντα την επικεφαλίδα. Οπότε ο κωδικοποιητής μπορεί να ξεκινήσει τη μετάδοση αμέσως μετά την κωδικοποίηση. Η καθυστέρηση μεταβιβάζεται στο παραλήπτη ο οποίος πρέπει να περιμένει τη λήψη ολόκληρου του πακέτου συν της αποθήκης [6]. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το βασικό δομικό μοντέλο των συμπιεστικών κωδικοποιήσεων εισάγει a priori καθυστέρηση από τους 4 προαναφερθέντες παράγοντες.

Πέρα από τις προαναφερθέντες συμπιεστικές κωδικοποιήσεις οι οποίες βασίζονται στο βασικό δομικό μοντέλο έχουν γίνει πολλές μελέτες σε παγκόσμιο επίπεδο και έχουν προκύψει νέες κωδικοποιήσεις. Μία από αυτές είναι η κωδικοποίηση opus [7]. Αυτή χρησιμοποιεί τα προαναφερθέντα δομικά μέρη με επιπλέον βελτιώσεις και καταφέρνει να ελαττώσει σημαντικά την καθυστέρηση αλλά και να διατηρήσει την ποιότητα στα επιθυμητά επίπεδα. Η opus προσπαθεί να ελαττώσει τις πλευρικές προς μετάδοση πληροφορίες και να εκμεταλλευτεί το ψυχοακουστικό μοντέλο όσο το δυνατόν περισσότερο. Επιπλέον μεγάλο πρόβλημα στο σχεδιασμό των εφαρμογών που υλοποιούν το NMP αποτελεί και ο

συγχρονισμός των πολλαπλών stream και η δημιουργία ενός ενιαίου, το οποίο θα καταλήγει σε κάθε μουσικό – χρήστη [7].

## 5. Συμπεράσματα

Το NMP αποτελεί μια απολύτως αναγκαία υπηρεσία για την παγκόσμια κοινότητα της μουσικής. Η υλοποίησή του απαιτεί τεχνολογίες οι οποίες καλούνται να δώσουν λύσεις σε περιπτώσεις μεγάλου φόρτου του διαδικτύου, σε περιπτώσεις αναγκαστικής μείωσης της ποιότητας του μεταδιδόμενου ήχου κλπ. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στις συμπιεστικές κωδικοποιήσεις και χρησιμοποιούν εργαλεία πρόβλεψης και προσαρμοστικότητας της κωδικοποίησης στις μεταβολές της κίνησης του διαδικτύου. Τεχνικές block Switching και bit reservoir προσπαθούν να δώσουν τη δυνατότητα αυτή. Προς το παρόν όμως καμία σχεδόν κωδικοποίηση δεν καταφέρνει να ελαττώσει τη καθυστέρηση και να καταστήσει εφικτή τη πραγματοποίηση μιας διαδικτυακής συναυλίας απομακρυσμένων μουσικών. Η πρόκληση λοιπόν παραμένει ανοικτή για τον ακαδημαϊκό και ερευνητικό χώρο και υπάρχουν περιθώρια βελτιστοποίησης των δομών των κωδικοποιήσεων προκειμένου να γίνει η υπηρεσία του NMP αποδοτική.

## 6. Αναφορές

- [1] John Cage, «Imaginary Landscape No.4 for twelve radios», <http://www.theguardian.com/music/2009/aug/06/john-cage-symphony-for-radios>
- [2] Alexander Carot, Ulrich Kramer and Gerald Schuler, «Network Music Performance (NMP) in narrow band networks», May 2006
- [3] C. Burgel, R. Bartholomaeus, W. Fiesel, J. Hilpert, A. Holzer, K. Linzmeier, M. Weishart « Beyond CD-Quality: Advanced Audio Coding (AAC) for High Resolution Audio with 24 bit Resolution and 96 kHz Sampling Frequency » Convention Paper 5476 Presented at the 111th Convention.
- [4] Nathan Schuett «The Effect of Latency on Ensemble Performance», May 2002.
- [5] Dirk Van Aken, Sascha Peckeelbeen, « Encapsulation Overhead(s) in ADSL Access Networks » June 2003.
- [6] Manfred Lutzky, Gerald Schuller, Marc Gayer, Ulrich Krämer and Stefan Wabnik, «A guideline to audio codec delay», May 2004.
- [7] Jean-Marc Valin, Gregory Maxwell, Timothy B. Terriberry, Koen Vos, «High-Quality, Low-Delay Music Coding in the Opus Codec», 2013.
- [8] Gu, X.Dick, M. Noyer, U. Wolf, L. «"NMP - a new networked music performance system » Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. Globe Com Workshops 2004. IEEE. pp. 176–185.
- [9] Alexander Carot, “Diplomathesis: livemusic on the internet” FH Lubeck, May 2004
- [10] John Lazzaro, John Wawrzynek, «A Case for Network Musical Performance» presented at the 11th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 2001) June 25-26, 2001, Port Jefferson, New York.



# **Υπολογισμός κατευθυντικότητας συστοιχίας συντονιστών Helmholtz**

Σπύρος Πολυχρονόπουλος<sup>1,a</sup>, Κυριάκος Παπαναγιώτου<sup>1,b</sup>, Ιωάννης Μουρτζόπουλος<sup>2,c</sup> & Δημήτρης Σκαρλάτος<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> KP Acoustics,

<sup>2</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών

<sup>3</sup> Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχ/κών, Πανεπιστήμιο Πατρών

<sup>a</sup> [spyrospoly@kpacoustics.com](mailto:spyrospoly@kpacoustics.com), <sup>b</sup> [kypap@kpacoustics.com](mailto:kypap@kpacoustics.com), <sup>c</sup> [mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr),

<sup>d</sup> [skarlat@mech.upatras.gr](mailto:skarlat@mech.upatras.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο συντονιστής Helmholtz δρα τόσο ως απορροφητής όσο και σκεδαστής των ηχητικών κυμάτων. Η ενεργός διατομή σκέδασης έχει μια συνιστώσα στενής ζώνης συχνότητας και κάτω από ιδανικές συνθήκες προσαρμογής είναι ίση με την ενεργό διατομή απορρόφησης με μέγιστο στην συχνότητα συντονισμού.

Στην εργασία αυτή, σε περιβάλλον matlab, δημιουργήθηκε λογισμικό το οποίο εξομοιώνει τη ακουστική συμπεριφορά μίας διάτρητης επιφάνειας -η οποία για την εξομοίωση θεωρήθηκε να είναι μια συστοιχία συντονιστών σε ανακλαστική επιφάνεια-. Το εν λόγω λογισμικό είναι ευέλικτο διότι, αφενός μεν δέχεται μετατροπές σε αρκετές παραμέτρους της διάτρητης επιφάνειας, αφετέρου δε μπορεί να μεταβάλλεται εύκολα η θέση του πομπού και του δέκτη. Εδώ παρατίθενται τα πολικά διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν την εξάρτηση της γωνίας του δέκτη σε συνάρτηση με την ηχητική στάθμη. Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων για συχνότητες γύρω από την συχνότητα συντονισμού έδειξαν ότι η κατευθυντικότητα της εκπομπής για συστοιχία συντονιστών είναι ανάλογη με την συμπεριφορά εμβόλου τοποθετημένου σε επιφάνεια απείρων διαστάσεων πλήρως απορροφητικού, καθώς παρατηρείται και μια αυξημένη κατευθυντικότητα για γωνίες μεγαλύτερες των  $45^\circ$  σχετικά με την κάθετο στην επιφάνεια.

## ***Directivity of panel absorbers calculation***

### **ABSTRACT**

*An efficient method for simulating the far field acoustic radiation from resonator panel absorbers is presented following a filter-based modeling approach. This method allows the evaluation of the time and frequency domain response of arbitrary-sized perforated panels in any specific receiver position under free-field and diffuse-field acoustic environments. Such panel absorbers employ the Helmholtz resonator principle, whose filter-based representation is well-defined. Hence,*

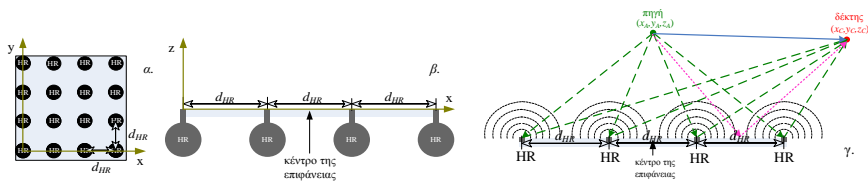
combining such basic resonator elements, the physical parameters of the panel can be user-defined in a parametric fashion, and it is shown that from the derived impulse response, the sound field that a panel resonator creates can be evaluated with sufficient accuracy. Unlike existing analytical approaches, the proposed approach offers significant computational efficiency and allows flexible and fast practical evaluation of the effect of such panel absorbers.

## 1. Εισαγωγή

Μια διάτρητη επιφάνεια, λειτουργεί με βάση τις αρχές των συντονιστών Helmholtz και είναι ένα κοινό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ακουστικής ανοικτών και κλειστών χώρων [1]. Το βασικό πρόβλημα της μιας διάτρητης επιφάνειας είναι ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης, αλλά και η επίδραση στην απορρόφηση του προσανατολισμού της στον χώρο. Ένας ακριβής υπολογισμός των ακουστικών χαρακτηριστικών μιας διάτρητης επιφάνειας, μπορεί να προκύψει από τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων, όπως για παράδειγμα η μέθοδος FEM και FTD [2-5]. Κύριο μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι οι υπερβολικά περίπλοκοι και χρονοβόροι υπολογισμοί. Για παράδειγμα, επιλύοντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο ενός μόνο συντονιστή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο της συχνότητας, ένας σύγχρονος υπολογιστής θα χρειαστεί περίπου μια μέρα.

Στην εργασία αυτή προτείνεται μια καινούργια μέθοδος, βασισμένη σε μια απλουστευμένη αλλά αποτελεσματική γραμμική, με ψηφιακά φίλτρα προσέγγιση, η οποία περιγράφει σημείο προς σημείο την κρουστική απόκριση και την κατευθυντικότητα των διάτρητων επιφανειών. Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου έγιναν αρκετές απλουστεύσεις σε σχέση με τους φυσικούς μηχανισμούς της ακουστικής συμπεριφοράς από τέτοιες ηχοαπορροφητικές επιφάνειες.

### 1.1 Περιγραφή μοντέλου



Σχήμα 1. Αναπαράσταση της απόκρισης μιας διάτρητης επιφάνειας με 4x4 στοιχεία (συντονιστές Helmholtz). α. Κάτοψη β. Τομή γ. Οι διαδρομές των σημάτων.

Μια διάτρητη επιφάνεια με κανονική ή τυχαία διάτρηση, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα συντονιστών τοποθετημένων σε απορροφητική ή μη επιφάνεια. Στην παρούσα εργασία για μεγαλύτερη ευκολία, συντονιστές Helmholtz τοποθετήθηκαν με κανονική διάταξη, δηλαδή σε συμμετρικά ίσες αποστάσεις ( $d_{HR}$ ) η μία από την

άλλη, όπως φαίνεται στα σχήματα 1α και 1β, δημιουργώντας μια συστοιχία από  $N_x \times N_y$  στοιχεία (συντονιστών). Για περαιτέρω απλούστευση όσον αφορά τους υπολογισμούς, αναλύθηκε μια τετράγωνη επιφάνεια, ( $N_x=N_y=N$ ),  $N^2$  συντονιστών.

Η επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι συντονιστές Helmholtz  $S_p$  ισούται με:

$$S_p = (\sqrt{N} - 1)^2 d_{HR}^2$$

Για να είναι υλοποιήσιμο το μοντέλο θα πρέπει να επιβληθεί ο περιορισμός:

$$2r_{HR} < d_{HR} \Rightarrow 2\sqrt{\frac{S_{HR}}{\pi}} < d_{HR} \Rightarrow S_{HR} < \frac{d_{HR}^2 \pi}{4}$$

Υποθέτουμε ότι το όλο σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Μια παντοκατευθυντική πηγή και ένας δέκτης έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις A ( $x_A, y_A, z_A$ ) και C ( $x_C, y_C, z_C$ ) αντίστοιχα (σχήμα 1γ.). Ο κάθε συντονιστής μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα δευτέρας τάξης σύστημα, του οποίου η κρουστική απόκριση σε διακριτό χρόνο  $h_{HR}(n)$  μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα ΠΡ φίλτρο [6], όπως για παράδειγμα ένα φίλτρο που είναι και εμπρόσθιας τροφοδότησης και ανατροφοδοτούμενο.

Όταν το σήμα εισόδου στο συντονιστή είναι μια ιδανική συνάρτηση  $\delta(n)$ , τότε η κρουστική απόκριση του συντονιστή  $h_{HR}(n)$ , μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$h_{HR}(n) = A_0 \delta(n) + A_1 \delta(n-1) + A_2 \delta(n-2) - B_1 \delta(n-1) - B_2 \delta(n-2) \quad (1)$$

Για οποιαδήποτε είσοδο  $x(n)$  το σήμα εξόδου θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση διαφοράς:

$$y(n) = A_0 x(n) + A_1 x(n-1) + A_2 x(n-2) - B_1 y(n-1) - B_2 y(n-2) \quad (2)$$

Οι μεταβλητές  $A_0, A_1, A_2, B_1$  και  $B_2$  εκφράζουν την γεωμετρία του συντονιστή και μπορούν να συσχετιστούν [7,8] με τις παραμέτρους του φίλτρου (συχνότητα συντονισμού, ζώνη διέλευσης και εύρος ζώνης), μέσω των εκφράσεων:

$$A_0 = \frac{1 + a_p + k_{gain} - k_{gain} a_p}{2} \quad A_1 = b_p (1 + a_p) \quad A_2 = \frac{1 - k_{gain} + a_p + k_{gain} a_p}{2}$$

$$B_1 = A_1, \quad B_2 = a_p, \quad a_p = \frac{1 - \tan\left(\frac{\pi B}{F_s}\right)}{1 + \tan\left(\frac{\pi B}{F_s}\right)}, \quad b_p = -\cos\left(\frac{f_0}{F_s}\right)$$

όπου  $F_s$  είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας,  $B$  (Hz) είναι το ζωνικό εύρος συχνότητα συντονισμού  $B = f_0/Q$  και  $Q$  ο παράγων ποιότητας [9,10,11].

Οι μεταβλητές  $M_A$  και  $R_A$  υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις [9,10,11]:



$$M_A = \frac{\rho_0 L_{HR}}{\pi r_{HR}^2} \text{ σε } \text{kg}/\text{m}^4 \quad R_A = \frac{\sqrt{4\pi f_0 \rho_0 \mu} L_{HR}}{\pi r_{HR}^2} \frac{16}{r_{HR} 3\pi} \text{ σε } \text{g}/\text{m}^2 \text{ sec}$$

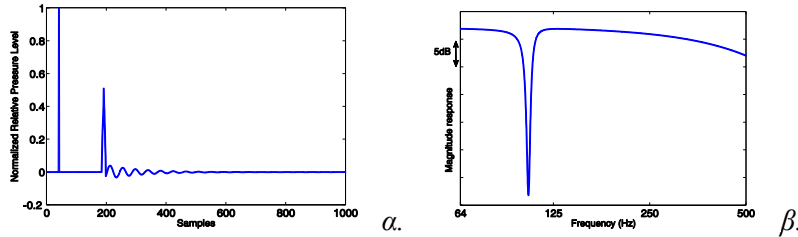
$\rho_0$  είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης και  $\mu$  το ιξώδες.

Θεωρώντας ότι ο συντονιστής συμπεριφέρεται τόσο ως απορροφητής, όσο και ως σκεδαστής ακουστικής ενέργειας [10-12] στη συχνότητα συντονισμού, στο κοντινό πεδίο όπου κυριαρχεί η εκπομπή, το κέρδος του φίλτρου θα είναι θετικό, ενώ στο μακρινό πεδίο όπου κυριαρχεί η απορρόφηση, το κέρδος θα έχει αρνητικό πρόσημο κι έτσι αυτή η μείωση της ακουστικής ενέργειας -στο μακρινό πεδίο σε dB μπορεί να υπολογιστεί ως:  $k_{gain} = Q$

Η ακουστική πίεση που προκύπτει από την συμβολή των ηχητικών κυμάτων από την πηγή και κάθε συντονιστή (οπή), λαμβάνοντας υπόψη και τις αντίστοιχες αποστάσεις και την μείωση λόγω σφαιρικής διάδοσης, η ολική ακουστική πίεση στη θέση του δέκτη (C), μπορεί να γραφεί από την υπέρθεση των πιέσεων που προέρχεται από κάθε πηγή, και που προκύπτουν από την λύση της κυματικής εξίσωσης στον χώρο των τριών διαστάσεων για σφαιρική συμμετρία ως εξής:

$$p_C(r,t) = \frac{P_{source}(r,t)}{r_{AC}} e^{j(\omega t_{AC} - kr_{AC})} + \frac{P_{HRPout}(r,t)}{r_{BC}} e^{j(\omega t_{BC} - kr_{BC})} \quad (3)$$

όπου:  $r_{AC}$  η απόσταση από το σημείο A μέχρι το σημείο C,  $r_{BC}$  η απόσταση από το σημείο B μέχρι το σημείο C,  $t_{AC}$  ο χρόνος για να φθάσει το σήμα από το σημείο A στο σημείο C και  $t_{AB}$  ο χρόνος για να φθάσει το σήμα από το σημείο A στο σημείο B.



Σχήμα 2. Απόκριση στη θέση C (0, 1, 2) του δέκτη για μια συστοιχία συντονιστών Helmholtz (με  $f_0=120\text{Hz}$ )  $4 \times 4$  στοιχείων, διάτρητης επιφάνειας στο σημείο B (0, 0, 0) και πηγή ευρισκόμενη στη θέση A (0, 0, 1) η οποία εκπέμπει την  $t=0$  συνάρτηση δ. α. κρουστική απόκριση β. απόκριση στο πεδίο της συχνότητας.

Ο συνδυασμός των αποκρίσεων όλων των συντονιστών στον δέκτη (C) υπολογίζεται ως εξής:

$$h_{THRC}(n) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_{ABi} + r_{BCi}} h_{HRC}(n - (n_{ABi} + n_{BCi})) \quad (4)$$

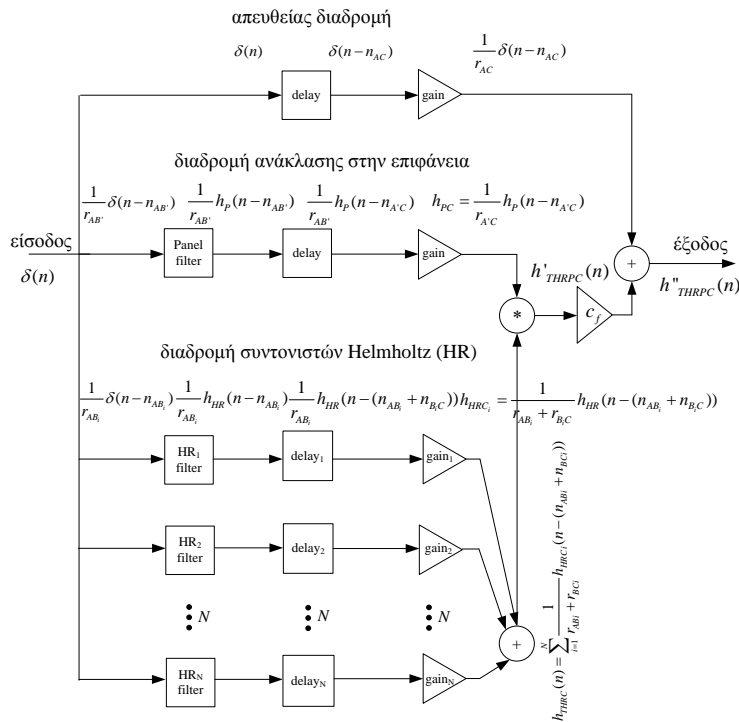
Ανάλογα δε με το υλικό της επιφάνειας το ανακλώμενο σήμα φιλτράρεται από ένα ισοδύναμο φίλτρο στις αντίστοιχες συχνοτικές περιοχές (ροζ γραμμή με τελείες, σχήμα 1γ.). Η συμβολή της επιφάνειας στη θέση του δέκτη (C), εκφράζεται από την κρουστική απόκριση  $h_{PC}(n)$ . Το σύστημα συστοιχία συντονιστών - επιφάνειας συνεπώς θα χαρακτηρίζεται από την συνέλιξη δύο γραμμικών συστημάτων, κρουστικών αποκρίσεων των συντονιστών ( $h_{THRPC}(n)$ ) και της επιφάνειας:

$$h_{THRPC}(n) = h_{THRC}(n) * h_{PC}(n) \quad (5)$$

Η ολοκληρωμένη απόκριση του συστήματος αν λάβουμε υπόψη μας και την απευθείας διαδρομή (απευθείας σήμα) στο δέκτη θα είναι:

$$h'_{THRPC}(n) = \frac{1}{r_{AC}} \delta(n - n_{AC}) + c_f [h_{THRC}(n) * h_{PC}(n)] \quad (6)$$

όπου  $c_f$  ένας παράγοντας βαθμονόμησης που εξαρτάται από τον παράγοντα  $N$  (αριθμός των συντονιστών) ώστε να υπολογιστεί η συνδυασμένη επίδραση των  $N$  σημάτων από τους συντονιστές που φτάνουν στον δέκτη.

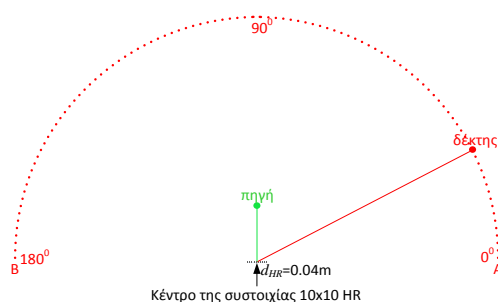


Σχήμα 3. Διάγραμμα τμημάτων για το προτεινόμενο μοντέλο φίλτρου μιας απορροφητικής διάτρητης επιφάνειας που περιέχει μια συστοιχία από  $N$  συντονιστές σε ελεύθερο πεδίο.

## 2. Αποτελέσματα

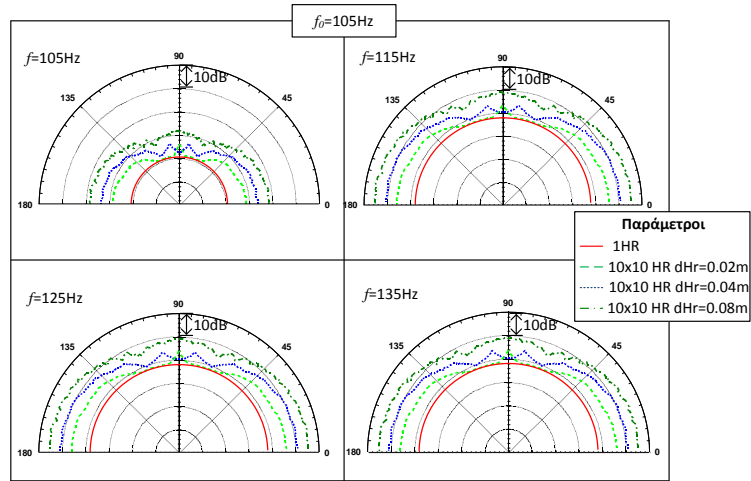
### 2.1 Η συμβολή των σημάτων των συντονιστών σε σχέση με τη γωνία του δέκτη

Για τον προσδιορισμό της κατευθυντικότητας μελετήθηκε η διάταξη του σχήματος 4. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται μια συστοιχία συντονιστών ( $N=10 \times 10$ ) με το δέκτη να μετατοπίζεται κατά μήκος ενός τόξου  $180^\circ$  με βήμα  $1^\circ$ . Η πηγή βρίσκεται πάνω από το κέντρο της συστοιχίας σε ύψος  $0.2\text{m}$  και εκπέμπει ιδανικό κρουστικό παλμό (συνάρτηση  $\delta$ ).

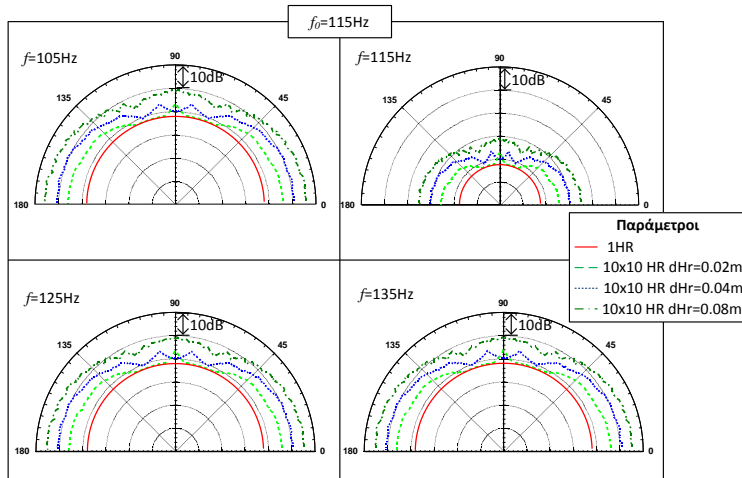


Σχήμα 4. Συστοιχία συντονιστών  $10 \times 10$  με τον δέκτη να κινείται στο τόξο  $AB$  με βήμα μετατόπισης  $1^\circ$ .

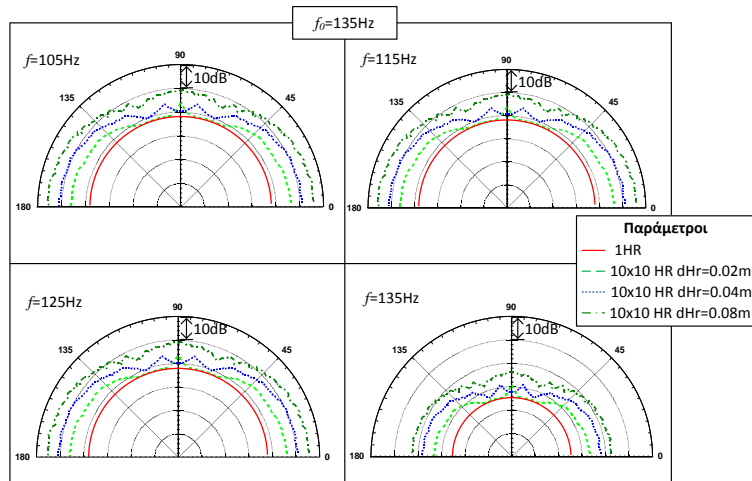
Οι συχνότητες συντονισμού των συντονιστών ( $f_0$ ) που μελετήθηκαν είναι:  $105\text{Hz}$ ,  $115\text{Hz}$  και  $135\text{Hz}$ . Τα σχήματα 5, 6 και 7 προβάλλουν τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων για τρεις περιπτώσεις. Η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην περίπτωση ενός συντονιστή και στα σχήματα παρατηρείται ότι η κατευθυντικότητά του είναι ανεξάρτητη της γωνιακής μετατόπισης του δέκτη όπως προβλέπεται και θεωρητικά [13]. Η γραμμή με πράσινο αντιστοιχεί σε απόσταση συντονιστών  $d_{HR}=0.02\text{m}$ , η μπλε σε απόσταση  $0.04\text{m}$  και η πράσινη σε απόσταση  $0.08\text{m}$ . Συγκρίνοντας τα σχήματα παρατηρείται ότι στην συχνότητα συντονισμού η ενέργεια του πεδίου είναι αισθητά μειωμένη σε όλες τις περιπτώσεις. Επίσης φαίνεται η επίδραση του βαθμού διάθρυσης της επιφάνειας στην κατευθυντικότητα.



Σχήμα 5. Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών  $f_0=105\text{Hz}$ .



Σχήμα 6. Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών  $f_0=115\text{Hz}$ .



Σχήμα 7. Πολικό διάγραμμα για διαφορετικές αποστάσεις των συντονιστών, σε διαφορετικές συχνότητες με συχνότητα συντονισμού των συντονιστών  $f_0=135\text{Hz}$ .

### 3. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια καινοτόμος και αποτελεσματική μέθοδος αξιολόγησης της κατευθυντικότητας μιας διάτρητης απορροφητικής επιφάνειας με δεδομένο αριθμό στοιχείων συντονιστών Helmholtz. Η μέθοδος είναι βασισμένη σε ένα απλουστευμένο, με δομή φίλτρου, παραμετροποιησιμο μοντέλο. Το μοντέλο αποτελείται από 2<sup>ης</sup> τάξης παραμετρικά PIR ψηφιακά φίλτρα, που εξομοιώνουν τη γραμμική απόκριση του κάθε συντονιστή. Για να υπολογιστεί η κρουστική απόκριση σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, αξιολογούνται οι αντίστοιχες ακουστικές διαδρομές των σημάτων και βάση αυτών λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχες καθυστερήσεις και το αντίστοιχο κέρδος στα σήματα. Η συνδυασμένη απόκριση του συστήματος των συντονιστών και της επιφάνειας μπορούν να προβλεφθούν, οδηγώντας στην αποτελεσματική αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, μια τέτοια προσέγγιση οδηγεί σε μια απλή αλλά ακριβή και γρήγορη αξιολόγηση της απόκρισης των διάτρητων επιφανειών απορρόφησης οποιασδήποτε γεωμετρίας, οποιουδήποτε ποσοστού διάτρησης και ιδιοτήτων επιφάνειας, σε οποιαδήποτε θέση δέκτη υπό ιδανικές συνθήκες ελεύθερου πεδίου.

Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγιναν μερικές απλουστεύσεις, όπως για παράδειγμα: αγνοήθηκε η διαφοροποίηση της απορρόφησης που ενδεχομένως δημιουργεί η γωνιακή πρόσπτωση του κύματος στην επιφάνεια και στους συντονιστές, οι αλληλοεπιδράσεις των συντονιστών, οι αναλυτικές ιδιότητες της εκπομπής του ήχου από τις οπές κτλ. Η προτεινόμενη μέθοδος εισάγει μια ευέλικτη και πρακτική εναλλακτική λύση, έχοντας μικρότερες και διαχειρίσιμες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα βασιζόμενη στις σύγχρονες μεθόδους ακουστικής προσομοίωσης και της γεωμετρικής ακουστικής. Με τη μέθοδο αυτή λοιπόν, οποιαδήποτε διάτρητη επιφάνεια και συντονιστής Helmholtz μπορεί να επισυναφθεί σε ένα εικονικό δωμάτιο και έπειτα να αξιολογηθούν οι τροποποιημένες κρουστικές αποκρίσεις, εξαιτίας της πρόσθετης απορρόφησης. Η επίδραση της πρόσθετης απορρόφησης που εισαγάγει η διάτρητη επιφάνεια στους ακουστικούς δείκτες, μπορεί εύκολα να εισαχθεί στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τους συνήθεις πίνακες συντελεστών απορρόφησης. Η ακουστική επίδραση της προσθήκης των διάτρητων επιφανειών σε χώρους μπορεί να αξιολογηθεί μέσω πειραμάτων ακρόασης. Ακόμη, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται με αμφιωτικά φίλτρα τις κρουστικές αποκρίσεις στην επιθυμητή θέση ακρόασης.

#### 4. Βιβλιογραφία

- [1]. Trevor J. Cox και Peter D'Antonio, "*Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application*", second Edition, Taylor & Francis, 2009.
- [2]. Daniel O. Ludqigsen, Cayla Jewett και Matthew Jusczyk, "*Better Understanding of Resonance through Modeling and Visualization*", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, Boston, 2006.
- [3]. Lawrence Ziomek, "*Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space - Time Signal Processing*", CRC Press Inc., 1994.
- [4]. S. Mekid και M. Farooqui, "*Design of Helmholtz resonators in one and two degrees of freedom for noise attenuation in pipelines*", Acoustics Australia, vol. 40, no. 3, 2012.
- [5]. Vasile, O. και Gillich G., "*Finite Element Analysis Of Acoustic Pressure Levels And Transmission Loss Of A Muffler*", 6th Wseas European Computing Conference, Prague, 2012.
- [6]. Ken Steiglitz, "*A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*", Prentice Hall, 1996.
- [7]. J. N. Mourjopoulos, E. D. Kyriakis-Bitaros και C.E. Goutis, "*Theory and Real-Time Implementation of Time Varying Digital Audio Filters*", Journal of Audio Engineering Society, vol. 38, no 718, 1990.
- [8]. Ken Steiglitz, "*A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Digital Audio and Computer Music*", Prentice Hall, 1996.
- [9]. D. Bies and C. Hansen, "*Engineering noise control Theory and practice*", third Edition, CRC Press Inc., 2003.
- [10]. K.U. Ingard, "*On the theory and design of acoustic resonators*", JASA, vol. 25, 1953.
- [11]. S. Polychronopoulos, D. Skarlatos and J. Mourjopoulos, "*Efficient filter-based model for resonator panel absorbers*" J. Audio Eng. Soc., Vol. 62, No. 1/2, 2014 January/February
- [12]. Crighton D. G., Dowling A. P., Fowcs Williams J. E. Heckl M. και Leppington F G. "*Modern Methods in Analytical Acoustics*", Lecture notes Springer Verlag London 1996.

- [13]. . E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens και James V. Sanders, *"Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition"*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.

## **Αξιολόγηση της ακουστικής άνεσης σε ξενοδοχεία: κατασκευαστικές ελλείψεις, διαφήμιση, παράπονα**

Νίκος Κ. Μπάρκας

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ.

[nbarkas@arch.duth.gr](mailto:nbarkas@arch.duth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ανακοίνωση αποτελεί συνοπτική έκθεση μιας ευρείας πανεπιστημιακής έρευνας (2012–2014) με στόχο την αξιολόγηση των οικοδομικών ανέσεων σε ελληνικές, κυπριακές και διεθνείς ξενοδοχειακές μονάδες. Η έρευνα αναλύει ψηφιακά δεδομένα από τις διαφημιζόμενες παροχές (υπηρεσίες και ανέσεις) των επιχειρήσεων, αλλά και τα σχετικά, καταγεγραμμένα σχόλια /παράπονα των πελατών τους. Περιλαμβάνει επίσης τη συλλογή και επεξεργασία οικοδομικών δεδομένων από ξενοδοχειακές μονάδες 3, 4 και 5 αστέρων σε Ελλάδα και Κύπρο, με βάση 7 κριτήρια αξιολόγησης των ακουστικών ανέσεων. Ως προδιαγραφές ελήφθησαν υπόψη οι σχετικοί Κανονισμοί Ελλάδας /Κύπρου και παρατίθενται ενδεικτικοί έλεγχοι ηχομονωτικών απαιτήσεων κατά DIN 4109.*

### ***Evaluation of acoustic comfort in hotel: building deficiencies, advertising, complaints***

### **ABSTRACT**

*The paper is a summary of a large research (2012-2014) aiming to assess the building comfort in Greek, Cypriot and International hotels. The research analyzes the digital data from the advertised benefits (services and facilities) of the hotels, and the relevant recorded comments / complaints made by their customers. It also includes the collection and processing of building details (3, 4 and 5 star hotels in Greece and Cyprus), based on 7 criteria for assessing the acoustic comfort. The Regulations in Greece and Cyprus were taken into account for the realization of indicative controls of the insulation requirements in DIN 4109.*



## Εισαγωγή

Ο τουρισμός αποτελεί έναν από τους βασικούς τομείς παραγωγής πλούτου στην Ευρώπη, η οποία ως τουριστικός προορισμός διαθέτει ιδιαίτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά χάρη στο υψηλό επίπεδο των παρεχόμενων υπηρεσιών και των προσφερόμενων ανέσεων. Το 2012, οι τουριστικές αφίξεις στην Ευρώπη έφτασαν τα 534 εκατομμύρια (αυξημένες κατά 18 εκατομμύρια, ή +3% σε σχέση με το 2011, μια «κακή» χρονιά λόγω της οικονομικής κρίσης), με προοπτική να ξεπεράσουν τα 744 εκατομμύρια (+40%) το έτος 2030. [1]

Για να κατανοήσουμε τα πραγματικά και δυνητικά δεδομένα του ευρωπαϊκού τουρισμού, επιλέξαμε τρεις (3) πόλεις /προβλεπόμενους τουριστικούς προορισμούς: -το Λονδίνο (2012 : 15 εκατομμύρια αφίξεις), 1ος τουριστικός προορισμός στην Ευρώπη, -το Παρίσι (2012 : 11 εκατομμύρια αφίξεις), 2ος τουριστικός προορισμός στην Ευρώπη και -τη Βαρκελώνη, 3ος τουριστικός προορισμός στην Ευρώπη.

Το δείγμα της έρευνας αποτέλεσαν είκοσι επτά (27) ξενοδοχεία, διασπαρμένα σε τρεις (3) κεντρικές συνοικίες (μία μονάδα 5, 4 και 3 αστέρων σε κάθε συνοικία). Το υλικό για τις διαφημιζόμενες παροχές / ανέσεις συλλέχθηκε από τις ιστοσελίδες των ξενοδοχείων (περίοδος 12/2013 – 3/2014). Το υλικό για τα παράπονα / σχόλια των πελατών τους, την ίδια περίοδο, συλλέχθηκε στον τουριστικό ιστότοπο [www.booking.com](http://www.booking.com), (συνολικά αναλύθηκαν 13.427 καταχωρίσεις).

Η ομαδοποίηση των διαφημιζόμενων ή σχολιασμένων ανέσεων οδήγησε σε ένα κατάλογο με τριάντα τέσσερα (34) λήμματα, τα οποία καλύπτουν ποσοστό 91% του συνόλου των αναφορών. Τα δέκα (10) συνηθέστερα και συχνότερα εμφανιζόμενα λήμματα, ο 10λόγος της επιχείρησης και ο 10λόγος του πελάτη (με τη συχνότητα εμφάνισης σε ποσοστά %) δίδονται στον πίνακα Ε.1. [2]

Αναφορικά με τις διαφημιζόμενες ανέσεις δεν εντοπίστηκαν σημαντικές αποκλίσεις (> +/-3%), ανά πόλη ή κατηγορία. Χαρακτηριστικές αποκλίσεις :

- τα ξενοδοχεία 5 αστέρων προβάλλουν τις οικοδομικές ανέσεις (> +10%) και ιδίως το μέγεθος των ΥΔ (> 20%)
- τα ξενοδοχεία 3 αστέρων προβάλλουν την εξυπηρέτηση ΑΜΕΑ (> +10%)
- η Βαρκελώνη προβάλλει τις υποδομές, την εξοικονόμηση ενέργειας / ανακύκλωση πόρων και το έτος κατασκευής / ανακαίνισης (> +35%)
- ο Παρίσι προβάλλει την ησυχία (> + 30%) και τις βιοκλιματικές παραμέτρους ((> +20%)
- το Λονδίνο υπολείπεται σε προβολή της ησυχίας και γενικά όλων των οικοδομικών ανέσεων (> -20%) επιβαρύνοντας το σφαιρικό αποτέλεσμα.

Αναφορικά με τα καταγεγραμμένα σχόλια των πελατών, οι θετικές αναφορές σε οικοδομικές ανέσεις υπολείπονται των αρνητικών (αναλογία ~ 40/60), ενώ αντίθετα οι θετικές αναφορές σε υπηρεσίες υπερτερούν των αρνητικών (αναλογία ~60/40). Γενικά 1 στα 4 σχόλια αφορά παράπονα για οικοδομικές ανέσεις. Οι επιμέρους διαφοροποιήσεις (ανά πόλη, κατηγορία αστέρων και ομάδα πελατών) δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις (> +/-3%) με εξαίρεση :

- την υπεροχή των θετικών σχολίων για τις οικοδομικές ανέσεις και ιδίως τις υποδομές στην Βαρκελώνη (> +10%),
- την υπεροχή των αρνητικών σχολίων για τις οικοδομικές ανέσεις και ιδίως το μέγεθος του ΥΔ στο Λονδίνο (> - 10%)

-την υπεροχή της αναλογίας θετικών / αρνητικών σχολίων για την ησυχία στα ξενοδοχεία 5 αστέρων (> + 10%),  
 -σε 11 /27 μονάδες του δείγματος καταγράφεται σημαντικός αριθμός παραπόνων για θόρυβο (εξ αυτών οι 3 διαφημίζουν την ησυχία και οι 8 την αποσιωπούν),  
 -οι 7/11 μονάδες όπου καταγράφονται παράπονα για θόρυβο αφορούν το δείγμα του Λονδίνου (την πόλη με το μικρότερο βάρος στην προβολή των οικοδομικών ανέσεων), δηλαδή σχετικό ποσοστό 78%.

*Πίνακας Ε.1. συχνότητα εμφάνισης παροχών / ανέσεων σε διαφήμιση και σχόλια*

κατηγορίες υπηρεσιών / ανέσεων	ο 10λογος της επιχείρησης	ο 10λογος του πελάτη
Θέση (πρόσβαση, γειτνιάσεις, θέα)	100%	
Εξυπηρέτηση (προσωπικού)		22%
Παροχές (wi-fi, κλιματισμός, TV, mini bar, ιατρική περίθαλψη κλπ)	100%	13%
Καθαριότητα (ΥΔ και συνολικά)		10,6%
Πρωινό	100%	9,9%
Άνεση ΥΔ (μέγεθος ΥΔ – κλινών, εργονομία, επίπλωση)	67%	17%
Υποδομές (στάθμευση, χώροι άθλησης/ ευεξίας / συνεδριάσεων /αναψυχής)	67%	9,3
Τιμή (σε σχέση με τα προσφερόμενα)		6,8
Εξυπηρέτηση ΑΜΕΑ (πρόσβαση, προσπέλαση, ειδικά ΥΔ)	48%	0,2%
Έτος Κατασκευής / ανακαίνισης	44%	
Ησυχία / Ηχοπροστασία (εσωτ./ εξωτ. θόρυβοι)	37%	9,4%
Βιοκλιματικές παράμετροι (φυσικός φωτισμός/ αερισμός, σκιασμός)	30%	2,2%
Εξοικονόμηση ενέργειας / ανακύκλωση	30%	

## 1. Ηχομονωτικές απαιτήσεις σε ξενοδοχεία – κανονισμοί

Ο Κυπριακός Κανονισμός «περί ξενοδοχείων και τουριστικών καταλυμάτων», περιλαμβάνει τα παρακάτω εδάφια για ζητήματα ακουστικής άνεσης [3]:

-, παράγραφος Γ, η ηχοπροστασία επιτυγχάνεται βάσει των αρχών ηχοπροστασίας των κατασκευών με επένδυση των διαχωριστικών τοίχων (0.15 cm) και των οροφών με μονωτικό υλικό . . . [με] την τοποθέτηση μηχανημάτων που προκαλούν θόρυβο και κραδασμούς επί ελαστικών θεμελιώσεων ή υποβάθρων. Για την πλύση των λεκανών των αποχωρητηρίων προτιμούνται συσκευές που δεν προκαλούν θόρυβο σε ενοχλητικό βαθμό.

-παράγραφος Δ, επιτρέπεται η λειτουργία εξωτερικών καταστημάτων (. . .) με την προϋπόθεση να προορίζονται για χρήση μη προκαλούσα θορύβους . Δεν αποκλείεται, επίσης, η λειτουργία (. . .) αίθουσας διασκέδασης, αφού ληφθούν μέτρα ηχομόνωσης.

-παράγραφος Η, οι πτέρυγες των υποδοματίων (ΥΔ) πρέπει να απομονώνονται από κοινόχρηστους και βοηθητικούς χώρους. Δεν επιτρέπεται η επαφή ΥΔ με το φρεάτιο ανελκυστήρα, εκτός αν έχει προβλεφθεί τοίχος διπλός ή μονωμένος .

Ο αντίστοιχος Ελληνικός Κανονισμός αναφέρει σχετικά [4] :

-παράγραφος ζ (σελίδα 518), υποχρεωτική διαμόρφωση προθαλάμων μεταξύ ΥΔ και κοινόχρηστων διαδρόμων για μονάδες 4 και 5 αστέρων (προαιρετικά για τις υπόλοιπες κατηγορίες)

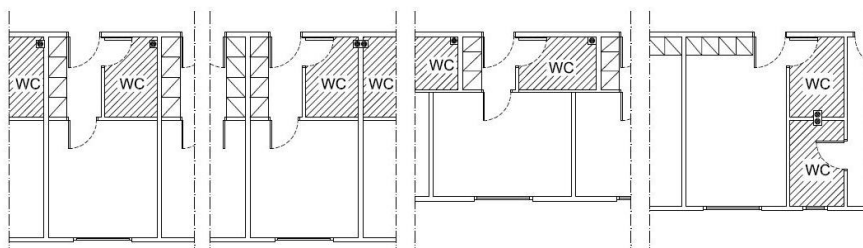
-παράγραφος η (σελίδα 538), τα κατακόρυφα διαχωριστικά μεταξύ ΥΔ ή ΥΔ και διαδρόμων ή ΥΔ και περιβάλλοντος χώρου θα έχουν min ηχομονωτική ικανότητα 45dB. Τα οριζόντια διαχωριστικά μεταξύ ΥΔ ή ΥΔ και άλλων χώρων θα έχουν min ηχομονωτική ικανότητα 48dB. Η max ηχοδιαπερατότητα μεταξύ ΥΔ ή ΥΔ και άλλων χώρων είναι 62dB.

Για πρόσθετες προδιαγραφές οι παραπάνω κανονισμοί παραπέμπουν στον Ελληνικό Κτιριοδομικό Κανονισμό [5].

## 2. Υπολογιστικά δεδομένα

Για να προσδιορίσουμε το μέγεθος των απαραίτητων ηχομονωτικών παρεμβάσεων και να εντοπίσουμε τις συνηθέστερες ελλείψεις στις τυπικές οικοδομικές εφαρμογές των ξενοδοχειακών μονάδων, παρουσιάζονται αναλυτικά τρία (3) χαρακτηριστικά κριτήρια ελέγχου.

### 2.1. Διαρρύθμισης ΥΔ - WC



Σχήμα 2.1. Χαρακτηριστικές εκδοχές γειτνίασης ΥΔ και WC

1η εκδοχή : σχήμα κάτοψης κατά παράθεση, σαφές περίγραμμα κάθε ΥΔ.

πλεονέκτημα : δυνατότητα σχηματισμού κεντρικού προθαλάμου στα ΥΔ,

μειονέκτημα : κοινή μεσοτοιχία ΥΔ με γειτονικό WC,

απαιτήση : προσθήκη ηχομονωτικού φλοιού σε κάθε μεσοτοιχία, ελαστικές συνδέσεις και αντικραδασμική προστασία

2η εκδοχή: συμμετρικό σχήμα κάτοψης, σαφές περίγραμμα κάθε ΥΔ.

πλεονέκτημα : οριοθέτηση των οχληρών χρήσεων εκατέρωθεν της κοινής μεσοτοιχίας των WC, κοινές κατακόρυφες αποχετεύσεις ανά ζεύγος WC

μειονέκτημα : έκκεντρος προθάλαμος στα ΥΔ

απαιτήση : προσθήκη ηχομονωτικού φλοιού στη μεσοτοιχία των WC, ελαστικές συνδέσεις και αντικραδασμική προστασία

3η εκδοχή : συμμετρικό σχήμα κάτοψης, ασαφές περίγραμμα

πλεονέκτημα : δυνατότητα σχηματισμού κεντρικού προθαλάμου στα ΥΔ  
μειονέκτημα : αύξηση των πλευρικών μεταδόσεων,  
απαιτήση : προσθήκη ηχομονωτικού φλοιού σε κάθε μεσοτοιχία, ελαστικές συνδέσεις και αντικραδασμική προστασία

4η εκδοχή: παρεμβολή ενδιάμεσης ζώνης WC, ασαφές περίγραμμα,  
πλεονέκτημα : οριοθέτηση των οχληρών χρήσεων εκατέρωθεν της ζώνης των WC,  
κοινές κατακόρυφες αποχετεύσεις ανά ζεύγος WC

μειονέκτημα : δυσκολία στο σχηματισμό εσωτερικού προθαλάμου, αύξηση των πλευρικών μεταδόσεων

απαιτήση : προσθήκη ηχομονωτικού φλοιού στην περίμετρο της ζώνης και στην κοινή μεσοτοιχία των WC, ελαστικές συνδέσεις και αντικραδασμική προστασία.

## 2.2. Η ελάχιστη απαιτούμενη διατομή της κοινής μεσοτοιχίας δύο ΥΔ

Ο υπολογιστικός έλεγχος ακολούθησε τη μεθοδολογία DIN 4109 (πρότυπα ΕΛΟΤ) σύμφωνα με τα δεδομένα του Κτιριοδομικού Κανονισμού (άρθρο 12), για χώρους προσωρινής διαμονής (γραμμή 1), Α κατηγορίας ακουστικής άνεσης. [5]

Για την αξιολόγηση της κοινής μεσοτοιχίας ελήφθη η ευνοϊκή εκδοχή γειτνίασης χωρίς την παρεμβολή WC. Η στάθμη της εκτιμώμενης όχλησης προσδιορίστηκε συντηρητικά, ως περιβάλλουσα των οχλήσεων από εκπομπές μέσης έντασης (τηλεόραση, ραδιόφωνο ή συνομιλία) στα 3m (77 dB[A]). Η σφαιρική τιμή της επιθυμητής ησυχίας προσδιορίστηκε σε 30dB[A] (στήλη 5) ενώ οι συχνοτικές τιμές κατά το αντίστοιχο διεθνές κριτήριο θορύβου NC-20. [6], [7]

Ως αρχική οικοδομική εφαρμογή θεωρήθηκε μια τυπική διατομή δρομικής τοιχοποιίας, με αμφίπλευρη ασβεστοκονία (προσφ  $R_w = 43$  dB[A]), που συνυπολογίζοντας τις πλευρικές μεταδόσεις εμφανίζει έλλειμμα 3dB σε σφαιρικές τιμές (2 ως 10dB στις μέσες συχνότητες). Αποδεικνύεται δηλαδή πως η ρητή (αλλά ασαφής) πρόβλεψη του Κυπριακού Κανονισμού περί ξενοδοχείων για ελάχιστη διατομή 15cm στις κοινές μεσοτοιχίες των ΥΔ είναι σωστή.

Η υπολογιστική επίλυση των παραπάνω απαιτήσεων ικανοποιείται είτε οριακά με την προσθήκη αμφίπλευρης επένδυσης ηχοαπορροφητικού υλικού, είτε με μονόπλευρή επένδυση πετάσματος ξηράς δόμησης σε ελαστική σύνδεση (πλεόνασμα 6dB σε σφαιρικές τιμές, έλλειμμα 1dB στα 1000Hz).

## 2.3. Η απαίτηση κλειστού προθαλάμου μεταξύ ΥΔ και κοινόχρηστων διαδρόμων

Ο υπολογιστικός έλεγχος ακολούθησε την ίδια μεθοδολογία, για σύνθετη μεσοτοιχία (τοίχος με εσώθυρα), στην ευνοϊκή εκδοχή της διαμόρφωσης ΥΔ με κεντρικό εσωτερικό προθάλαμο.

Η σφαιρική και οι συχνοτικές τιμές της επιθυμητής ησυχίας προσδιορίστηκαν όπως παραπάνω (30 dB[A], NC-20). Η στάθμη της εκτιμώμενης όχλησης προσδιορίστηκε επίσης συντηρητικά ως περιβάλλουσα των οχλήσεων από λειτουργία ηλεκτρικής σκούπας, ομαλή κίνηση και ομιλία μέσης στάθμης στα 3m (76 dB[A]). [6], [7]

Ως αρχική οικοδομική εφαρμογή θεωρήθηκε η παραπάνω απλή δρομική τοιχοποιία και εσώθυρα με αεροστεγάνωση (διατομής 4,6cm) σε αναλογία 1 προς 5 (κινητό προς συνολικό πέτασμα), διάταξη που συνυπολογίζοντας τις πλευρικές μεταδόσεις εμφανίζει έλλειμμα 21dB σε σφαιρικές τιμές (10 ως 26dB στις μέσες συχνότητες).

Αποδεικνύεται λοιπόν πως είναι η ρητή (αν και εξίσου ασαφής) πρόβλεψη του Ελληνικού Κανονισμού περί ξενοδοχείων για προθάλαμο μεταξύ ΥΔ και κοινόχρηστων διαδρόμων είναι σωστή.

Η υπολογιστική επίλυση των παραπάνω απαιτήσεων ικανοποιείται (ελάχιστο πλεόνασμα 2dB στα 1000Hz) με τη πρόβλεψη κλειστού προθαλάμου μεταξύ ΥΔ και διαδρόμου κυκλοφορίας (σύνθετη μεσοτοιχία με την ίδια αναλογία), πρόσθετη ελαφρά εσώθυρα (χωρίς αεροστεγάνωση), και ηχοαπορροφητική ψ/οροφή στον ενδιάμεσο χώρο.

### **3. Αξιολόγηση ακουστικών ανέσεων στα ξενοδοχεία του δείγματος**

Για τις ανάγκες της έρευνας διαμορφώθηκε ένας συνοπτικός κατάλογος επτά (7) μεμονωμένων ή συνδυαστικών κριτηρίων αξιολόγησης της ακουστικής άνεσης :

- α) κατάλληλη χωροθέτηση οχληρών και κοινόχρηστων χώρων σε σχέση με τις πτέρυγες των ΥΔ,
- β) απομόνωση ΥΔ με το φρεάτιο του ανελκυστήρα
- γ) αντικραδασμική επίστρωση κοινόχρηστων διαδρόμων
- δ) ηχομόνωση κελύφους (αντικραδασμική προστασία δώματος, διπλά εξωτερικά κουφώματα)
- ε) κατάλληλη επένδυση εσωτερικών (κατακόρυφων / οριζόντιων) διαχωριστικών
- στ) κλειστός προθάλαμος (2 επάλληλες πόρτες) ΥΔ προς κοινόχρηστο διάδρομο
- ζ) κατάλληλη διαρρύθμιση ΥΔ με γειτονικό WC

Για την διερεύνηση της εφαρμογής των σχετικών οικοδομικών διατάξεων πραγματοποιήθηκαν επιτόπιες επισκέψεις και συνεντεύξεις (συμπλήρωση ενός αναλυτικού ερωτηματολογίου) με τους τεχνικούς υπεύθυνους των ξενοδοχειακών μονάδων του δείγματος σε Κύπρο και Ελλάδα Το συνολικό δείγμα περιλάμβανε τριάντα έξι (36) μονάδες (5, 4 και 3 αστέρων) :

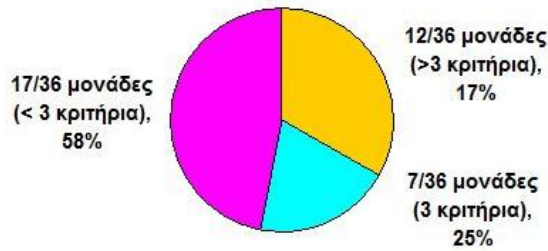
-12 στην Κύπρο (Λευκωσία - Αγία Νάπα - Λεμεσός, περίοδος καταγραφών 8/2011 – 12/2011) και

-24 στην Ελλάδα (Αττική – Χανιά - Ξάνθη, περίοδος καταγραφών 7/2012 – 12/2012). [8], [9]

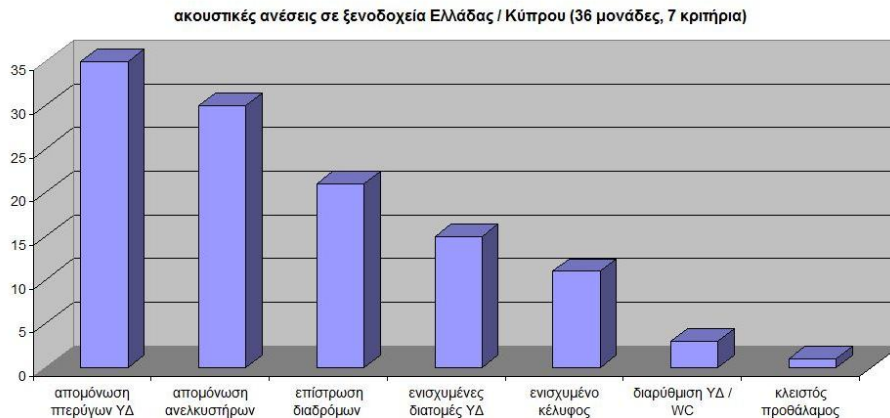
Τα αποτελέσματα της έρευνας εμφανίζονται στα σχήματα 3.1 - 3.2. Συνοπτικά, μόνο 12/36 μονάδες του δείγματος (ποσοστό 17% ) καλύπτουν πάνω από τα μισά κριτήρια της έρευνας. Αναλυτικά αξίζει να επισημάνουμε :

- στη συντριπτική πλειονότητα των μονάδων του δείγματος ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός έλαβε τα κατάλληλα μέτρα παθητικής ηχοπροστασίας (35/36 μονάδες διαθέτουν απομονωμένες πτέρυγες ΥΔ από οχληρούς χώρους και 30/36 μονάδες διαθέτουν απομόνωση των ΥΔ από το φρεάτιο των ανελκυστήρων),
- ικανοποιητικό ποσοστό (~58%) των μονάδων διαθέτει επίστρωση κάποιου είδους τάπητα (κοινού ή αντιθορυβικού) στους κοινόχρηστους διαδρόμους,
- μικρά ποσοστά δηλώνουν πως εφάρμοσαν ενισχυμένες ηχομονωτικές διατάξεις (30,5% στο κέλυφος και 41,5% στις εσωτερικές μεσοτοιχίες),
- ασήμαντα ποσοστά εφάρμοσαν ευνοϊκές διατάξεις στην εσωτερική διαρρύθμιση των ΥΔ (διατομή προς γειτονικό WC 8,5%, κλειστός προθάλαμος προς κοινόχρηστο διάδρομο 2,7%).

**κάλυψη κριτηρίων ακουστικής άνεσης  
(36 μονάδες, 7 κριτήρια)**



Σχήμα 3.2. Κριτήρια ακουστικής άνεσης στα ξενοδοχεία του δείγματος



Σχήμα 3.2. Ηχομονωτικές διατάξεις στα ξενοδοχεία του δείγματος

#### 4. Επίλογος

Η Ελλάδα βρίσκεται στην 10η θέση της ευρωπαϊκής κατάταξης, εμφανίζοντας αντιφατικές διακυμάνσεις, ακόμη και πριν την εκδήλωση της οικονομικής κρίσης :

- μείωση του ξενοδοχειακού δυναμικού το 2010 (για πρώτη φορά μετά το 1990),
- αλλαγή ιδιοκτησίας (που συνήθως συνοδεύεται από ανακαινίσεις - ανακατασκευές) ή και αλλαγή χρήσης σε κτίρια ξενοδοχειακών μονάδων (κυρίως στην Αθήνα),
- πτώση περίπου 15% (2013 σε σχέση με 2010) του κύκλου εργασιών στο τουρισμό, παρά την αύξηση των αφίξεων. [1]

Οι παραπάνω εξελίξεις θέτουν σε αμφισβήτηση τη δυνητική στάθμη του επιπέδου παροχής υπηρεσιών στην Ελλάδα και εγείρουν σοβαρά ερωτήματα

αναφορικά με τη δυνατότητα ανανέωσης του εγχώριου ξενοδοχειακού δυναμικού παράλληλα με την αναβάθμισή των προσφερόμενων ανέσεων. Η προϊστορία δεν εμπνέει αισιοδοξία για το μέλλον : ο κτιριακός σχεδιασμός με γνώμονα την αειφόρο ανάπτυξη και τις οικοδομικές ανέσεις δεν αποτέλεσε ποτέ το «δυνατό χαρτί» του εγχώριου κλάδου προσφοράς υπηρεσιών.

Η συλλογή και επεξεργασία ψηφιακών στοιχείων για τις διαφημιζόμενες παροχές στις ιστοσελίδες των 24 ελληνικών ξενοδοχείων του δείγματος, καθώς επίσης και η επεξεργασία αντίστοιχων σχολίων καταγεγραμμένων στον ιστότοπο [www.booking.com](http://www.booking.com) από τους πελάτες των συγκεκριμένων μονάδων δείχνει :

-2/24 μονάδες διαφημίζουν ηχομονωμένα ΥΔ

-5/24 μονάδες διαφημίζουν ηχομονωτικά παράθυρα

-78% των παραπόνων αφορούν την ηχοπροστασία του κελύφους,

-12% των παραπόνων αφορούν την έλλειψη ηχομόνωσης από γειτονικά ΥΔ

-8% των παραπόνων σχετίζονται με μειωμένη ηχοπροστασία από κοινόχρηστους και βοηθητικούς χώρους

-4 από τις 7 μονάδες του δείγματος οι οποίες διαφημίζουν ακουστικές ανέσεις έχουν καταγεγραμμένα σχετικά παράπονα για ελλείψεις.

Με τις παραπάνω διαπιστώσεις γίνεται φανερό πως η ακουστική άνεση δεν αποτελεί σοβαρό μέλημα των ξενοδοχειακών επιχειρήσεων στην Ελλάδα Αντίθετα τα δεδομένα του εξωτερικού εμφανίζουν αυξημένα μερίδια ενδιαφέροντος για το σύνολο των οικοδομικών ανέσεων, με κύρια αιχμή την ηχομόνωση. Τα συμπεράσματα της έρευνας θα πρέπει να προβληματίσουν τους εμπλεκόμενους, είτε σε περιπτώσεις μελλοντικών ανακαινίσεων είτε κατά την οικοδόμηση νέων κτιρίων. Παράλληλα θα μπορούσαν να εμπλουτίσουν τις προσπάθειες οικοδομικής αναβάθμισης του ελληνικού ξενοδοχειακού δυναμικού, ώστε να αντεπεξέλθει στον διεθνή ανταγωνισμό για τα μερίδια της ευρωπαϊκής τουριστικής αγοράς.

## 5. Αναφορές

- [1] Ινστιτούτο Τουριστικών Ερευνών και Προβλέψεων : « Εξελίξεις στον Ελληνικό Τουρισμό και στα Βασικά Μεγέθη της Ελληνικής Ξενοδοχίας το 2012» εφημερίδα ΤΟ, ΒΗΜΑ, 12/9/2013
- [2] Καρδούλας, Αλ. - Κόντος, Κ.: «Διερεύνηση Οικοδομικών Ανέσεων σε Ξενοδοχεία στο Παρίσι, στη Βαρκελώνη και στο Λονδίνο», Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική Έρευνα, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη 06-2014
- [3] Κυπριακός Οργανισμός Τουρισμού «Γενικός Κανονισμός περί ξενοδοχείων και καταλυμάτων», 1985 - 2005
- [4] Ελληνικός Οργανισμός Τουρισμού « Κατάταξη των κύριων ξενοδοχειακών καταλυμάτων σε κατηγορίες», ΦΕΚ Α43/7-3-2002
- [5] Ελληνικός Κτιριοδομικός Κανονισμός (άρθρο 12), ΦΕΚ Δ59/3-2-1989.
- [6] Αθανασόπουλος, Χ. «Προστασία κτιρίων», Αθήνα, 3η έκδοση 2005
- [7] Μπάρκας Ν. «τεύχος Ηχομόνωσης», πανεπιστημιακές σημειώσεις, ΕΑΔΠ ΔΠΘ, Ξάνθη 2005
- [8] Γιαννακού, Φ. - Παπακωνσταντίνου, Π.- Τσαρσιταλίδου, Μ.: «Διερεύνηση Οικοδομικών Ανέσεων σε Ξενοδοχεία της Κύπρου», Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική Έρευνα, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη 04-2012

- [9] Αθανασιάδη, Χ. - Μαραγδούλη, Α. - Τσιριντουλάκη, Ε. : «Διερεύνηση Οικοδομικών Ανέσεων σε Ξενοδοχεία», Εισαγωγή στην Αρχιτεκτονική Έρευνα, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη 04-2013



# ***Ακουστική άνεση σε ξενοδοχείο. Πρόβλεψη και σχεδιασμός ηχομονωτικών παραμέτρων σε ξύλινες κατασκευές.***

Γεώργιος Χατζηγεωργίου

Πολιτικός Μηχανικός, Σύμβουλος Ακουστικής, Καρόλου Ντηλ 6, Θεσσαλονίκη  
info@acoustical.com

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης αφορά την μελέτη ηχομόνωσης, ιστορικού διατηρητέου κτιρίου καπναποθήκης Δράμας και την μετατροπή του σε ξενοδοχείο πολυτελείας 5\*. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την πρόβλεψη ακουστικών παραμέτρων αερόφερτης και κτυπογεννούς ηχομόνωσης, με συγκεκριμένες αναφορές σε ξύλινες κατασκευές, μιας και το κτίριο ήταν κατασκευασμένο με ξύλινο φέροντα σκελετό. Στην εργασία θα γίνει εκτενή παρουσίαση, των προτεινόμενων κατασκευαστικών λύσεων σύμφωνα με την ακουστική μελέτη εφαρμογής. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, πρόβλεψης αερόφερτης και κτυπογεννούς ηχομόνωσης για όλα τα δομικά στοιχεία του κτιρίου σύμφωνα με το EN 12354-1 και EN 12354-2 ενώ ταυτόχρονα γίνεται και σύγκριση-ανάλυση σύμφωνα με τις ακουστικές απαιτήσεις και τις τιμές πρόβλεψης αυτών*

## ***Acoustic comfort in hotel. Prediction and design parameters on wooden structures***

### **ABSTRACT**

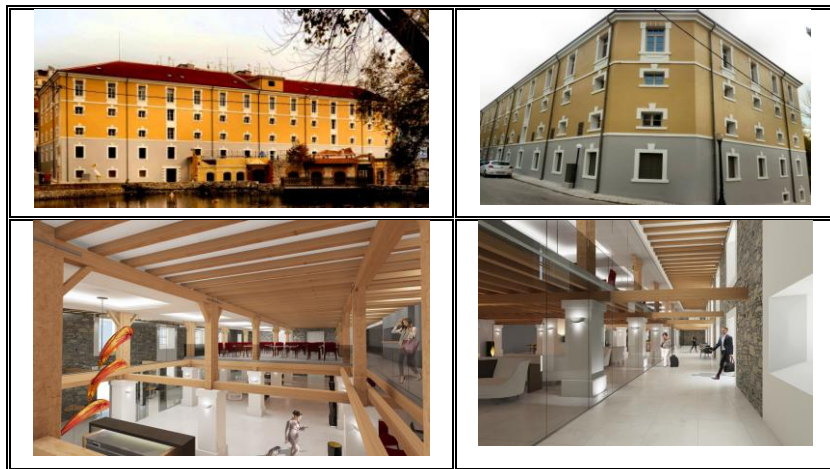
*The subject of the current design, concerns the sound insulation design of a historic Tobacco warehouse listed building in Drama that is renovated to a 5\* Hotel. The current study focuses on design and prediction of airborne and impact sound insulation parameters, with specific reviews on wooden structures, as the specific building was initially constructed on wooden frame. On this paper, there is a detailed analysis of the suggested construction solution, based on the acoustical study. There is a presentation of results, concerning the prediction parameters of airborne and impact sound insulation, for buildings structural elements, according to EN12345-1 and EN12345-2. Finally there is a comparison with the acoustical measurements and the initial design requirements.*

## 1. Εισαγωγή

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας αφορά την μελέτη ηχομόνωσης, ιστορικού διατηρητέου κτιρίου καπναποθήκης στη Δράμα και την μετατροπή του σε ξενοδοχείο πολυτελείας 5\*. Το συγκεκριμένο ακίνητο βρίσκεται υπό την διαχείριση της εταιρίας Εργοεπισκευές Α.Ε. Θεωρείται αξιόλογο αρχιτεκτονικό δημιούργημα του Αυστριακού αρχιτέκτονα Konrad von Vilas και αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα της αρχιτεκτονικής ειδικής χρήσης και λειτουργίας. Πρόκειται για ένα πολυώροφο κτίσμα με πέντε πατώματα, εμβαδού 7.500 τ.μ με ορθογώνια κάτοψη και αναλογίες πλευρών. Το εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου είναι κτισμένο από πέτρα, ενώ ο φέρωντας οργανισμός είναι ξύλινος, ο οποίος έπρεπε να διατηρηθεί ως έχει και ύστερα από απαίτηση της αρχαιολογίας και είναι και εμφανής. Το ισόγειο διαιρείται δια μέσου μιας εγκάρσιας τοιχοποιίας σε δυο τμήματα με ανεξάρτητες για το καθένα εισόδους. Στο πρώτο όροφο βρίσκεται το εστιατόριο και ο συνεδριακός χώρος του ξενοδοχείου ενώ στους υπόλοιπους πέντε ορόφους, το κτίριο διαθέτει 82 δωμάτια.

Απαίτηση του ιδιοκτήτη και διαχειριστή του ξενοδοχείου ήταν να υπάρχουν συνθήκες ακουστικής άνεσης, ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας για τους πελάτες.

Το ξενοδοχείο σχεδιάστηκε από το αρχιτεκτονικό γραφείο 3SK Στυλιανίδης Αρχιτέκτονες όπου δόθηκαν πρωτότυπες λύσεις αισθητικές και ιδιαίτερα λειτουργικές. Η ακουστική μελέτη και μελέτη μέτρων ηχοπροστασίας του κτιρίου έγινε από το συγγραφέα της παρούσας εργασίας.



## 2. Απαιτήσεις ηχομόνωσης και ηχοπροστασίας

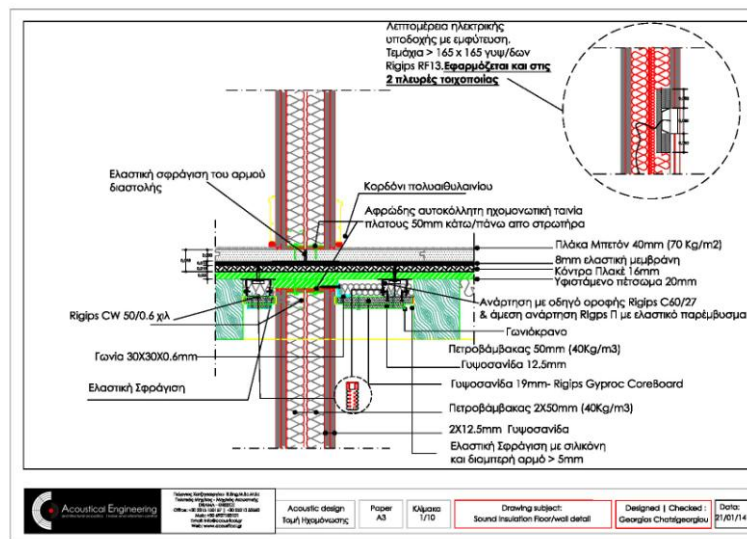
Οι ακουστικές απαιτήσεις για ξενοδοχεία περιγράφονται από τον Ελληνικό κτιριοδομικό κανονισμό και άλλους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς π.χ. το Γερμανικό DIN4109. Η τελική απόφαση ήταν να στηριχτεί ο σχεδιασμός σύμφωνα με την Γερμανική οδηγία του DIN4109.

Οι ακουστικές απαιτήσεις για την αερόφερτη και κτυπογεννή ηχομόνωση περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Χώρος εκπομπής/λήψης	Είδος θορύβου	Είδος χωρίσματος	Απαιτησ. R'w dB	Απαιτούμ. Ln'w dB	Υπολ/σμός
Ζεύγος Δωματ.	Αερόφερτος	Μεσοτοιχία	55	-	58
Ζεύγος Δωματ.	Κτυπογεννής	Πάτωμα	-	53	52
Ζεύγος Δωματ.	Αερόφερτος	Πάτωμα	54	-	51

### 2.1 Ηχομονωτική ικανότητα πατώματος μεταξύ ορόφων

Το μεγαλύτερο πρόβλημα κατασκευαστικής επίλυσης κατά την διάρκεια σχεδιασμού της ηχομόνωσης του κτιρίου, επικεντρώθηκε στο σχεδιασμό του ηχομονωτικού πατώματος μεταξύ ορόφων του κτιρίου. Όπως αναφέρθηκε αρχικά, ύστερα από απαίτηση της αρχαιολογίας, ο φέροντας ξύλινος σκελετός έπρεπε να διατηρηθεί στην αρχική του μορφή, ενώ απαγορεύτηκε οποιαδήποτε αλλοίωση. Το θέμα της στατικής επάρκειας του κτιρίου, ήταν σημαντικό για την τελική επιλογή των υλικών εφαρμογής σχεδιασμού ηχοπροστασίας. Έπρεπε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επηρεάσει αρνητικά τα νεκρά και ωφέλιμα φορτία σχεδιασμού. Συνολικά έγιναν 10 διαφορετικές προτάσεις σχεδιασμού που αντιστοιχούσαν σε κάθε όροφο του κτιρίου. Η βασική γεωμετρία του δαπέδου-οροφής, στηρίχτηκε αποκλειστικά σε πιστοποιημένο ηχομονωτικό σύστημα. Η εφαρμογή στηρίχτηκε σε παρόμοια γεωμετρία υλικών, ακουστικές ιδιότητες, τρόπος έδρασης πλωτού δαπέδου και ανάρτησης ψευδοροφής. Η τελική λύση δίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Κατασκευαστική λεπτομέρεια

Η πρόταση προέβλεπε την υποχρεωτική διατήρηση του υπάρχον πετώματος, ύστερα από απαίτηση της αρχαιολογίας ανωτέρων μνημείων. Το πρόβλημα που παρουσιαζόταν στην παρούσα φάση, ήταν η ταλάντωση του παλαιού πατώματος

στο κτίριο. Κατά την διάρκεια σχεδιασμού προτάθηκε η σφράγιση των αρμών του υφιστάμενου δαπέδου, η τοποθέτηση κόντρα πλακέ πάχους 16mm, το οποίο βιδώθηκε σταθερά, με αποτέλεσμα να δημιουργήσει ένα οριζόντιο δίσκο ακαμψίας σε όλο το επίπεδο του παλαιού δαπέδου και συνεπώς να αποσβέσει μεγάλο μέρος της ταλάντωσης. Στην συνέχεια τοποθετήθηκε αντικραδαστική μεμβράνη πάχους 8mm τύπου Isolgomma, δυναμικής ακαμψίας ( $S'=9\text{MNt/m}^3$ ), με πλάκα μπετό 40mm, οπλισμένο με οικοδομικό πλέγμα. Σε κάθε ζεύγος δωματίων κατασκευάστηκε ανεξάρτητο πλωτό δάπεδο, με διαμπερή κατασκευαστικό αρμό, σύμφωνα με τις υποδείξεις του DIN4109[1]. Η τελική επίστρωση του δαπέδου έγινε με μοκέτα σύμφωνα με τις προδιαγραφές τις αρχιτεκτονικής μελέτης.

## 2.2 Οροφή ηχομονωτικού δαπέδου

Η οροφή του ηχομονωτικού δαπέδου, ήταν μια πρόκληση ως προς τον σχεδιασμό και τους τελικούς δείκτες αερόφερτης και κτυπογεννής ηχομόνωσης. Όπως προαναφέρθηκε, ο ξύλινος φέροντας σκελετός έπρεπε να διατηρηθεί ως έχει, ύστερα από αυστηρή απαίτηση της αρχαιολογίας, ενώ ταυτόχρονα να παραμείνει εμφανής σύμφωνα με την πρόταση του αρχιτέκτονα. Ο εγκιβωτισμός οροφής ξηράς δόμησης με 2 γυψοσανίδες, ανάμεσα στα δοκάρια ήταν λύση αποδεκτή, βάση προδιαγραφών της μελέτης. Η πλήρωση το κενού έγινε με πετροβάμβακα πάχους 50mm, πυκνότητας  $50\text{Kg/m}^3$ .

## 2.3 Χωρίσματα δωματίων ξηράς δόμησης

Η επιλογή του ηχομονωτικού χωρίσματος για την ικανοποίηση των ακουστικών απαιτήσεων, έγινε βάση πιστοποιημένων εργαστηριακών μετρήσεων της εταιρίας ISOVER-Rigips. Η κατασκευή που επιλέχθηκε για να ικανοποιεί τις ακουστικές απαιτήσεις περιγράφεται ως εξής:

Γυψοσανίδες	2x12.5mm
Ορθοστάτης, ορυκτοβάμβακας 40mm   $40\text{Kg/m}^3$	50 mm
Ορθοστάτης, ορυκτοβάμβακας 40mm   $40\text{Kg/m}^3$	50 mm
Γυψοσανίδες	2x12.5mm

Τα δυο ανεξάρτητα κελύφη, εδράστηκαν στα ανεξάρτητα πλωτά δάπεδα των δωματίων, για αποφυγή πλευρικών μεταδόσεων. Οι στρωτήρες στα πλευρικά χωρίσματα και τις οροφές τους κτιρίου, απομονώθηκαν με αφρώδης ηχομονωτική ταινία.

Για τον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στην ηχομόνωση του χωρίσματος από ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις (πρίζες, διακόπτες κλπ.) χρησιμοποιήθηκε πιστοποιημένο ηχομονωτικό σύστημα κουτιού διακόπτου ενιαίου πλαισίου, χωνευτού τύπου της εταιρίας KAISER.

## 3. Πρόβλεψη αερόφερτης και κτυπογεννούς ηχομόνωσης

Η ηχομονωτική ικανότητα των δομικών στοιχείων στην συγκεκριμένη μελέτη (πάτωμα, μεσοτοιχία δωματίων) περιορίζεται από την πλευρική μετάδοση του ήχου. Ο φαινόμενος δείκτης ηχομείωσης  $R'_{w,R}$  (μεσοτοιχία και πάτωμα δωματίων)

καθώς επίσης και η σταθμισμένη κανονικοποιημένη ηχητική πίεση κτυπογενούς ήχου  $L'_{n,w,R}$  (πάτωμα) υπολογίζεται σύμφωνα με το EN 12354-1 και EN 12354-2

#### 4. Πιστοποίηση – αποτελέσματα μετρήσεων

Η ηχομονωτική ικανότητα του φαινομένου δείκτη ηχομείωσης  $R'_{w,B}$  (μεσοτοιχία και πάτωμα) μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο του ISO 140-4:1998 [2]. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

Ηχόμετρο: NTI-Audio XL2 Type 0 κατά IEC61672, IEC60651

Μικρόφωνο: NTI, MA220 1/2" ελευθέρου πεδίου. Nominal Open-circuit Sensitivity: -34 dBV/Pa  $\pm$ 3 dB(20 mV/Pa) @ 1kHz. Type 1 κατά IEC 61672-1.

Γεννήτρια θορύβου: NTI-Audio Minirator MR-PRO MR2

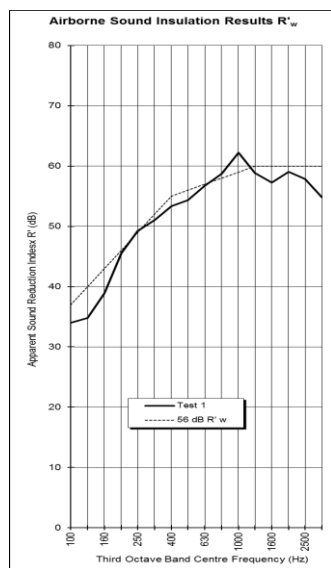
Βαθμονομητής: Bruel & Kjaer 4231, Class 1 σύμφωνα με IEC 60942(2003)

Ηχείο : JBL EON 315.

Κτυπογεννήτρια: Lookline EM 52

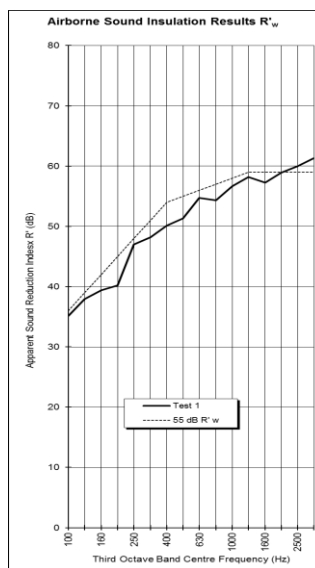
Χειριστής : Γεώργιος Χατζηγεωργίου

Τα αποτελέσματα και η στάθμιση των μετρήσεων έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 717-1:1996. [3] ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πιλοτικά δωμάτια.



$R'_{w,R} = 56$  dB

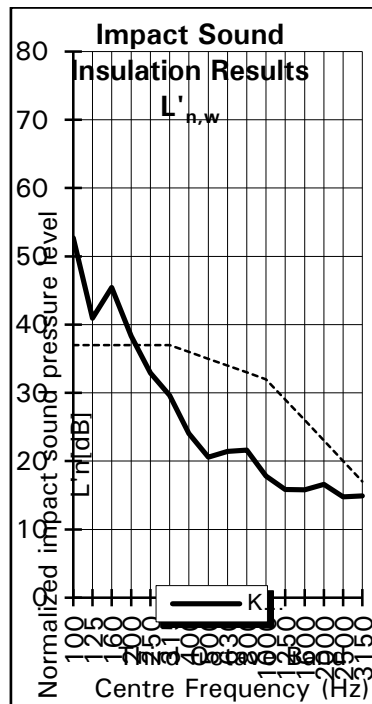
(μεσοτοιχία δωματίων)



$R'_{w,R} = 55$  dB

(πάτωμα δωματίων)

Ο ηχομονωτική ικανότητα σταθμισμένης κανονικοποιημένης ηχητικής πίεσης κτυπογενούς ήχου  $L'_{n,w,R}$  (πάτωμα) μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο του ISO 140-7:1998 [4], ενώ η στάθμιση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 717-2:1996 [5].



$L'_{n,w,B} = 35$  dB  
(πάτωμα δωματίων)

## 5. Αποτελέσματα

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ηχομονωτική ικανότητα χωρισμάτων ξηράς δόμησης καθώς επίσης και των ηχομονωτικών δαπέδων δίνονται στον πίνακα 5.1. Τα αποτελέσματα τηρούν πλήρως τις απαιτήσεις του DIN 4109 για συνθήκες ακουστικής άνεσης στο ξενοδοχείο.

Πίνακας 5.1

Χώρος εκπομπής/λήψης	Είδος χωρισματος	Απαιτούμ. R'w dB	Απαιτούμ. Ln'w dB	Υπολογισμός	Μέτρηση
Ζεύγος Δωματ.	Μεσοτοιχία	55	-	58	56
Ζεύγος Δωματ.	Πάτωμα	-	53	52	45
Ζεύγος Δωματ.	Πάτωμα	54	-	51	55

## 6. Συμπεράσματα

Η ηχομονωτική ικανότητα χωρισμάτων ξηράς δόμησης καθώς επίσης και ο σχεδιασμός σύνθετων ηχομονωτικών δαπέδων, σε ξύλινο σκελετό κτιρίου, αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερο για χώρους ξενοδοχείων.

Η επιλογή υλικών, καθώς επίσης και η πρόβλεψη ηχομονωτικών παραμέτρων, πρέπει να γίνεται αυστηρά πάνω στην φιλοσοφία πιστοποιημένων ηχομονωτικά κατασκευών.

Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνεται η κατάλληλη επιλογή των λεπτομερειών σε συνεργασία με τον αρχιτέκτονα και τον ακουστικό σύμβουλο. Στο συγκεκριμένο ξενοδοχείο έγιναν έγκυρα ακουστικές μετρήσεις σε πιλοτικά δωμάτια για την επιβεβαίωση της ηχομόνωσης των δομικών στοιχείων στις συνθήκες του έργου. Μόνο έτσι υπάρχει χρόνος για πιθανές προσαρμογές των λεπτομερειών στις ιδιαιτερότητες του έργου.

## **7. Αναφορές**

- [1] DIN 4109 «Sound Insulation in buildings; requirements and verifications», (1989)
- [2] ISO 140-4:1998 Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms
- [3] ISO 717-1:1996 Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound
- [4] ISO 140-7:1998 Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors
- [5] ISO 717-2:1996 Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation

## Μελέτη ακουστικής σε σχολικές αίθουσες

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου<sup>1,a</sup>, Γεώργιος Φύττας<sup>2,b</sup> & Φώτιος Κοντομίχως<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Πρότυπο Πειραματικό Γυμνάσιο, Πανεπιστημίου Πατρών

<sup>2</sup>Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο, Πανεπιστημίου Πατρών

<sup>3</sup>Τμ. Ηλ. Μηχ/κών & Τεχν. Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Πατρών

<sup>a</sup>[hagianto@sch.gr](mailto:hagianto@sch.gr), <sup>b</sup>[georgefyttas@gmail.com](mailto:georgefyttas@gmail.com), <sup>c</sup>[fkontom@gmail.com](mailto:fkontom@gmail.com)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Η παρούσα εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την παρουσίαση καινοτόμων εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων που υλοποιήθηκαν από ομάδες μαθητών δημοσίου ελληνικού σχολείου (Πρότυπο Πειραματικό Σχολείο Πανεπιστημίου Πατρών) με στόχο την ακουστική μελέτη αιθουσών διδασκαλίας. Οι μαθητές, χωρίς εξειδικευμένο υπόβαθρο γνώσεων στην εφαρμοσμένη ακουστική, καθοδηγήθηκαν από ειδικούς εκπαιδευτικούς του σχολείου και συνεργάστηκαν με έμπειρη ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου Πατρών (Ομάδα Ακουστικής & Τεχνολογίας Ήχου) στα πλαίσια ενός ειδικού εκπαιδευτικού προγράμματος που υλοποιήθηκε εκτός του τυπικού προγράμματος διδασκαλίας μαθημάτων του σχολείου.*

### *Acoustic studies in teaching rooms*

#### ABSTRACT

*This paper presents an innovative educational activity carried out by pupils in a Greek public High School (Model Experimental School of the University of Patras) in order to study the acoustics of their classrooms. The pupils, without a former background in applied acoustics, worked under the supervision of their, specialist in acoustics, teachers, together with an experienced research group of the University of Patras (Audio & Acoustics Technology group), within the framework of a special educational program implemented outside the formal curriculum of the school course.*

#### Εισαγωγή

Παρόλο που το αναλυτικό πρόγραμμα σπουδών του ελληνικού σχολείου [1] δεν δίνει την ευκαιρία για εμπλοκή μαθητών σε εφαρμογές της ακουστικής, αυτός ο στόχος μπορεί να επιτευχθεί μέσα από ειδικά εκπαιδευτικά προγράμματα



συνεργασίας με ερευνητικές ομάδες των Πανεπιστημίων και με τη δημιουργία εκπαιδευτικών θεματικών δικτύων Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης των Δ/νσεων Δ/θμιας Εκπ/σης. Σε αυτή την περίπτωση, επιδιώκεται η χρήση της ακουστικής επιστήμης σαν ένα δυναμικό διδακτικό εργαλείο των γνωστικών αντικειμένων των Φυσικών Επιστημών και των Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνίας.

Βασικός στόχος της εκπαιδευτικής δραστηριότητας που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, είναι η ουσιαστική εμπλοκή των μαθητών με τις θεωρητικές έννοιες της ακουστικής αλλά και με πρακτικές ακουστικού σχεδιασμού ενός κλειστού χώρου, κάνοντας χρήση των γνωστικών αντικειμένων που διδάσκονται στο σχολείο. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί σε πρώτη φάση τη θεωρητική προσέγγιση βασικών εννοιών της ακουστικής και του ακουστικού σχεδιασμού, οι οποίες συσχετίζονται με τις θεωρητικές έννοιες της διδασκόμενης ύλης του γνωστικού αντικείμενου της Φυσικής. Έπειτα, οι μαθητές καλούνται να εφαρμόσουν τεχνικές με σκοπό την βελτίωση της ακουστικής των αιθουσών του σχολείου τους.

## 1. Αφόρμηση

Οι μαθητές του ελληνικού σχολείου στα πλαίσια του αναλυτικού προγράμματος διδασκαλίας της Φυσικής, διδάσκονται τις βασικές έννοιες κυματικής και τα χαρακτηριστικά του ήχου στις Γ τάξεις του Γυμνασίου και του Λυκείου. Στην τελευταία, μάλιστα, οι συγκεκριμένες ενότητες συμπεριλαμβάνονται στην εξεταστέα ύλη των Πανελλαδικών εξετάσεων. Ωστόσο οι μαθητές δεν μπορούν εύκολα να σχετίσουν και να χρησιμοποιήσουν τις σχολικές γνώσεις για την επίλυση ανοικτών προβλημάτων που συναντούν στην καθημερινότητα. Η ύπαρξη μίας, αρκετά μεγάλης και ανεξάρτητης από το υπόλοιπο κτιριακό συγκρότημα αίθουσας εκδηλώσεων (Σχήμα 1.1), στο χώρο του Σχολείου μας (Π.Π.Σ.Π.Π.), έδωσε την αφορμή για το σχεδιασμό μίας εκπαιδευτικής δραστηριότητας με στόχο τη βελτίωση της ακουστικής της απόδοσης.



*Σχήμα 1.1. Η αίθουσα εκδηλώσεων του Πρότυπου Πειραματικού Λυκείου Πανεπιστημίου Πατρών*

## 2. Εξέλιξη

Η εκπαιδευτική δραστηριότητα [2],[3] αρχικά (σχ. έτος 2012-13) εντάχθηκε, τυπικά, στα πλαίσια ενός περιβαλλοντικού εκπαιδευτικού προγράμματος της Δ/σης Δ/θμιας Εκπ/σης Ν. Αχαΐας. Ο κύριος στόχος του προγράμματος ήταν να εξοικειωθούν οι μαθητές με βασικές έννοιες και παραμέτρους ακουστικής κλειστών χώρων.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, η υλοποίηση της δραστηριότητας βασίστηκε σε ομαδική εργασία των μαθητών, με επιστημονική μεθοδολογία, πειράματα και χρήση τεχνολογίας ειδικού λογισμικού που κατευθύνεται από δύο άξονες: το σχολικό περιβάλλον (εμπειρία και γνώσεις εκπαιδευτικών) και το Πανεπιστήμιο Πατρών και συγκεκριμένα την Ομάδα Ακουστικής & Τεχνολογίας Ήχου του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (με υπεύθυνο τον Καθ. Ι. Μουρτζόπουλο).



Σχήμα 2.1. Οι άξονες υλοποίησης της εκπαιδευτικής δραστηριότητας

Η συγκεκριμένη εκπαιδευτική δραστηριότητα [2],[3] παρουσιάστηκε σε ειδικές εκπαιδευτικές ημερίδες που οργάνωσε η Διεύθυνση Δευτεροβάθμιας Εκπ/σης (Δ.Δ.Ε.) Ν. Αχαΐας και κέντρισε το ενδιαφέρον πολλών εκπαιδευτικών διαφορετικών ειδικοτήτων (φυσικών, μαθηματικών, φιλολόγων, πληροφορικών). Διαπιστώθηκε, έτσι η ανάγκη διάχυσης γνώσης των βασικών εννοιών της ακουστικής αλλά κυρίως των εφαρμογών της στον ακουστικό σχεδιασμό χώρων. Για το λόγο αυτό κατά το σχολικό έτος 2013-2014 δημιουργήθηκε (15748/18-11-2013 της Δ.Δ.Ε. Ν. Αχαΐας) το Τοπικό Θεματικό Δίκτυο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Ν. Αχαΐας με τίτλο «Ακουστική και Ιστορική Ξενάγηση στα Αρχαία Θέατρα της Ν.Δ. Ελλάδας» (<http://netacoustics.sch.gr>).

Το δίκτυο αυτό συντονίζεται από φορείς της Δ.Δ.Ε. Ν. Αχαΐας σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Πατρών (ο Καθ. Ι. Μουρτζόπουλος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών είναι μέλος της συντονιστικής επιτροπής). Όπως αναφέρεται και στο έγγραφο ίδρυσης του δικτύου ο στόχος του είναι «να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο δραστηριοτήτων από σχολεία που να σχετίζεται με τη μελέτη αντιπροσωπευτικών χώρων, ακουστικού ενδιαφέροντος, της ελληνικής αρχαιότητας, όπως πχ., ανοικτά θέατρα, ρωμαϊκά ωδεία και κλειστοί ή ημίκλειστοι χώροι τελετών». Στα πλαίσια λειτουργίας του δικτύου την περασμένη σχολική χρονιά (2013-14) πραγματοποιήθηκαν σεμινάρια ακουστικής και τεχνολογίας ήχου, απευθυνόμενα σε εκπαιδευτικούς με στόχο τη διάχυση εξειδικευμένων γνώσεων και πρακτικών ακουστικής για τη μετέπειτα χρήση τους στην εκπαιδευτική διαδικασία των σχολείων (Γυμνασίων και Λυκείων) του Ν. Αχαΐας. Επίσης, ομάδες εκπαιδευτικών και ερευνητών του Πανεπιστημίου Πατρών παρήγαγαν εκπαιδευτικό υλικό (εκπαιδευτικά φύλλα εργασίας) που περιλαμβάνουν εργαστηριακές ασκήσεις,

οδηγίες, εκπαιδευτικά σενάρια και πρακτικές μετρήσεων που μπορούν να υλοποιηθούν από μαθητές με την καθοδήγηση των δασκάλων τους.

### 3. Ομάδες εργασίας μαθητών, πειράματα και αποτελέσματα

Μετά την θεωρητική μελέτη των βασικών εννοιών της ακουστικής χώρων, οι μαθητές κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν ένα ανοικτό πρόβλημα: *Τι μπορώ να κάνω για να βελτιώσω την ακουστική της αίθουσας εκδηλώσεων του σχολείου μου;* Οι απαντήσεις των μαθητών σε αυτό το πρόβλημα καθόρισαν τις δραστηριότητες που έγιναν στη συνέχεια με στόχο την μελέτη της ακουστικής των αιθουσών διδασκαλίας και εκδηλώσεων.

Μία ομάδα μαθητών ασχολήθηκε με τη μέτρηση των διαστάσεων του χώρου (εμβαδά επιφανειών, όγκος) και υπολόγισαν με πολύ καλή μαθηματική προσέγγιση τις διαστάσεις ιδιαίτερα απαιτητικών στοιχείων του χώρου (πχ. καμάρες). Επίσης ανέλαβε την οπτικοποίηση των χαρακτηριστικών της αίθουσας με γραφικές απεικονίσεις σχεδίων της κάτοψης, διαφόρων τομών του χώρου και σχεδίαση μακέτας. Τα αποτελέσματα που παρήγαγαν χρησιμοποιήθηκαν από ερευνητές του Πανεπιστημίου Πατρών για την ακουστική προσομοίωση της αίθουσας με κατάλληλο λογισμικό.

Άλλη ομάδα μαθητών ανέλαβε με την καθοδήγηση των εκπαιδευτικών να οργανώσουν και να υλοποιήσουν πειράματα που κρίθηκαν απαραίτητα για την ακουστική μελέτη της αίθουσας και τη βελτίωσή της. Τα πειράματα αυτά ήταν:

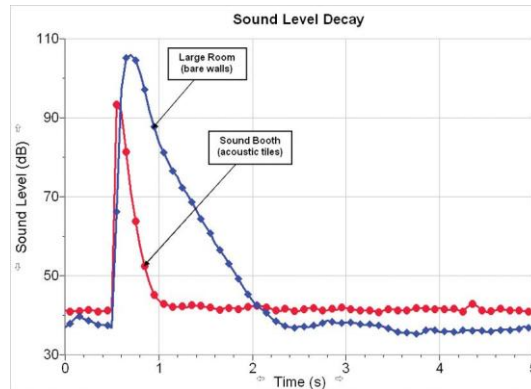
Η μέτρηση της ταχύτητας του ήχου (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου

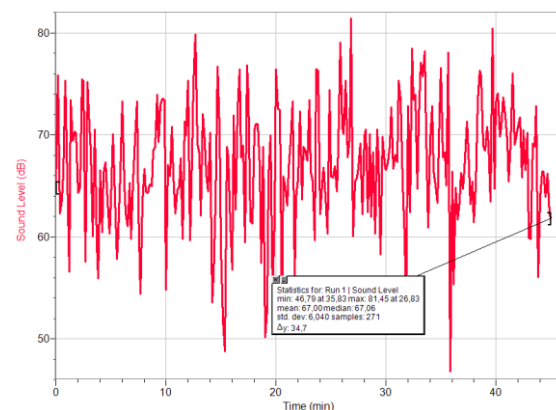
*Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης:* Για το πείραμα αυτό ακολουθήθηκε η παραγωγή ακαριαίου κρουστικού ήχου (πχ. με το σκάσιμο μπαλονιού) και καταγραφή της κυματομορφής διάδοσης του ήχου σε ένα σημείο του χώρου. Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης έγινε με δύο τρόπους: i) Ο κρουστικός παλμός ηχογραφήθηκε με το λογισμικό ανοικτού κώδικα audacity). Στη συνέχεια, από το ηχογραφημένο σήμα και με χρήση των δυνατοτήτων του λογισμικού απεικονίστηκε το διάγραμμα ενέργειας/χρόνο και προσεγγίστηκε η τιμή του χρόνου αντήχησης. ii) Χρησιμοποιήθηκε ηχώμετρο (sound level meter, εικόνα χ) το οποίο καταγράφει σε πραγματικό χρόνο την καμπύλη μείωσης της ηχητικής ενέργειας και υπολογίζεται κατόπιν ο χρόνος αντήχησης (Σχήμα 3.2). Και οι δύο τρόποι οδήγησαν σε παρόμοιες τιμές του χρόνου αντήχησης. Ενδεικτικά, σε όλες τις αίθουσες διδασκαλίας με ακροατήριο, καταγράφηκε χρόνος αντήχησης μικρότερος από 1 sec

(0.6-0.7sec), ενώ στην αίθουσα εκδηλώσεων, που είναι χωρίς ιδιαίτερη μέριμνα ακουστικού σχεδιασμού, ο χρόνος αντήχησης ξεπερνά τα 2 sec (περίπου 2,7 sec).



Σχήμα 3.2. Απεικόνιση καμπύλης μείωσης της ηχητικής ενέργειας από διάταξη ηχομέτρου-συστήματος καταγραφής

*Η μέτρηση του θορύβου:* Με τη χρήση του ηχομέτρου μετρήθηκαν οι στάθμες θορύβου σε διάφορες αίθουσες του σχολείου. Το συγκεκριμένο ηχομέτρο που χρησιμοποιήθηκε επιτρέπει την καταγραφή στάθμης θορύβου (dB-SPL) για διάρκεια που ορίζεται από το χρήστη και δειγματοληπτικά με βήμα χρόνου, πάλι οριζόμενου από το χρήστη. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται μία τέτοια καταγραφή για διάρκεια ίση με το χρόνο μίας διδακτικής ώρας (45 min) δειγματοληψία στάθμης ίση με 6 δείγματα/λεπτό. Ενδεικτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις φαίνονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 3.3. Απεικόνιση στιγμιαίων τιμών στάθμης θορύβου από διάταξη ηχομέτρου-συστήματος καταγραφής

Πίνακας 3 Μέσες τιμές θορύβου

	Αίθουσα διδασκαλίας		Προαύλιο
Δραστηριότητα	Διδασκαλία	Κενή	Διάλειμμα
Μέση στάθμη θορύβου (dB-SPL)	68	47	76

#### 4. Συμπεράσματα

Απλές ακουστικές μελέτες στο σχολικό περιβάλλον είναι δυνατό να υλοποιηθούν από εκπαιδευτικούς και μαθητές, παρόλο που το γνωστικό αντικείμενο της ακουστικής είναι σχεδόν ανύπαρκτο στο σύγχρονο Ελληνικό Σχολείο (Γυμνάσιο και Λύκειο). Η υλοποίηση τέτοιων μελετών μπορεί να γίνει μέσα από ειδικά εκπαιδευτικά προγράμματα που διευρύνουν το τυπικό αναλυτικό πρόγραμμα διδασκαλίας και μπορούν να επιβλέπονται και να συντονίζονται από ειδικούς φορείς των Διευθύνσεων Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης σε συνεργασία με ακαδημαϊκούς φορείς.

Η εργασία που παρουσιάστηκε εδώ, δεν έδωσε μεγάλη βαρύτητα στην παρουσίαση των διαδικασιών και αποτελεσμάτων μίας τεχνικής ακουστικής μελέτης σε σχολικές αίθουσες, αλλά στη χρήση μίας τέτοιας μελέτης ως παιδαγωγικό εργαλείο που καινοτομεί, καλώντας τους μαθητές να αντιμετωπίσουν ένα ανοικτό πρόβλημα εφαρμόζοντας θεωρητικές γνώσεις που αποκτούν στο σχολείο.

Η ακουστική μελέτη σε σχολικές αίθουσες, από την οπτική που εξετάζεται εδώ, έχει πολλές παραμέτρους και προσφέρεται για μακροχρόνια ενασχόληση με αυτό, τόσο των μαθητών όσο και των ενδιαφερόμενων εκπαιδευτικών. Μία τέτοια εκπαιδευτική δραστηριότητα μέσα στο σχολείο μπορεί να συμπεριλάβει δράσεις με σκοπό τη μετάδοση και ανταλλαγή τεχνογνωσίας, σχετικής με την ποιότητα ακρόασης, ανάμεσα σε μαθητές, εκπαιδευτικούς και ακαδημαϊκούς ερευνητές. Μπορεί επίσης να κατευθύνει τους μαθητές ώστε να λειτουργήσουν σαν «σύμβουλοι ακουστικής» και να μπορούν να περιγράφουν απλές διαδικασίες που σχετίζονται με τη μελέτη της ακουστικής χώρου ή να μεταδίδουν εμπειρίες ακρόασης με καλή ακουστική, ειδικά προς νέους ανθρώπους που έχουν συνηθίσει στην υποβαθμισμένη ποιότητα ακρόασης του mp3.

Το κυριότερο όφελος όμως θα είναι η απόκτηση, από τη σχολική ηλικία, ενός απαιτητικού αισθητικού κριτηρίου καλής ακρόασης που θα τους συνοδεύει στην υπόλοιπη ζωή τους.

#### 5. Αναφορές

- [1] Εφημερίδα της Κυβέρνησης: Αριθμός φύλλου 1401/2 Ιουνίου 2014, Ν. 4186/2013 (ΦΕΚ Α' 193)
- [2] Π.Δ. Χατζηαντωνίου «Μελέτη ακουστικής αποόδοσης σχολικής αίθουσας εκδηλώσεων: Μία καινοτόμος εκπαιδευτική δραστηριότητα». Στο: *Πρακτικά Ιου πανελληνίου συνεδρίου πρότυπων πειραματικών σχολείων α'θμιας και β'θμιας εκπαίδευσης: Ένας χρόνος μετά*, σσ. 313-319 (2014).

- [3] Γ. Φύττας, Π.Δ. Χατζηαντωνίου «Μία ακουστική μελέτη από μαθητές» Στο: *Πρακτικά 15ου Πανελληνίου Συνεδρίου Φυσικής της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών*, Ναύπλιο, (2014).

# ***Σύγκριση ακουστικών μετρήσεων μεταξύ πραγματικού χώρου και προσομοίωσης με το πρόγραμμα ODEON***

Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου<sup>1,2,a</sup>, Γεώργιος Πουλάκος<sup>1,b</sup>, Ιωάννης Καραγιάννης<sup>1,c</sup>  
& Ελένη Περδικάρη<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [gpoulako@central.ntua.gr](mailto:gpoulako@central.ntua.gr), <sup>c</sup> [mediumswing@hotmail.com](mailto:mediumswing@hotmail.com),

<sup>d</sup> [eleni\\_pers@hotmail.com](mailto:eleni_pers@hotmail.com)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία έχει ως αντικείμενό την αίθουσα τελετών "Λύσανδρος Κανταντζόγλου" της Σχολής Αρχιτεκτόνων, στο κτιρίου Αβέρωφ του Ε. Μ. Πολυτεχνείου. Η αίθουσα είναι ηλικίας άνω των 100-ετών και ως εκ του νεοκλασικού χαρακτήρα της παρουσιάζει προβλήματα στην ακουστική της, ακόμη και μετά την πρόσφατη ανακαίνιση της. Το παρόν άρθρο είναι μέρος της ευρύτερης μελέτης διόρθωσης της ακουστικής της αίθουσας. Βασικό εργαλείο στη μελέτη για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων της επέμβασης, και για την προσομοίωση, της αντίληψης του ήχου (auralisation) στην αίθουσα μετά την επέμβαση, είναι το 'Odeon room acoustics' πρόγραμμα για το οποίο σχολιάζεται η ικανότητα του ως προσομοιωτού, μέσα από σύγκριση ακουστικών μετρήσεων που έγιναν στην παρούσα φάση δηλαδή πριν την επέμβαση, αφ' ενός στην αίθουσα, και αφ' ετέρου στον οιωνό χώρο.*

## ***Comparison of room acoustic parameters between field measurements, and digital simulation through 'ODEON'***

### **ABSTRACT**

*This paper refers to the multipurpose auditorium "Lyssandros Kautantzoglou" of the School of Architecture, which is in the 'Averof' building of the Tech. Univ. Athens. The auditorium is over 100-years old, and acoustic problems are associated with the hall's neoclassical character, even after a recent restoration. This study is part of a research work which aims to remedy the acoustics of the auditorium. The basic tool, used in this*

*study for predicting as well as for simulating (auralising) the auditorium's response after treatment, is the 'Odeon room acoustics' software. 'Odeon' is tested in this study with respect to its capabilities as simulator; this is implemented through comparisons of acoustic measurements before treatment, which were carried out on the one hand in the field, and on the other hand in the virtual space.*

## **Εισαγωγή**

Η επιστήμη της ακουστικής ασχολείται με την πορεία των ηχητικών κυμάτων και την αλληλεπίδρασή τους μεταξύ των και με τα υλικά του χώρου μέσα στον οποίο κινούνται.

Μέχρι πρότινος ο μηχανικός μπορούσε να χρησιμοποιήσει μια πλειάδα μεθόδων πρόβλεψης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία [1] οι οποίες στηρίζονται σε αλγοριθμικές σχέσεις. Στη πράξη όμως συχνά, ότι οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα είναι μεγάλες.

Σήμερα, με την εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας, έχει γίνει δυνατή η προσομοίωση του πραγματικού χώρου με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο μας επιτρέπει ανέξοδα να κάνουμε ακουστικές μετρήσεις στον οιωινό χώρο. Στο εμπόριο υπάρχουν ήδη αρκετά προγράμματα που έχουν ως αντικείμενο τη προσομοίωση του πραγματικού χώρου σε ψηφιακό, για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ως προς την ακουστική του χώρου· ένα από αυτά είναι το 'Odeon Room Acoustics Program' με πολλαπλές δυνατότητες χρήσης.

Στη παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια σύγκρισης, μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξάγαμε μετά από φυσικές ακουστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην αίθουσα τελετών του κτιρίου Αβέρωφ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εξαγόμενων αποτελεσμάτων στον οιωινό χώρο μετά από προσομοίωση της ανωτέρω αίθουσας στο 'Odeon Room Acoustics Program'· σκοπός ήταν να αντιληφθούμε την ακρίβεια με την οποία είναι δυνατή αυτή η προσομοίωση.

### **1. Βιβλιογραφική αναδρομή**

Στις τελευταίες τρεις δεκαετίες υπήρξε μια αλματώδης εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών που είχε ως επακόλουθο η χρήση τους να επεκταθεί σε πολλές περισσότερες επιστήμες σε σχέση με τα πρώτα χρόνια ύπαρξής τους.

Μία από τις επιστήμες που επωφελήθηκε με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι και η επιστήμη της ακουστικής. Κατά τη διάρκεια των περασμένων δεκαετιών χρησιμοποιήθηκαν αρκετές τεχνικές με σκοπό την ακουστική προσομοίωση των χώρων.

Αρχικά, οι μελετητές της ακουστικής κατασκεύαζαν ένα πρόπλασμα του χώρου υπό κλίμακα. Αυτή η διαδικασία ήταν αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα σε σύγκριση με τα ψηφιακά προγράμματα. Βασίζοταν στην αντιστοίχιση υλικών με τις ιδιότητες των πραγματικών υλικών· παραδείγματος χάρη η ηχοαπορρόφηση στο υπό μελέτη φάσμα, αποδοσμένη στην κλίμακα του μοντέλου. Αυτή η διαδικασία δεν μπορούσε παρά να είναι μόνο προσέγγιση της πραγματικότητας, δηλ. σχετικά λιγότερο ακριβής από την ψηφιακή προσομοίωση που υλοποιείται σήμερα. Για την επιτυχή λειτουργία του



κατάλληλου μοντέλου, επίσης ήταν απαραίτητη η αυστηρή τήρηση ορισμένης σταθερής υγρασίας και θερμοκρασίας του χώρου [2]. Ένα ακόμα μειονέκτημα σε σύγκριση με την προσομοίωση του χώρου είναι ότι δεν προσέφερε την δυνατότητα επέμβασης στη γεωμετρία του χώρου και η αλλαγή των υλικών του ήταν πολύ δύσκολη. Μέχρι την δεκαετία '80 η επιστήμη της ακουστικής εξελίχθηκε με την κατασκευή των μοντέλων και η συνεισφορά αυτής της μεθόδου υπήρξε μεγάλη. Η εισαγωγή σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων στον τομέα του ακουστικού σχεδιασμού κλήθηκε να επιλύσει τα παραπάνω προβλήματα.

Το θέμα όμως της σύγκρισης ακουστικών παραμέτρων στον πραγματικό και στον οiwνί χώρο, είναι παρθένο ακόμα και για την επιστημονική βιβλιογραφία. Μία δημοσίευση των Hodgson et al (2008) [3] έχει ως αντικείμενο τη σύγκριση μετρήσεων στον πραγματικό και στον οiwνί χώρο. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται δύο όμοιοι πειραματικοί χώροι 480 m<sup>3</sup> ο καθένας με μόνη διαφορά ότι ο ένας είναι τελείως κενός από ηχοαπορροφητικά υλικά ενώ ο άλλος είναι επενδεδυμένος με ένα συγκεκριμένο και γνωστό στον μελετητή ηχοαπορροφητικό υλικό. Για κάθε έναν από τους δύο αυτούς πειραματικούς χώρους γίνονται μετρήσεις των ακουστικών παραμέτρων τόσο στον πραγματικό, με επί τόπου μετρήσεις, όσο και στον οiwνί χώρο, μέσω της προσομοίωσης τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο ότι η προσομοίωση με ηλεκτρονικό υπολογιστή δε δίνει ακριβή αποτελέσματα στη περίπτωση χαμηλού χρόνου αντήχησης ή υψηλού θορύβου βάθους.

Μία ακόμα δημοσίευση από τους Astolfi et al [4] (2008) παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων ακουστικών παραμέτρων σε οκτώ αίθουσες διδασκαλίας γυμνασίων, με και χωρίς παρουσία μαθητών, με σκοπό να παρουσιάσει ποιος τρόπος υπολογισμού προσεγγίζει την πραγματικότητα για κάθε μία από τις ακουστικές παραμέτρους με τις οποίες ασχολείται η δημοσίευση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στον πραγματικό χώρο ενώ οι προβλέψεις έγιναν με διάφορα προγράμματα προσομοίωσης όπως το Odeon Room Acoustics Program και με εμπειρικές αλγοριθμικές σχέσεις όπως ο τύπος του χρόνου αντήχησης κατά Sabine, κατά Eyring και κατά Hodgson. Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι σε περίπτωση αίθουσας άδειας από μαθητές τότε ο πραγματικός χρόνος αντήχησης που μετρήθηκε στην αίθουσα προσεγγίζεται καλύτερα μέσα από το πρόγραμμα του Odeon καθώς και από τον εμπειρικό τύπο του Sabine με αποκλίσεις της τάξης των 8,1% και 9,7% αντίστοιχα. Στην περίπτωση όμως γεμάτης αίθουσας από μαθητές τότε οι εμπειρικοί τύποι των Eyring, Sabine και Hodgson προσεγγίζουν καλύτερα τον πραγματικό χρόνο αντήχησης με αποκλίσεις από αυτόν της τάξης του 11,1%, 13,2% και 13,6% αντίστοιχα.

Η εργασία των Ν. Λεμπέση και Ι. Ταμβάκου [5] (2009) είχε ως αντικείμενο την σύγκριση μετρήσεων στον πραγματικό και στον οiwνί χώρο. Έγιναν φυσικές μετρήσεις σε έξι χώρους διδασκαλίας του Ε.Μ.Π. οι οποίες καλύπτan ένα φάσμα συνθηκών από πολύ ηχοαπορροφητικές έως καθόλου ηχοαπορροφητικές. Οι παράμετροι που αξιολογήθηκαν ήταν το RT, το EDT και το EEF<sub>50</sub>, δηλαδή παράμετροι που περιγράφουν με επάρκεια τη φυσική κατάσταση του ήχου για χώρους διδασκαλίας. Η σύγκριση μετρήσεων μεταξύ του πραγματικού και του οiwνί χώρου για κάθε μία από τις παραμέτρους, έδειξε ότι οι αποκλίσεις των μετρήσεων στη συντριπτική τους πλειοψηφία βρίσκονται κάτω από το ελάχιστο όριο που είναι υποκειμενικά αντιληπτό (difference limen).

Μία ακόμα δημοσίευση, είναι αυτή των Passero και Zannin (2010) [6] η οποία

αξιολογεί διάφορες διαδικασίες για τον καθορισμό του χρόνου αντήχησης, RT, σε μια τάξη. Αυτές οι διαδικασίες είναι οι εξής: (1) μέτρηση με τη μέθοδο κρουστικής απόκρισης (impulse response), (2) μέτρηση με διακοπτόμενο θόρυβο, (3) προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ODEON και (4) υπολογισμοί χρησιμοποιώντας τους τύπους Sabine, Eyring, και Arau-Puchades. Τα δεδομένα που προκύπτουν αναλύονται στατιστικά για να εξακριβωθεί η ομοιότητα τους. Όσον αφορά στην προσομοίωση σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το λογισμικό Odeon, δεν υπήρχε καμμία διαφορά μεταξύ αυτής της μεθόδου και των δύο μετρήσεων, όταν το RT αξιολογήθηκε στη συχνότητα των 500 Hz και στη μέση τιμή στις οκτάβες από 125 έως 4.000 Hz. Ωστόσο, όταν η μέση τιμή RT στις συχνότητες 500, 1000, και 2000 Hz αξιολογήθηκε, οι τιμές της προσομοίωσης διέφεραν από τις τιμές που μετρήθηκαν με τη μέθοδο διακοπτόμενου θορύβου.

Η έλλειψη μελετών στη βιβλιογραφία είναι ενδεικτική του ότι, η προσέγγιση του συγκεκριμένου ζητήματος δεν είχε μέχρι τώρα την ανάλογη προτεραιότητα την οποία όφειλε να έχει μιας και για τον πολιτικό μηχανικό παίζει μεγάλη σημασία η πιστότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του.

## **2. Μεθοδολογία μετρήσεων στον πραγματικό χώρο**

Οι φυσικές μετρήσεις έγιναν σε άδεια αίθουσα με εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας, της B&K. Χρησιμοποιήθηκε ισότροπη ηχητική πηγή (linear sweep με 6sec) και έγιναν μονοφωνικές εγγραφές απλής κυματομορφής (impulse) με συχνότητα 44,1kHz – 16bit σε 17 θέσεις της αίθουσας, με τη βοήθεια του προγράμματος DIRAC. Συγκριτική μελέτη των μετρήσεων με επιθυμητές τιμές, επιβεβαίωσε την ανάγκη για βελτίωση της προβληματικής ακουστικής της αίθουσας. Οι ακουστικές παράμετροι που μετρήθηκαν είναι: Χρόνος αντήχησης (RT), Χρόνος απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων (EDT), Κλάσμα των Πρώτων Ανακλάσεων (D-50), Λόγος των Πρώτων-προς-τις-Καθυστερημένες Ανακλάσεις (C-80) και Θόρυβος βάθους (SPL). Η διάταξη του συστήματος των μετρήσεων απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.

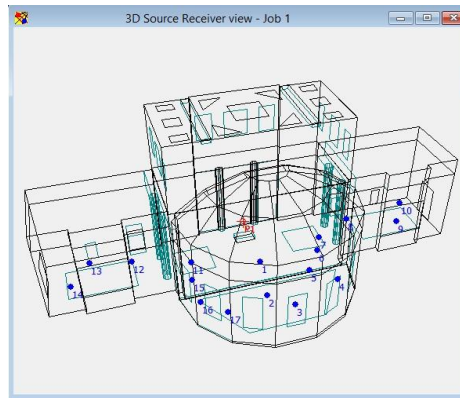
## **3. Μεθοδολογία προσομοίωσης της αίθουσας τελετών στο Odeon**

Το πρόγραμμα 'Odeon' βασίζεται σε αλγόριθμους πρόβλεψης (μέθοδος εικόνα-πηγή και ανίχνευσης ακτίνας) επιτρέποντας αξιόπιστες προβλέψεις σε μέτριους χρόνους υπολογισμού. Είναι ιδανικό για την πρόβλεψη της ακουστικής του χώρου σε μεγάλα και πολύπλοκα δωμάτια. Το σημείο εκκίνησης της προσομοίωσης στο 'Odeon' είναι ένα 3D μοντέλο του δωματίου για το οποίο η ακουστική θα πρέπει να προβλεφθεί.

Στη συγκεκριμένη εργασία με οδηγό τα CAD σχέδια δόθηκαν οι συντεταγμένες όλων των σημείων του χώρου που χρειάζονταν ώστε να προσομοιωθεί η υπάρχουσα γεωμετρία και να σχηματιστούν όλες οι επιφάνειες δηλαδή τα δάπεδα, οι τοίχοι, τα κουφώματα, οι πόρτες και οι οροφές. Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η εσωτερική σύνθεση της αίθουσας σε υλικά, και μετά υπολογίσθηκαν οι ακουστικές παράμετροι. Πέρα από τη σωστή γεωμετρική απεικόνιση, μεγάλη σημασία έχει και η όσο το δυνατόν πιο πιστή απόδοση των υλικών που υπάρχουν στο χώρο. Το 'Odeon'[7] διαθέτει μία βάση δεδομένων με υλικά του εμπορίου και με τις αντίστοιχες ηχοαπορροφητικές τους

ιδιότητες στις συχνότητες 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 και 8000Hz. Για ορισμένες επιφάνειες χρειάστηκε να καταχωρήσουμε οι ίδιοι κάποια νέα υλικά ώστε να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η σύνθεση του χώρου. Το γεωμετρικό αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 3.1. Τέλος, ορίστηκε η θέση ενός ομιλητή και ως ακροατές οι 17 θέσεις όμοιες με αυτές που έγιναν οι φυσικές μετρήσεις.

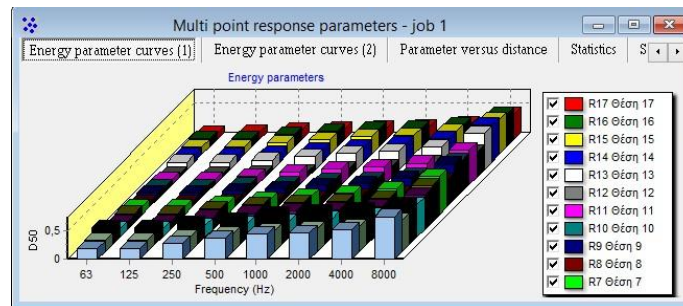
Σχήμα 3.1. Τριδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας της αίθουσας



#### 4. Αποτελέσματα μετρήσεων

Με την προσομοίωση του χώρου στο πρόγραμμα Odeon είχαμε αποτελέσματα για πολλές ακουστικές παραμέτρους. Για το παρόν άρθρο, λήφθηκαν υπόψιν οι παράμετροι που είχαν χρησιμοποιηθεί στις φυσικές μετρήσεις.

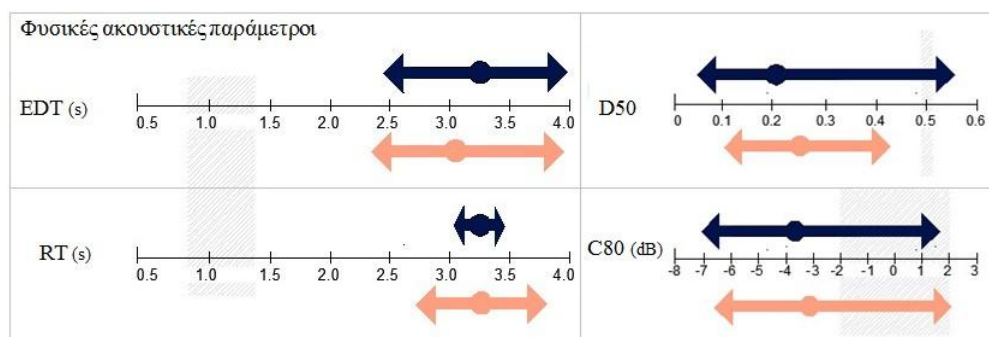
Σχήμα 4.1. Μετρήσεις του κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων (D-50) στις δεκαεπτά θέσεις μέτρησης της αίθουσας 'Καυταντζόγλου', στον οϊωνί χώρο



Έχοντας μετρήσει τις ακουστικές παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν σε αυτή την

εργασία τόσο στον πραγματικό όσο και στον οiwνί χώρο, δημιουργήθηκε το σχήμα 4.2 στο οποίο παρουσιάζεται το φάσμα διακύμανσης των φυσικών παραμέτρων για την αίθουσα.

Σχήμα 4.2. Μετρηθείσες τιμές στις μεσαίες συχνότητες για τις παραμέτρους: 1. Χρόνος αντήχησης  $RT$  ( $T30$ ), 2. Χρόνος απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων ( $EDT$ ), 3. Κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων  $D50$ , 4. Λόγος των πρώτων ανακλάσεων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις ( $C80$ ). Οι μετρήσεις έγιναν με ισότροπη πηγή στη θέση του ομιλητού. Δίδονται η μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Η περιοχή βέλτιστων τιμών σημειώνεται με γραμμοσκίαση· η παράμετρος  $C80$  δεν χρησιμοποιείται για αίθουσες ακρόασης ομιλίας. (με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι τιμές από τις πραγματικές μετρήσεις και με πορτοκαλί οι τιμές μετρήσεων στον οiwνί χώρο)



## 5. Ερμηνεία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Αναλύοντας τα αποτελέσματα καταλαβαίνουμε ότι οι αποκλίσεις των μετρήσεων στον οiwνί χώρο σε σύγκριση με τις φυσικές μετρήσεις είναι μικρές. Αυτές οι μικρές διαφορές μπορεί να είναι απόρροια ποικίλων παραγόντων.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την ακρίβεια των υπολογισμών της προσομοίωσης είναι η ακρίβεια των τιμών που αντιστοιχούν στους συντελεστές ηχοαπορρόφησης των υλικών στον υπό μελέτη χώρο. [4,7]. Είναι συνήθως αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί ακριβώς ο συντελεστής απορρόφησης των υλικών σε υφιστάμενα κτίρια. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία είναι τιμές που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του 'Odeon' και συνεπώς δεν λαμβάνουν υπόψη τη φθορά και τις ιδιαιτερότητες των υλικών στο χώρο. Σύμφωνα με τον Christensen [7], εκτός από τους συντελεστές απορρόφησης, η ασάφεια της σκέδασης που εισάγεται σε προσομοιώσεις υπολογιστών είναι επίσης μία πηγή σφάλματος.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι φυσικές μετρήσεις στην αίθουσα πραγματοποιήθηκαν ένα χρόνο πριν την προσομοίωση της στο ψηφιακό χώρο, ένας ακόμα πιθανός λόγος απόκλισης των αποτελεσμάτων είναι η πιθανή ανακατανομή κάποιων επίπλων στο χώρο

(όπως κάποιες καρέκλες ακροατηρίου, το πιάνο, η θέση ομιλητού) στην διάρκεια αυτού του χρόνου.

Ακόμα, οι μετρήσεις στον πραγματικό χώρο έχουν το χαρακτηριστικό ότι για κάθε θέση παίρνουμε τη μέση τιμή ενός μικρού αριθμού επαναλήψεων της μέτρησης: αυτό γίνεται για να εξισορροπήσουμε τις τυχαίες αποκλίσεις (random error). Αντίθετα, οι μετρήσεις στο ψηφιακό χώρο έχουν 100% επαναληψιμότητα και δεν περιέχουν σφάλμα. Κάνουμε την παραδοχή ότι αυτού του είδους το σφάλμα είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τη μεταβολή της μετρούμενης παραμέτρου μεταξύ θέσεων μέτρησης.

## 6. Συμπεράσματα

Η σύγκριση έδειξε ότι οι αποκλίσεις στη συντριπτική τους πλειοψηφία βρίσκονται κάτω από το ελάχιστο όριο που είναι υποκειμενικά αντιληπτό. Ανεξάρτητα από τις πηγές σφάλματος, τα ευρήματά μας στηρίζουν την άποψη ότι ο βαθμός προσέγγισης των συνθηκών του πραγματικού και του οιονί χώρου στη παρούσα εργασία υπήρξε καλός.

Επομένως, τα ευρήματα της εργασίας συνηγορούν ότι το πρόγραμμα 'Odeon' είναι δυνατόν να δώσει σχετικά αξιόπιστη πρόβλεψη της ακουστικής είτε ενός νέου χώρου, είτε μιάς ήδη κατασκευασμένης αίθουσας η οποία χρειάζεται διορθωτική επεμβαση.

## 7. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται προς την κοσμήτορα της Σχολής Αρχιτεκτόνων ΕΜΠ καθηγήτρια κ. Ελένη Μαϊστρου για την τιμή της ανάθεσης του ακουστικού σχεδιασμού της παρούσας αίθουσας, καθώς και προς τους καθηγητές ΕΜΠ κ. Σ. Ραυτόπουλο και Φ. Γουλιέλμο για την πολύτιμη συνεργασία των.

## 8. Αναφορές

- [1] Α. Σωτηροπούλου, *Εμβάθυνση στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης* Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείου Αθήνα (1996)
- [2] Barron M., «Subjective study of British symphony concert halls» *Acustica***66** pp1-14 (1988)
- [3] Hodgson M., York N., Yang W., «Comparison of predicted, measured and auralised sound fields with respect to speech intelligibility in classrooms using Catt-Acoustic and Odeon» *Acta Acustica United with Acustica***94** (2008)
- [4] Astolfi A., Corrado V. «Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms» *Applied Acoustics* 69 (2008)
- [5] Ν. Λεμπέσης, Ι. Ταμβάκος «Συγκριτική μελέτη μεταξύ μετρήσεων στον πραγματικό χώρο και στον οιονί χώρο, ακουστικών παραμέτρων αιθουσών διδασκαλίας» Διπλωματική εργασία, επιβλεψη: αν, καθ. Α. Σωτηροπούλου. Σχολή Πολ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα (2009)
- [6] Passero C.R.M., Zannin P.H.T. «Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods,

computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas» Appl. Acoust. (2010)

- [7] Christensen C.L. ODEON version 9.0 room acoustics program: version 9.0, industrial, auditorium and combined editions. Denmark: Technical University of Denmark; 2003.

## ***Ανασκόπηση σύγχρονων εξελίξεων στην ακουστική αιθουσών Jazz***

Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου<sup>1,a</sup>, Γιώργος Ξανθούλης<sup>2,b</sup>, Γιάννης Καραγιάννης<sup>1,c</sup> & Σάκης Τρισπιώτης<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [georgiosxanthoulis@gmail.com](mailto:georgiosxanthoulis@gmail.com), <sup>c</sup> [mediumswing@hotmail.com](mailto:mediumswing@hotmail.com), <sup>d</sup> [sakist87@hotmail.com](mailto:sakist87@hotmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η έρευνα σχετικά με την ακουστική αιθουσών Jazz μετράει μόλις μερικά χρόνια. Στη διάρκεια αυτών έχουν διερευνηθεί οι τρόποι με τους οποίους γίνεται αντιληπτή η ακουστική, αφενός από το ακροατήριο και αφετέρου από τους μουσικούς ερμηνευτές στη σκηνή. Τα μέχρι τώρα αποτελέσματα αν συνδυαστούν με φυσικές ακουστικές μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα ως προς τον σχεδιασμό τέτοιων αιθουσών.

### ***Review of contemporary research on the acoustics of Jazz music halls***

### **ABSTRACT**

Research results regarding the acoustics of Jazz music halls have been reported in relevant literature only recently. This research investigates the ways in which acoustics in Jazz clubs is perceived by the audience as well as by the musical performers on stage. Results from this sort of research need be combined with physical acoustic measurements in order to conclude to acoustic design principles and techniques.

### **Εισαγωγή**

Η Jazz είναι ένα μουσικό είδος που αναπτύχθηκε γύρω στις αρχές του 20ού αιώνα στις Αφροαμερικάνικες κοινότητες των νοτίων Πολιτειών της Αμερικής ως μια διασταύρωση των Αφρικανικών και Ευρωπαϊκών μουσικών παραδόσεων.

Οι αίθουσες συναυλιών Jazz, αρχικά, ήταν μετατροπές ήδη υπαρχόντων χώρων που προσαρμόστηκαν για αυτό το νέο είδος αποκλειστικά και μόνο με βάση τη διαίσθηση. Από τότε η Jazz, ο ήχος της οποίας είχε πάρει τη μορφή του μέσα σε αυτούς τους χώρους, έγινε δημοφιλής στις ΗΠΑ και σε πολλές άλλες χώρες, ενώ όλο και περισσότερο Jazz αίθουσες έκαναν την εμφάνισή τους ανά τον κόσμο. Προκειμένου αυτές οι αίθουσες να είναι «ακουστικώς αποτελεσματικές» χρειάζεται να υπακούουν σε σχετικές αρχές σχεδιασμού. Ενώ πολλή έρευνα αναφέρεται στο σχεδιασμό αιθουσών κλασικής μουσικής, οι ερευνητικές προσπάθειες σχετικά με τον σχεδιασμό αιθουσών Jazz είναι λιγοστές από όσο γνωρίζουν οι γράφοντες.

Η Jazz είναι ένα είδος μουσικής που διαφέρει από την κλασική, ως εκ τούτου, η ακουστική των αιθουσών Jazz θα πρέπει να προσεγγίζεται ξεχωριστά. Ενώ πολλά μουσικά όργανα που χρησιμοποιούνται σε Jazz σύνολα όπως το πιάνο, το κοντραμπάσο, η τρομπέτα κ.α. συναντώνται και στην κλασική συμφωνική ορχήστρα, ο ρόλος τους και κατ' επέκταση οι ακουστικές απαιτήσεις από αυτά είναι εντελώς διαφορετικές σε κάθε μουσικό είδος. Το κοντραμπάσο, για παράδειγμα, σε ένα Jazz σύνολο παίζει συχνά «pizzicato» και ο ρόλος του πέραν του ότι δίνει τη γραμμή του μπάσου είναι περισσότερο ρυθμικός, ενώ στο πλαίσιο της συμφωνικής ορχήστρας δεν λειτουργεί κατ' αυτόν τον τρόπο. Επιπλέον, ενώ η Jazz αρχικά βασιζόταν στον φυσικό ήχο, από το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα τα Jazz clubs υιοθέτησαν μια μίξη ακουστικού και ηλεκτρονικά υποστηριζόμενου ήχου, σε αντίθεση με τις αίθουσες συναυλιών κλασικής μουσικής οι οποίες σχεδιάζονται για να απολαμβάνει ο ακροατής τον φυσικό ήχο.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να κάνει μια ανασκόπηση των επιστημονικών εργασιών που έχουν δημοσιευθεί σχετικά με την ακουστική αιθουσών Jazz.

## **1. Ανασκόπηση προηγούμενων έρευνας**

Από τις πρώτες προσπάθειες σχετικά με τον σχεδιασμό Jazz αιθουσών είναι η εργασία των «Sound of Jazz» (SOJ) [1, 2]. Προκειμένου να σχεδιασθεί η αίθουσα «Jazz At Lincoln Center» (JALC) στην πόλη της Νέας Υόρκης, ειδικοί από τις εταιρείες Artec Consultants Inc. και Walters-Storyk Design Group σχημάτισαν μια ομάδα συμβούλων που σύντομα ονομάστηκε «Sound of Jazz» (SOJ). Αυτή η ομάδα ήταν η πρώτη που ασχολήθηκε με τις ιδιαιτερότητες του Jazz ήχου και των ακουστικών απαιτήσεων στις σχετικές αίθουσες, αλλά η εν λόγω εργασία ήταν εμπειρική και στόχευε στην κατασκευή της συγκεκριμένης αίθουσας (JALC).

Η μελέτη των Sotiropoulou et al [3] είναι ανάμεσα στις πρώτες που χρησιμοποίησαν μοντέρνες ψυχομετρικές μεθόδους για να αξιολογήσουν την ακουστική αιθουσών Jazz και η πρώτη η οποία προσδιόρισε ανεξάρτητες ποιότητες (subjective qualities) από τις οποίες αποτελείται η ακουστική τέτοιων αιθουσών. Σε εκείνη τη μελέτη, προκαταρκτικό πείραμα χρησιμοποιήθηκε για την σταχυολόγηση των επιθετικών προσδιορισμών που χρησιμοποιεί το μουσικόφιλο κοινό για να περιγράψει την άποψη του σχετικά με την ακουστική αιθουσών Jazz μουσικής. Τα ζεύγη επιθέτων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια στους πόλους διπολικών κλιμάκων αξιολόγησης της ακουστικής στο κυρίως πείραμα. Το κυρίως πείραμα έγινε μέσω ακρόασης ηχογραφημένης μουσικής με τη βοήθεια του διαδικτύου. Μουσικόφιλο κοινό του είδους απάντησε στις ερωτήσεις μετά από ακρόαση τριών γνωστών κομματιών Jazz που είχαν ηχογραφηθεί κατά τη διάρκεια ζωντανών συναυλιών στα Jazz clubs: Village Vanguard, Blue Note και Birdland στη Νέα Υόρκη. Οι αίθουσες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χωρητικότητας από 123 έως 220 άτομα, αντιπροσωπευτικής δηλαδή ενός τυπικού Jazz club. Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν σύμφωνα με την ανάλυση κατά παράγοντες (factor analysis) από την οποία προέκυψαν τέσσερις ανεξάρτητοι παράγοντες της αντίληψης της ακουστικής, ήτοι οι ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΦΗ (TONAL QUALITY), ΕΥΚΡΙΝΕΙΑ (CLARITY), ΔΥΝΑΜΙΚΟ (BODY) και ΕΓΓΥΤΗΤΑ (PROXIMITY). Τα αποτελέσματα εκείνης της εργασίας επιβεβαιώνουν ότι η ακουστική αιθουσών Jazz μουσικής όπως την αντιλαμβάνεται το μουσικόφιλο κοινό μέσα από ηχογραφημένο ήχο δεν είναι μονοδιάστατο μέγεθος αλλά οργανώνεται γύρω από ένα μικρό αριθμό ανεξαρτήτων παραγόντων. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει ευρήματα προγενεστέρων μελετών που αναφέρονται σε κλασικές αίθουσες συναυλιών.

Η επόμενη μελέτη της ίδιας ερευνητικής ομάδας (Sotiropoulou et al) [4, 5] περιέλαβε πειράματα της αντίληψης της ακουστικής κατά τη διάρκεια ζωντανών Jazz συναυλιών, με τη



χρήση μοντέρνων ψυχομετρικών μεθόδων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο Jazz clubs: το Half Note Jazz Club στην Αθήνα και το The Forge, μέρος του πολυχώρου Caponata στο Camden Town του Λονδίνου. Μουσικόφιλο κοινό του είδους αξιολόγησε την ακουστική· συγκεκριμένα 56 άτομα συμμετείχαν στην συναυλία στην Αθηναϊκή αίθουσα και 21 άτομα αξιολόγησαν την Λονδρέζικη συναυλία επί 17 διπολικών κλιμάκων (semantic rating scales). Οι τελευταίες είχαν προκύψει σε προγενέστερη μελέτη της ίδιας ομάδας [3] με βάση το ότι είχαν υψηλή φόρτιση σε κάθε ένα παράγοντα που προέκυψε σε εκείνο το πείραμα. Τα δεδομένα από αμφότερα τα πειράματα αναλύθηκαν μαζί σύμφωνα με την ανάλυση κατά παράγοντες απ' όπου προέκυψαν 3 ανεξάρτητοι παράγοντες, συγκεκριμένα οι ΕΥΚΡΙΝΕΙΑ (CLARITY), ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΦΗ (TONAL QUALITY) και ΕΓΓΥΤΗΤΑ (PROXIMITY). Ως προς τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων που προέκυψαν χωριστά για κάθε αίθουσα, παρατηρήθηκαν ομοιότητες μεταξύ των δύο αιθουσών, γεγονός το οποίο επιβεβαίωσε πως δύο διαφορετικές πολιτισμικές ομάδες Jazz ακροατηρίου δηλαδή η ομάδα της Αθήνας και η ομάδα του Λονδίνου αντιλαμβάνεται την ακουστική στα Jazz clubs με τον ίδιο τρόπο. Αυτό επιβεβαιώνει ότι ο ακουστικός σχεδιασμός τέτοιων αιθουσών μπορεί να βασίζεται σε κοινές ανά τον κόσμο αρχές σχεδιασμού. Επίσης τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας επιβεβαίωσαν ότι η ακουστική τόσο από ζωντανές όσο και από ηχογραφημένες Jazz συναυλίες έχει κοινούς τρόπους με τους οποίους γίνεται αντιληπτή. Αυτοί οι κοινοί τρόποι αντιστοιχούν και στην αντίληψη της ακουστικής τόσο από ζωντανή όσο και από ηχογραφημένη κλασική συμφωνική μουσική [4, 5]. Για κάθε έναν από τους τρεις παράγοντες της αντίληψης που προσδιορίστηκαν σε εκείνη τη μελέτη εφαρμόστηκε το τεστ της ανάλυσης της διακύμανσης. Το τεστ αυτό έδειξε ότι δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην αντίληψη της ακουστικής μεταξύ των δύο αιθουσών.

Περαιτέρω, οι Sotiropoulou et al [4, 5] διεξήγαγαν φυσικές ακουστικές μετρήσεις στις δύο αίθουσες, χωρίς ακροατήριο, όπου μετρήθηκαν ο χρόνος αντήχησης (RT), ο χρόνος απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων (EDT), ο λόγος των πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις (80msE-to-L) και το κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων (50msEEF) από 125 Hz έως 4000 Hz. Τα αποτελέσματα για τις μεσαίες συχνότητες έχουν αναπαραχθεί στον συνημμένο πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Ακουστικές μετρήσεις στις μεσαίες συχνότητες, των Sotiropoulou et al [4]

<b>ΑΙΘΟΥΣΑ</b>	<b>RT [s]</b>	<b>EDT [s]</b>	<b>C80 [dB]</b>	<b>D50</b>
HALF NOTE	0,69	0,7	7,49	0,61
THE FORGE	1,13	1,21	2,65	0,49

Πρόσφατη εργασία των Ξανθούλη et al [6] στοχεύει στη διερεύνηση της ακουστικής στη θέση της σκηνής δηλαδή όπως την αντιλαμβάνεται ο μουσικός ερμηνευτής. Η εργασία περιέλαβε πειράματα της αντίληψης της ακουστικής κατά τη διάρκεια ζωντανών συναυλιών σε 6 αίθουσες της Αθήνας, δηλαδή στην Αίθουσα Μητρόπουλος και στην Αίθουσα Banquet του Μεγάρου Μουσικής Αθηνών, στο The Party Bar, στο Jazzpoint, στο Χίλιες-και-Δύο-Νύχτες και στο Κεραμείο, όπου απάντησαν αντίστοιχα οι μουσικοί ερμηνευτές της βραδιάς. Οι παράγοντες οι οποίοι εξήχθησαν από την ανάλυση ήταν οι: ΑΝΤΗΧΗΣΗ (RESONANCE), ΔΥΝΑΜΙΚΟ (BODY) και ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΦΗ (TONAL QUALITY). Σε κάθε έναν παράγοντα, μέσω ανάλυσης της διακύμανσης, δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των αιθουσών που εξετάστηκαν.

Ο κοινός παράγοντας μεταξύ και των τριών ανωτέρω εργασιών [3, 4, 5, 6] σχετικά με την αντίληψη της ακουστικής, είναι η ΧΡΩΜΑΤΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΦΗ (TONAL QUALITY). Περαιτέρω μεταξύ του πειράματος όπου έγινε χρήση ηχογραφημένης μουσικής και αυτού όπου διερευνάται η αντίληψη των μουσικών υπάρχει ένας επιπλέον κοινός παράγων: το ΔΥΝΑΜΙΚΟ (BODY). Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράγοντες όπως εξήχθησαν σε κάθε εργασία:

*Πίνακας 1.2 Παράγοντες της αντίληψης της ακουστικής Jazz μουσικής:*

ΕΡΓΑΣΙΑ	Παράγοντες				
	TONAL QUALITY	CLARITY	BODY	PROXIMITY	RESONANCE
Sotiropoulou et al [3] <i>Αντίληψη ακροατηρίου με χρήση ηχογραφημένης μουσικής</i>	✓	✓	✓	✓	
Sotiropoulou et al [4, 6] <i>Αντίληψη ακροατηρίου σε ζωντανές συναυλίες</i>	✓	✓		✓	
Ξανθούλης και Τρισιπώτης [5] <i>Αντίληψη μουσικών ερμηνευτών στη σκηνή, σε ζωντανές συναυλίες</i>	✓		✓		✓

Στους πίνακες 1.3, 1.4, 1.5 παρατίθενται οι παράγοντες που εξήχθησαν σε κάθε εργασία, οι διπολικές κλίμακες με τις φορτίσεις τους, και η μεταβλητότητες που αντιστοιχούν σε κάθε παράγοντα:

Πίνακας 1.3 Οι παράγοντες στην αντίληψη ακροατηρίου με χρήση ηχογραφημένης μουσικής [3]

Κλίμακες	Ανεξάρτητοι Παράγοντες			
	TONAL QUALITY	CLARITY	BODY	PROXIMITY
Smooth_Rough	,86			
Smooth_Harsh	,86			
Gentle_Harsh	,85			
Harsh_Velvety	-,82			
Smooth_Sharp	,80			
Even_Uneven	,77			
Edgy_Smooth	-,68			
Clear_Noisy	,67			
Balanced_Unbalanced	,67			
Preferred_Non preferred	,56			
Loud_Silent	-,52			
Light_Heavy	,46			
Faint_Strong	,43			
In tune_Out of tune	,35			
Clear_Dull		,78		
Brilliant_Dim		,76		
Crystal_Muddy		,75		
Clear_Blurred		,74		
Colored_Dark		,70		
Dark_Brilliant		-,62		
Clear_Hazy		,61		
Broad_Narrow		,57		
Dark_Transparent		-,42		
Cool_Warm		,40		
Dark_Bright		-,39		
Poor_Rich			-,80	
Live_Dead			,72	
Fullbodied_Thin			,66	
Faint_Strong			-,57	
Woody_Metallic			,57	
Loud_Silent			,56	
Dark_Bright			-,54	
Broad_Narrow			,40	
Near_Remote				,85
Near_Distant				,81
Close_Distant				,79
%μεταβλητότητα	21,00	15,60	11,10	9,60
αθροιστική % μεταβλητότητα	21,00	36,60	47,70	57,30

Πίνακας 1.4 Οι παράγοντες στην αντίληψη ακροατηρίου σε ζωντανές συναυλίες [4, 5]

Κλίμακες	Ανεξάρτητοι Παράγοντες		
	CLARITY	TONAL QUALITY	PROXIMITY
<i>Dark_Bright</i>	-,80		
<i>Clear_Dull</i>	,78		
<i>Clear_Blurred</i>	,78		
<i>Colored_Dark</i>	,78		
<i>Preferred_Non Preferred</i>	,74		
<i>Clear_Noisy</i>	,70		
<i>Full Bodied_Thin</i>	,65		
<i>Smooth_Harsh</i>		0.850	
<i>Gentle_Harsh</i>		0.830	
<i>Harsh_Velvety</i>		-,83	
<i>Smooth_Sharp</i>		,73	
<i>Smooth_Rough</i>		,71	
<i>Cool_Warm</i>		-,52	
<i>Near_Distant</i>			,84
<i>Near_Remote)</i>			,83
<i>Live_Dead</i>			,83
<i>Brilliant_Dim</i>			,67
%μεταβλητότητα	35,50	17,10	8,50
αθροιστική % μεταβλητότητα	35,50	52,60	61.1

Πίνακας 1.5 Οι παράγοντες στην αντίληψη των μουσικών ερμηνευτών, στη σκηνή, σε ζωντανές συναυλίες [6]

Κλίμακες	Ανεξάρτητοι Παράγοντες		
	RESONANCE	BODY	TONAL QUALITY
Noisy_Clear	,831		
Balanced_Unbalanced	-,715		
Reverberant_NonReverberant	,700		
Harsh_Velvety	,651		
Rough_Smooth	,633		
Dead_Resonant	-,622		
Cold_Warm	,572		
Loud_Silent	,561		
Live_Dead		,793	
Dark_Brilliant		-,777	
Bright_Dark		,733	
Dark_Transparent		-,724	
Preffered_NonPreffered		,657	
FullBodied_Thin		,613	
Clear_Blurred		,593	
Brilliant_Dim		,576	
Smooth_Harsh			,733
Broad_Narrow			,715
Smooth_Sharp			,692
Crystal_Muddy			,632
Woody_Metallic			,570
Clear_Dull			,495
%μεταβλητότητα	22,156	19,934	16,012
αθροιστική % μεταβλητότητα	22,156	42,090	58,102

## 2. Συμπεράσματα

Η παραπάνω ανασκόπηση παρουσιάζει ότι έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία μερικοί από τους τρόπους με τους οποίους γίνεται αντιληπτή η ακουστική Jazz αιθουσών αφενός από το ακροατήριο και αφετέρου από τους μουσικούς ερμηνευτές στη σκηνή. Αυτοί οι τρόποι έχουν ομοιότητες μεταξύ των δύο ομάδων αξιολογητών αλλά και διαφορές. Περαιτέρω διερεύνηση των φυσικών ακουστικών χαρακτηριστικών αιθουσών αυτού του είδους, σε σχέση με την αντίληψη της ακουστικής, είναι απαραίτητη προκειμένου να οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με αρχές και τεχνικές σχεδιασμού Jazz αιθουσών.

## 3. Αναφορές

- [1] W. Marsalis and H.F. Fierce, 'The "Sound of Jazz" team, Realizing the Jazz at Lincoln Center Vision for Frederick P. Rose Hall', Report [www.jazzatlincolncenter.org](http://www.jazzatlincolncenter.org) (2004).
- [2] R. D. Read, 'Jazz finds a new home', *Sound & Communications* 50(9) 36-49, 106-107 (2004).

- [3] A. G. Sotiropoulou, G. Poulakos, J. Karayannis, J. Tzouvadakis ‘Subjective evaluation of the acoustics of Jazz auditoria; Multi-dimensional description of evaluations’, International Conference on Auditorium Acoustics, Oslo (2008)
- [4] A. G. Sotiropoulou, A. Savvopoulou, G. Karagiannis, G. Tzouvadakis, “Subjective Evaluation of Acoustics in Jazz Clubs”, Acoustics Bulletin, Vol. 36, No 5, pp. 24-31
- [5] Α. Σωτηροπούλου, Α. Σαββοπούλου, Ι. Καραγιάννης, Α. Στάμος “Πειραματική διερεύνηση της αντίληψης της ακουστικής σε αίθουσες μουσικής Jazz (Jazz Clubs). Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2010, Αθήνα. pp. 87-103
- [6] Γ. Ξανθούλης, Α. Γ. Σωτηροπούλου, Σάκης Τρισπιώτης “Υποκειμενική αξιολόγηση της Ακουστικής Jazz αιθουσών στην περιοχή της σκηνής”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2014)

## ***Ακουστικές μετρήσεις σε αίθουσες rock μουσικής στην Αθήνα***

A. Σωτηροπούλου<sup>1,2,a</sup>, I. Τζουβαδάκης<sup>2,b</sup>, I. Καραγιάννης<sup>1,c</sup>, A. Πάνος<sup>3,d</sup>,  
Π. Ρεμπής<sup>3,e</sup> & Σ. Τσούκα<sup>3,f</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>3</sup> Διπλ.Πολ.Μηχ. Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [itzouvad@otenet.gr](mailto:itzouvad@otenet.gr), <sup>c</sup> [mediumswing@hotmail.com](mailto:mediumswing@hotmail.com), <sup>d</sup> [adonispanos@gmail.com](mailto:adonispanos@gmail.com),  
<sup>e</sup> [pavlossubbs@hotmail.com](mailto:pavlossubbs@hotmail.com), <sup>f</sup> [matinatsouka@gmail.com](mailto:matinatsouka@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Φυσικές ακουστικές μετρήσεις σε τέσσερις σχετικά μικρές αίθουσες rock μουσικής έλαβαν χώρα στην Αθήνα. Σύγκριση των αποτελεσμάτων με επιθυμητές τιμές από τη βιβλιογραφία έδειξαν ότι οι παρούσες αίθουσες διαθέτουν καλή ακουστική, κυρίως λόγω του σχετικά μικρού μεγέθους αυτών. Επιπλέον, τα δεδομένα των αιθουσών της παρούσας μελέτης εμπίπτουν στην αυτή τάξη μεγέθους με αντίστοιχα δεδομένα καλών ευρωπαϊκών αιθουσών για rock συναυλίες. Περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη για να συσχετίσει τις φυσικές παραμέτρους με την αντίληψη της ακουστικής σε rock αίθουσες.

### ***Acoustic measurements in rock music auditoria in Athens***

### **ABSTRACT**

Physical acoustic measurements were carried out in Athens in four rock concert halls: the latter were of relatively small size. Comparison of present results with optimal values demonstrated that the present rock concert halls have good acoustics, mainly owing to their relatively small size. Furthermore, comparison with European rock auditoria of good acoustics confirmed that the present auditoria have good acoustics. Further research is necessary to identify subjectively significant physical room acoustic criteria.

### **Εισαγωγή**

Η έρευνα για την ακουστική αιθουσών rock μουσικής είναι περιορισμένη και η υπάρχουσα βιβλιογραφία αναφέρεται κυρίως σε αίθουσες ακρόασης κλασσικής μουσικής. Η rock μουσική είναι ευρύτατα διαδεδομένη και σε όλο τον κόσμο γίνονται συναυλίες rock οι οποίες ίσως ξεπερνούν σε αριθμό τις αντίστοιχες κλασσικής μουσικής. Χωρίς ακουστική μελέτη, οι αίθουσες που επιλέγονται για rock συναυλίες δεν προσφέρουν απαραίτητα την αρτιότερη ποιότητα στους ακροατές.

Πρόσφατες και ολιγάριθμες μόνο έρευνες αναφέρονται στη διερεύνηση της ακουστικής τέτοιων αιθουσών. Η εργασία είναι μέρος ευρύτερης μελέτης στο ΕΜΠ με στόχο τον προσδιορισμό φυσικών ακουστικών κριτηρίων υποκειμενικώς σημαντικών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται φυσικές ακουστικές μετρήσεις από την ως άνω μελέτη.

## 1. Βιβλιογραφική αναδρομή

Η πλειονότητα της βιβλιογραφίας αναφέρεται σε αίθουσες κλασσικής μουσικής και δεν είναι ακόμα γνωστός ο τρόπος ακουστικού σχεδιασμού αιθουσών rock μουσικής. Σημαντική συνεισφορά στην έρευνα για την ακουστική αιθουσών rock μουσικής έχει γίνει μόλις την τελευταία δεκαετία κυρίως από τους Larsen et al [1-9]. Στις μελέτες εκείνες προτείνεται μια νέα παράμετρος, το κλάσμα του χρόνου αντήχησης ( $BR_{mod}$ ), και δίνονται βέλτιστες τιμές για αυτή την παράμετρο και για τον χρόνο αντήχησης (RT)[2]. Βεβαίως, η διερεύνηση περαιτέρω βέλτιστων τιμών άλλων φυσικών ακουστικών παραμέτρων και η ανάδειξη φυσικών παραμέτρων υποκειμενικώς σημαντικών απομένουν να ερευνηθούν.

## 2. Σχεδιασμός του πειράματος και μεθοδολογία

Τα φυσικά ακουστικά κριτήρια που μετρήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 2.1. Εξ αυτών ο κλασσικός χρόνος αντήχησης (reverberation time) και ο χρόνος απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων (early decay time) αναγνωρίζονται ως αντιπροσωπευτικές παράμετροι της ακουστικής χώρων ακροατηρίου. Το κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων (50ms early energy fraction) έχει προταθεί από τον Thiele [10] για την αποτίμηση της ευκρίνειας της ομιλίας και χρησιμοποιείται πιλοτικά στην παρούσα μελέτη. Ο λόγος των πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις (early to late sound index) προτάθηκε από τους Reichardt et al [11] για να εκφράσει τη διαύγεια του ήχου κλασσικού ρεπερτορίου. Από γεωμετρικές παραμέτρους, επιλέγεται η απόσταση ορχήστρας – ακροατών.

Πίνακας 2.1 Φυσικές παράμετροι

Φυσική Παράμετρος	Συμβολισμός	Φάσμα Συχνοτήτων			Μονάδες Μέτρησης
		Χαμηλές	Μεσαίες	Υψηλές	
		<b>80ms Early-to-Late Sound index</b>	80C <sub>l</sub>	80C <sub>m</sub>	
<b>50ms Early Energy fraction</b>	50D <sub>l</sub>	50D <sub>m</sub>	50D <sub>h</sub>	-	
<b>Early decay time</b>	EDT <sub>l</sub>	EDT <sub>m</sub>	EDT <sub>h</sub>	[s]	
<b>Reverberation Time</b>	RT <sub>l</sub>	RT <sub>m</sub>	RT <sub>h</sub>	[s]	
<b>Modified Bass ratio</b>	BR <sub>mod</sub>			-	
<b>Source Receiver distance</b>	S			[m]	



Υπό συνθήκες διάχυτου ηχητικού πεδίου, η μεταβολή στο χώρο παρόμοιων μεταξύ των, ακουστικών παραμέτρων, συχνά εμφανίζει το ίδιο «pattern». Σε περίπτωση που οι φυσικές μετρήσεις μεταβάλλονται στο χώρο με κοινά «patterns», για λόγους διευκόλυνσης της ερμηνείας των φαινομένων, είναι χρήσιμο να γίνει ομαδοποίηση των ακουστικών παραμέτρων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η στατιστική μέθοδος της ανάλυσης των κυρίων συνιστωσών (Principal Components Analysis)[12].

Ακουστικές μετρήσεις έγιναν σε τυπικές αίθουσες rock μουσικής στην Αθήνα, στοιχεία των οποίων φαίνονται στον πίνακα 2.2 και στο σχήμα 3.1. Η διαβάθμιση στο μέγεθος των επιλεγέντων αιθουσών επιλέχθηκε με την προοπτική ότι αντιστοιχεί σε ανάλογη διαφοροποίηση της ακουστικής. Η διαφοροποίηση (variability) είναι απαραίτητη σε μια πειραματική διερεύνηση για να αναδείξει νομοτελειακές συσχετίσεις. Μετρήσεις έγιναν σε διάφορες θέσεις σε κάθε αίθουσα.

Πίνακας 2.2. Στοιχεία αιθουσών

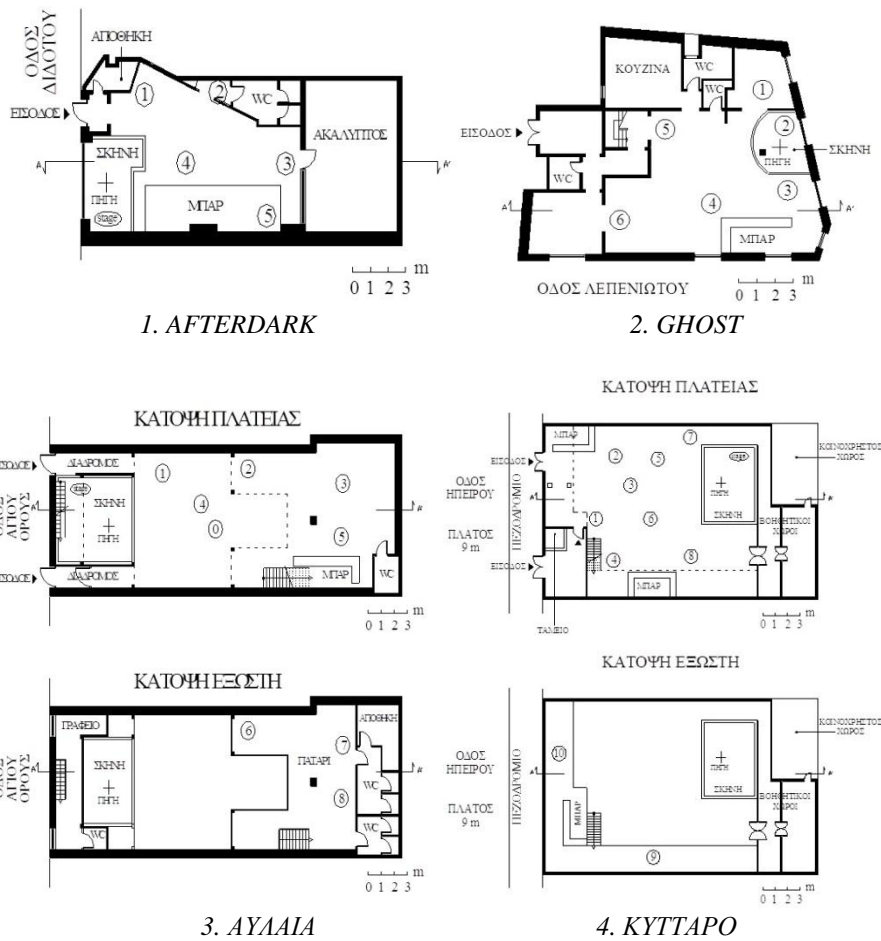
A/A	Αίθουσες	Όγκος [m <sup>3</sup> ]	Χωρητικότητα Ακροατών*	Όγκος / Ακροατή [m <sup>3</sup> / ακροατή]
1	AFTERDARK	330	120 - 150	2,2
2	GHOST	360	150 - 200	1,8
3	ΑΥΛΑΙΑ	870	250 - 300	2,9
4	ΚΥΤΤΑΡΟ	1560	850 - 1000	1,56

\*η χωρητικότητα δίνεται σε ελάχιστη και μέγιστη

### 3. Διεξαγωγή μετρήσεων – Ανάλυση και αποτελέσματα

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν χωρίς ακροατήριο σύμφωνα με τα σχετικά ISO και με σύγχρονο εξοπλισμό της Brüel & Kjaer· χρησιμοποιήθηκαν μονοφωνικές εγγραφές της απόκρισης της αίθουσας σε απλή κυματομορφή (impulse response) με τη βοήθεια ισότροπης ηχητικής πηγής στη θέση της ορχήστρας.

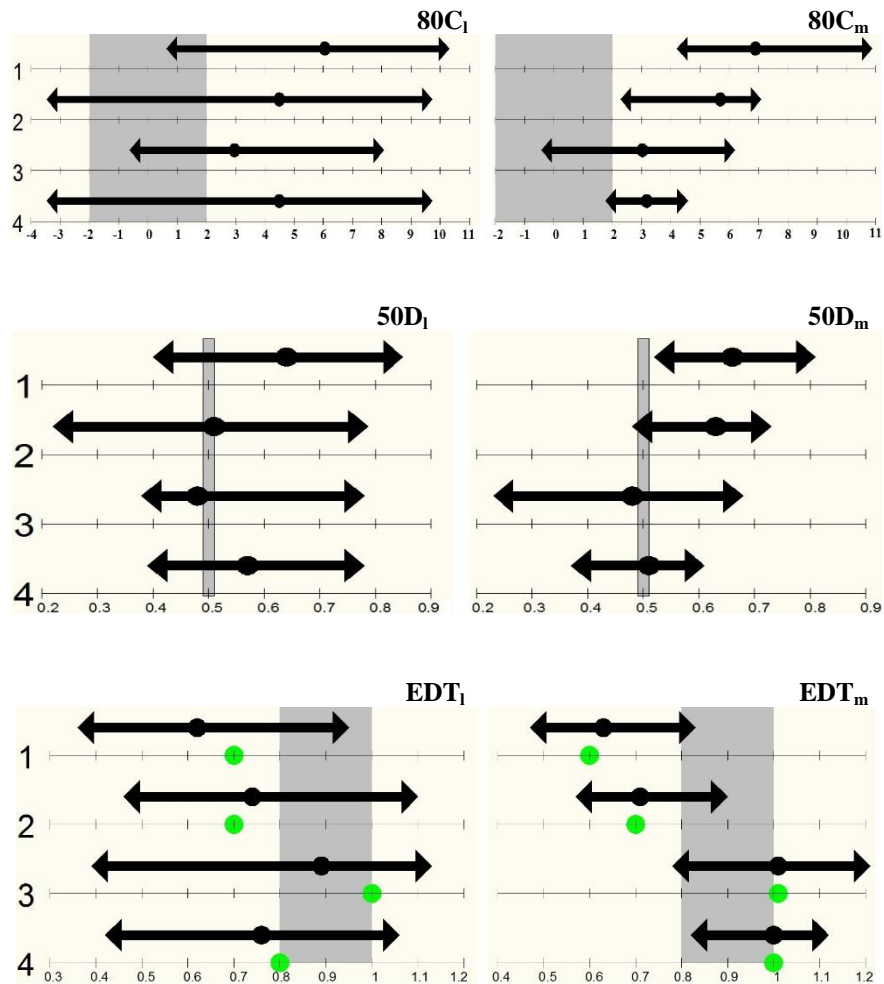
Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν στις οκταβικές ζώνες από 63Hz-4000Hz με τη βοήθεια του λογισμικού Dirac. Για κάθε παράμετρο οι τιμές εκφράστηκαν αντίστοιχα, στη χαμηλή (αριθμητικός μέσος 63Hz, 125Hz, 250Hz), στη μεσαία (αριθμητικός μέσος 500Hz, 1000Hz), και στην υψηλή (αριθμητικός μέσος 2000Hz, 4000Hz) περιοχή του φάσματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον πίνακα 3.2 και σχήματα 3.3 και 4.1. Περαιτέρω, οι ακουστικές φυσικές παράμετροι αναλύθηκαν σύμφωνα με τη στατιστική μέθοδο της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών [12] και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.2. Τέλος, για κάθε κύρια συνιστώσα συγκρίθηκαν οι αίθουσες μεταξύ τους (δηλαδή οι δείκτες της κύριας συνιστώσας – Principal Components Scores). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.3.



Σχήμα 3.1. Κατόψεις αιθουσών, □ : θέσεις μετρήσεων

Πίνακας 3.2. Μετρήσεις των  $RT$  και  $BR_{mod}$ . Για τα  $RT$  και  $BR_{mod}$  βλέπε πίνακα 2.1

Ακουστικές Παράμετροι	Αίθουσα				Επιθυμητές Τιμές
	1	2	3	4	
$RT_1$ [s]	0,7	0,7	1	0,8	0,8 ~ 1
$RT_m$ [s]	0,6	0,7	1,1	1	0,8 ~ 1
$RT_h$ [s]	0,6	0,7	0,9	1	0,8 ~ 1
$BR_{mod}$	1,1	1,3	0,9	0,7	$\leq 1,2$

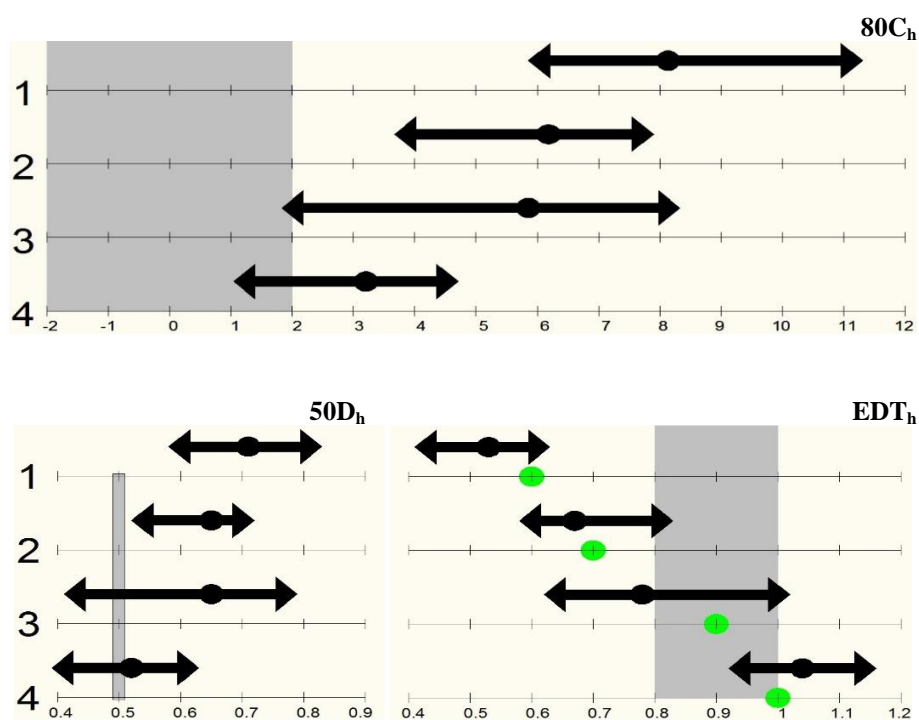


Σχήμα 3.3. Μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες στις αίθουσες: 1. Afterdark, 2. Ghost, 3. Αυλαία, 4. Κότταρο. Δίδονται μέση τιμή [●], μέγιστη και ελάχιστη. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις επιθυμητές τιμές και οι πράσινες τιμές αντιστοιχούν στον RT. Επεξηγήσεις συμβολισμών στον Πίνακα 2.1

#### 4. Ερμηνεία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η παρούσα αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έχει τον περιορισμό ότι οι βέλτιστες τιμές που χρησιμοποιούνται για σύγκριση προέρχονται ως επί το πλείστον από έρευνες για κλασική μουσική. Η εν λόγω σύγκριση (πίνακας 3.2 και σχήματα 3.3 και 4.1) δείχνει πως οι τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων, με εξαίρεση μεμονωμένες περιπτώσεις που αφορούν στο 80C και EDT. Βεβαίως, η απόκλιση αυτή δηλώνει την έλλειψη καθυστερημένων

ανακλάσεων στις χαμηλές συχνότητες, το οποίο στις αίθουσες για rock μουσική δεν θεωρείται ιδιαίτερο μειονέκτημα, δεδομένου ότι αυτές μπορεί να αναπληρώσει ηλεκτρονικά ο ηχολήπτης. Τέλος, οι ομοιότητα των τιμών του EDT με το RT δείχνει πως στις αίθουσες επικρατεί σχετικά διάχυτο ηχητικό πεδίο.



Σχήμα 4.1. Μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων στις υψηλές συχνότητες στις αίθουσες: 1.Afterdark, 2.Ghost, 3.Αυλαία, 4.Κύτταρο. Δίδονται μέση τιμή [●], μέγιστη και ελάχιστη. Οι σκιασμένες περιοχές αντιστοιχούν στις επιθυμητές τιμές και οι πράσινες τιμές αντιστοιχούν στον RT. Επεξηγήσεις συμβολισμών στον Πίνακα 2.1

Σύγκριση με καλές ευρωπαϊκές αίθουσες του είδους, όπως οι Lille Vega και Voxhall [4], οι οποίες έχουν όγκο αντίστοιχα  $785\text{m}^3$  και  $1600\text{m}^3$  έδειξε ότι οι παρούσες αίθουσες rock συναυλιών διαθέτουν καλή ακουστική. Αυτό μπορεί να αποδοθεί εν γένει στο σχετικά μικρό μέγεθος των χώρων, το οποίο αντιστοιχεί σε χαμηλούς χρόνους αντίληψης, που είναι επιθυμητοί για το rock ακρόαμα [2].

Η ανάλυση των ακουστικών μετρήσεων σε κύριες συνιστώσες ανέδειξε ένα μικρό αριθμό ανεξάρτητων κυρίων συνιστωσών, ήτοι την PC1 που προσδιορίζεται σχεδόν από το σύνολο των ακουστικών παραμέτρων στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, την PC2 που αντιστοιχεί στις χαμηλές συχνότητες και την PC3 η οποία εκφράζεται σχεδόν αποκλειστικά από παραμέτρους ηχητικής απόσβεσης στις μεσαίες συχνότητες. Οι τρεις κύριες συνιστώσες εξηγούν σχετικά υψηλό ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των δεδομένων, δηλαδή εκφράζουν κατ' ουσία τη συνολική ακουστική της αίθουσας. Η σύσταση των κυρίων συνιστωσών επιβεβαιώνει πρακτικά την ύπαρξη διάχυτου ηχητικού πεδίου στις αίθουσες. Η

ομαδοποίηση των ακουστικών μετρήσεων σε κύριες συνιστώσες μπορεί να διευκολύνει περαιτέρω διερεύνηση όσον αφορά στην αντίληψη της ακουστικής στις αίθουσες. Ανάλυση της διακύμανσης έδειξε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των αιθουσών για κάθε μια κύρια συνιστώσα, δηλαδή η ακουστική μεταξύ των αιθουσών διαφέρει. Είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί κατά πόσο αυτή η διαφοροποίηση είναι αντιληπτή και από τον μέσο ακροατή rock μουσικής. Αυτό αποτελεί το αντικείμενο επόμενης μελέτης.

Πίνακας 4.2 Ανάλυση φυσικών παραμέτρων σε κύριες συνιστώσες

Κύριες συνιστώσες	Φυσικές παράμετροι	Φόρτιση	Αθροιστικό ποσοστό διακύμανσης
<b>PC1</b>	80C <sub>h</sub>	0,953	
	50D <sub>h</sub>	0,945	
	EDT <sub>h</sub>	-0,922	
	RT <sub>h</sub>	-0,771	
	BR <sub>mod</sub>	0,688	
	80C <sub>m</sub>	0,684	
	EDT <sub>m</sub>	-0,66	
	50D <sub>m</sub>	0,609	37,70%
<b>PC2</b>	50D <sub>l</sub>	0,924	
	80C <sub>l</sub>	0,88	
	EDT <sub>l</sub>	-0,641	
	S	-0,526	
	50D <sub>m</sub>	0,603	62,75%
<b>PC3</b>	RT <sub>l</sub>	0,883	
	RT <sub>m</sub>	0,867	
	EDT <sub>m</sub>	0,634	
	BR <sub>mod</sub>	-0,62	87,33%

Πίνακας 4.3 Σύγκριση δεικτών κυρίων συνιστωσών μεταξύ των αιθουσών

Κύριες Συνιστώσες	F- Στατιστικό	Επίπεδο Σημαντικότητας
PC1	27,019	0,00
PC2	5,96	0,003
PC3	70,454	0,00

## 5. Συμπεράσματα

Ακουστικές μετρήσεις σε τέσσερις αίθουσες rock μουσικής στην Αθήνα, σχετικά μικρές, έδειξαν ότι η ακουστική των αιθουσών βρίσκεται μέσα σε δεκάτα όρια. Σύγκριση με αντίστοιχες ευρωπαϊκές αίθουσες καλής ακουστικής επιβεβαίωσε την επιτυχημένη ακουστική των αιθουσών της παρούσας μελέτης. Η καλή ακουστική μεταξύ άλλων, μπορεί να ερμηνευθεί από το σχετικά μικρό μέγεθος των αιθουσών. Οι παρούσες αίθουσες ενώ είναι κατάλληλες για rock μουσική, όπως είναι αναμενόμενο είναι ακατάλληλες για κλασσικές συναυλίες κυρίως λόγω του χαμηλού χρόνου αντήχησης που διαθέτουν στις χαμηλές συχνότητες. Περαιτέρω

συσχέτιση των αποτελεσμάτων με την αντίληψη της ακουστικής από μουσικόφιλο κοινό μπορεί να διαφωτίσει ως προς την σημασία αυτών των μετρήσεων στην αντίληψη της καλής ακουστικής.

## 6. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τους καθ. ΕΜΠ κ. Γ. Πουλάκο και τον Δρα Larsen για την στήριξη στο έργο μας και τον γόνιμο διάλογο, καθώς και στις διευθύνσεις των αιθουσών όπου έγιναν οι ακουστικές μετρήσεις. Μέρος της παρούσας εργασίας διεξήχθη στο πλαίσιο της επί πτυχίω εργασίας των Π. Ρεμπή και Σ. Τσούκα στο ΕΜΠ.

## 7. 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] N.W. Larsen, J.J. Dammerud «A survey of reverberation times in 50 European venues presenting pop & rock concerts» in *Forum Acusticum, Aalborg - Denmark (2011)*
- [6] 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)*
- [7] Α. Γ. Σωτηροπούλου, Γ. Πουλάκος, Ι. Καραγιάννης, Α. Σαββοπούλου «Ακουστικός σχεδιασμός αιθουσών rock μουσικής ~ επισκόπηση σύγχρονων εξελίξεων» in *Ακουστική 2012*, Σελίδες 01-07 (2012)
- [8] Α. Γ. Σωτηροπούλου, Ι. Τζουβαντάκης, Ι. Καραγιάννης, Α. Σαββοπούλου «Subjective acoustic evaluations in rock music halls», Εισήγηση στο *International Conference of Echopolis, Days of Sound: sounds, noise, music in re-thinking the city*, Athens (2013)
- [9] Α. Πάνος, Ι. Γρίβα «Ακουστικές μετρήσεις σε αίθουσες μουσικής rock», διπλ.εργασία, Πολ. Μηχ. ΕΜΠ (2010)
- [10] R. Thiele, «Directional distribution and sequence of sound reflections in rooms» *Acustica*, **3**, p. 291 (1953)
- [11] W. von Reichardt, O. Abdel Alim and W. Schmidt, «Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung» *Acustica*, **32**, p. 126 (1975)
- [12] N. H. Nie, C.H. Hull, J. G. Jenkins, K. Steinbrenner, D. H. Bent, *Statistical package for the social sciences*, 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill Book Co., New York (1975)
- [13] Π. Ρεμπής, Σ. Τσούκα «Ακουστική αιθουσών μουσικής rock», διπλ. εργασία, Πολ. Μηχ. ΕΜΠ 2009

## **Διερεύνηση παραμέτρων ευελιξίας χώρων θεάματος με δυνατότητα μετασχηματισμού και ακουστική**

Γιάννης-Νίκος Τσάρας<sup>1</sup>, Δημήτριος Γιουζέπας<sup>2</sup> & Παναγιώτης Γούλιαρης<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Χαρ. Κυπρίου 7, 54 621 Θεσσαλονίκη, giantsar@gmail.com

<sup>2</sup>Δελμούζου 9, 54 622 Θεσσαλονίκη, dgiouzepas@gmail.com

<sup>3</sup>Γιαννιτσών 50, 12 131 Περιστέρι, Αθήνα, p.gouliaris@gmail.com

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ποικιλία των «θεατρικών εκδηλώσεων» είναι εξαιρετικά μεγάλη όπως άλλωστε και οι τύποι των κτηρίων που τις φιλοξενούν. Τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται παραστάσεις που δανείζονται εκφραστικές μεθόδους από όλες τις παραστατικές τέχνες, ορίζοντας μια καινούρια δυναμική οργάνωση στο χώρο διεξαγωγής τους. Η πραγματοποίηση μιας αίθουσας ικανής να παραλάβει αντίστοιχα θεάματα, ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά των ευέλικτων αιθουσών, με τον παράγοντα της μεταβλητότητας σε όλες τις σχεδιαστικές παραμέτρους μεταξύ των οποίων και η ακουστική. Η ευελιξία και κάθε μια από τις παραμέτρους σχεδιασμού ωστόσο, μπορεί να λειτουργήσει υπό προϋποθέσεις. Η παραμετροποίηση των ετερόκλητων σχεδιαστικών στοιχείων σε μια μεταξύ τους συνδυαστική ισορροπία δύναται να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στο συγκεκριμένο πεδίο σχεδιασμού.*

### **Investigation of flexibility parameters of spaces of spectacle with possibility of transformation and acoustics**

#### **ABSTRACT**

*The variety of “theatrical events” is extremely large as are the types of buildings that accommodate them. In recent years, performances are presented that borrow expressional methods from all the performing arts, setting a new dynamic organization in their space of conduct. The realization of a hall capable of receiving respective spectacles incorporates the characteristics of flexible halls, with the variability factor in all design parameters, including acoustics. Flexibility and every one of the design parameters, however, can function under conditions. The parameterization of heterogeneous design elements in a balanced combination between them may be a useful tool in this in the specific field of design.*

#### **1. Εισαγωγή**

Ο χώρος παραστάσεων, δεν ήταν ποτέ αποκομμένος από τη διαδικασία της παράστασης· αντίθετα αποτελεί ενεργό τμήμα αυτής, καθώς εντάσσεται σε μια κατάσταση συνεχούς μετάλλαξης, ακολουθώντας τις απαιτήσεις και τις ανάγκες του

θεάματος, κατά τη διαδικασία προσαρμογής του σε αυτές. Σε όλες όμως τις εποχές, η αναφορά του χώρου γινόταν κατά κανόνα προς μια συγκεκριμένη παράσταση, χαρακτηριστική για την κάθε περίοδο, με αποτέλεσμα να εξελιχθούν τρεις βασικές μορφές χώρου: η αίθουσα προσκηνίου, η αίθουσα ανοικτής σκηνής και η αρένα [1]. Τις τελευταίες δεκαετίες το εύρος και το είδος παραστάσεων-θεαμάτων εξελίσσεται, μεταλλάσσεται και μεταβάλλεται. Καθώς τα στεγανά αναιρούνται, υβρίδια παραστάσεων και νέες μορφές έκφρασης με στοιχεία από όλα τα είδη των παραστατικών τεχνών κάνουν την εμφάνισή τους, με τις παραστάσεις να ακροβατούν ανάμεσα στο θέατρο, στην performance, στο χορό και στη μουσική [2]. Κατά συνέπεια, ο χώρος διεξαγωγής τους ορίζεται πλέον ως “χώρος παραστάσεων” και όχι ως “θέατρο”, ή “αίθουσα συναυλιών”, συνδυάζοντας δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά από όλες τις παραδοσιακές μορφές σε μια καινούρια δυναμική οργάνωση.

## **2. Ευελιξία στη χωρική οργάνωση του θεατρικού χώρου**

Η ιδέα να μπορούν να φιλοξενηθούν διαφορετικού τύπου θεάματα στον ίδιο χώρο, είχε ήδη εκφραστεί από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Η προοπτική για έναν χώρο ικανό να φιλοξενήσει την πολυμορφία του σύγχρονου θεάτρου εκφράστηκε από πολυάριθμες μελέτες με πρώτη ολοκληρωμένη τεχνικά αυτή του Totalteater [3]. Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στο σχεδιασμό χώρων με δυνατότητα ευελιξίας τόσο στο σκηνικό χώρο, όσο και στο δίπολο σκηνικός χώρος και πλατεία, αντιμετωπίζοντάς το ως μια οντότητα. Σε αυτά τα πλαίσια μπορούμε να διακρίνουμε τρεις βασικές κατηγορίες: τις πολυμορφικές αίθουσες, τις πολυχρηστικές αίθουσες και τον αδέσμευτο χώρο παραστάσεων.

### **2.1 Πολυμορφικές αίθουσες**

Η επιθυμία των παραγωγών στις αρχές του 20ου αιώνα να ανεβάσουν έργα σε περισσότερες από μία σκηνές, με μορφολογία σκηνής αντίστοιχη με αυτή που πρωτοπαρουσιάστηκαν, οδήγησε σε ισότιμη “ζήτηση” και για τους τρεις μέχρι τότε κυρίαρχους τύπους [4]. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη σκηνών που με μηχανικά μέσα κατέχουν τη δυνατότητα να μετασχηματιστούν και να υιοθετήσουν τη χωρική οργάνωση άλλου τύπου σκηνής. Με σημείο αναφοράς τα σχέδια του Totalteater έγιναν αρκετές προτάσεις για αίθουσες που αλλάζουν από θέατρο προσκηνίου σε ανοικτή σκηνή ή σε αρένα, καθιστώντας τον θεατρικό χώρο ευέλικτο ακόμα και σε μεγάλες κλίμακες. Στην πλειοψηφία αυτών των σκηνών υπάρχει μια αρχική, κυρίαρχη μορφή βάσει της οποίας έχει σχεδιαστεί το κέλυφος, η οπτική και ακουστική μελέτη. Η αλλαγή ωστόσο, σημαίνει εκπτώσεις στη συνολική αίσθηση και στη λειτουργία της αίθουσας, καθώς ο μετασχηματισμός από μια μορφή σε άλλη δεν μπορεί να εξασφαλίσει στο ακέραιο τις συνθήκες λειτουργίας, ακουστικής, και τεχνικής υποδομής που απαιτεί η δεύτερη (δευτερεύουσα) μορφή. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην άποψη να χαρακτηριστούν οι πολυμορφικές σκηνές ως ένα από τα πιο σημαντικά λάθη στην ιστορία του θεατρικού σχεδιασμού [5].



## 2.2 Πολυχρηστικές αίθουσες

Οι πολυχρηστικές αίθουσες αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των ευέλικτων θεάτρων. Αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν ιδιαίτερα από τις αρχές του 20ου αιώνα και είναι μια προσπάθεια να μπορούν να φιλοξενηθούν διαφορετικά θεάματα, σε έναν χώρο που να μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα. Η μορφολογική διάταξη είναι κατά κανόνα η τυπική μετωπική του θεάτρου προσκηνίου, με μια σκηνή όμως ικανή να μετασχηματίζεται προκειμένου μπορεί να φιλοξενήσει διαφορετικούς τύπους θεαμάτων. Και ενώ η οπτική χάραξη δεν επηρεάζεται από την αλλαγή χρήσης, η ακουστική μελέτη αντίθετα πρέπει να προβλέψει σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό της, προσαρμοσμένη στο εκάστοτε είδος θεάματος. Αυτό προϋποθέτει μεγάλης κλίμακας αλλαγές στον όγκο της αίθουσας, με αρκετές τεχνικές δυσκολίες. Οι πιο επιτυχημένες πολυχρηστικές αίθουσες είναι αυτές που φιλοξενούν συγγενικά θεάματα των οποίων οι ακουστικές απαιτήσεις είναι ίδιες αλλά σε ελαφρώς διαφοροποιημένα μεγέθη.

## 2.3 Αδέσμευτος χώρος παραστάσεων

Μια διαφορετική προσέγγιση σχεδιασμού είναι ο αδέσμευτος θεατρικός χώρος, ο οποίος παρουσιάστηκε τον 20ο αιώνα χωρίς ιστορικό προηγούμενο. Πρόκειται για χώρους κλειστούς που βασίζονται στην παραδοχή ότι για να υπάρξει θέατρο είναι απαραίτητη η παρουσία ηθοποιού και κοινού στον ίδιο χώρο, αλλά χωρίς συγκεκριμένη και προκαθορισμένη χωρική σχέση [6]. Οι χώροι, ως ουδέτεροι, μπορούν να προσαρμοστούν σε κάθε παράσταση με τη χρήση κινητών μονάδων. Η δυνατότητα αυτή έδωσε το χαρακτήρα του “πειραματικού”, καθώς συνδέεται άμεσα με αντίστοιχες παραστάσεις μη συμβατικές με τα δεδομένα της χωρικής διευθέτησης και σκηνοθεσίας. Η αντιμετώπιση αυτή του θεατρικού χώρου, θα μπορούσε να θεωρηθεί “ιδανική”, αφού προσφέρει αναρίθμητες ευκαιρίες οργάνωσης και παρέχει τις βέλτιστες δυνατότητες για αμεσότητα με το κοινό. Το σύνολο του χώρου αντιμετωπίζεται σαν μια μεγάλη τεχνική σκηνή, πράγμα που σε οικονομικά μεγέθη μεταφράζεται σε μεγάλο κόστος κατασκευής και συντήρησης, αυξανόμενο αναλογικά με την κλίμακα της αίθουσας.

## 3. Ακουστικός σχεδιασμός σε συνθήκες μετασχηματισμού

Διακυμάνσεις στην ακουστική συμπεριφορά ενός κλειστού χώρου είναι σίγουρα αναγκαίες για τη δημιουργία ελεγχόμενης, προβλέψιμης και επιθυμητής ηχητικής συμπεριφοράς της αίθουσας. Ο τρόπος και η κλίμακα των αλλαγών που απαιτούνται για τη μεταβολή των συνθηκών της ακουστικής, εξαρτάται από το μέγεθος της αίθουσας, από το εύρος των διαφορετικών χρήσεων, και τέλος στο είδος ευελιξίας που την χαρακτηρίζει (πολυμορφικός, πολυχρηστικός, αδέσμευτος χώρος).

Ανάλογα τη χρήση μπορούν να διακριθούν οι παρακάτω ενότητες αιθουσών:

- α) αίθουσες που προορίζονται για διαλέξεις
- β) αίθουσες για θεατρικές παραστάσεις και ανάλογου τύπου θέαμα με κύριο χαρακτηριστικό το λόγο και τέλος
- γ) αίθουσες που προορίζονται για μουσικές παραστάσεις (συναυλίες, όπερα, χορός κτλ)

Άμεση είναι και η σχέση των παραπάνω κατηγοριών και με το μέγεθος

αίθουσας, αφού κατά κανόνα ακολουθούν την κλιμάκωση α)μικρή (<250 άτομα), β)μεσαία (<600 άτομα), γ)μεγάλη (>600 άτομα) αντίστοιχα.

Το είδος παράστασης προδιαγράφει και το βέλτιστο χρόνο αντίληψης της αίθουσας προκειμένου να παρέχονται οι καλύτερες δυνατές συνθήκες ακρόασης, χωρίς όμως να είναι απόλυτος. Ακόμα όμως και σε αίθουσες με μοναδική χρήση, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για δυνατότητα μεταβολής των ακουστικών συνθηκών, καθώς οι ακουστικές απαιτήσεις των θεατών εξειδικεύονται όλο και περισσότερο [7].

Σε συνθήκες μετασχηματισμού, υπάρχει η ανάγκη για συσχέτιση της ευελιξίας του ακουστικού σχεδιασμού με την δομική ευελιξία της αίθουσας, γεγονός που οδηγεί στην ενσωμάτωση πρακτικών ελεγχόμενης μεταβολής της ακουστικής της. Ενώ το εύρος της μεταβολής είναι σχετικά μικρό στις πολυμορφικές αίθουσες (μοναδική χρήση - ευέλικτη τυπολογία), αποκτά μεγάλη κλίμακα όταν αναφέρεται σε πολυχρηστικές αίθουσες (ευέλικτη χρήση - μοναδική τυπολογία), με τον κάθε τύπο αίθουσας να παρουσιάζει τις ιδιαιτερότητές του. Η ευκολία για τη δυνατότητα μετασχηματισμού, είτε πρόκειται για πολυμορφικό είτε για πολυχρηστικό χώρο, όσον αφορά στον ακουστικό σχεδιασμό είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το μέγεθος της αίθουσας. Μεγάλες αίθουσες είναι πιο δύσκολο - πρακτικά και οικονομικά - να προσαρμοστούν σε συνθήκες ευελιξίας, σε σχέση με τις μικρές. Καθώς βασίζονται όχι μόνο στον απ' ευθείας φυσικό ήχο αλλά και σε μεθόδους ενίσχυσής του, προϋποθέτουν πιο εξειδικευμένους χειρισμούς στην εσωτερική γεωμετρία, κάνοντας την πιο "άκαμπτη" σε συνθήκες μετασχηματισμού. Έτσι η κλίμακα των αλλαγών που πρέπει να γίνουν για την ευελιξία κυρίως της κάτοψης, είναι τέτοια που γίνεται λειτουργικά ασύμφορη. Η χρυσή τομή μεγέθους και χαρακτηριστικών μετασχηματισμού εντοπίζεται σε μεσαίες αίθουσες, καθώς το σύνολο της αίθουσας μπορεί πιο εύκολα να προσαρμοστεί σε δομικές αλλαγές. Αντίθετα στην περίπτωση του αδέσμευτου χώρου παραστάσεων, ακριβώς επειδή δεν υπάρχει κάποια "τυποποιημένη" σχέση μεταξύ θεάματος και θεατών, δεν είναι εύκολη η πρόβλεψη ενός ακουστικού μοντέλου ικανού να παραλάβει όλες τις χρήσεις, παρά μόνο αν βασιστεί στην παραδοχή της μικρής αίθουσας και άρα στον απ' ευθείας φυσικό ήχο. Ο "πειραματικός" χαρακτήρας άλλωστε των αιθουσών αυτών προϋποθέτει την οικειότητα του θεάματος και άρα την "εγγύτητα" του με τον θεατή.

Υπάρχουν σε γενικές γραμμές δύο τρόποι που κάνουν δυνατή την ελεγχόμενη μεταβολή: οι δομικές αλλαγές και η ηλεκτρονική ακουστική.

### 3.1 Δομικές αλλαγές

Οι δομικές αλλαγές μπορούν να αφορούν αλλαγές μεγάλης κλίμακας στη γεωμετρία της αίθουσας ή μεταβολή στην απορροφητική - ανακλαστική ιδιότητα των επιφανειών της.

Στην πρώτη περίπτωση, η μετακίνηση δομικών στοιχείων μπορεί να μειώσει τον όγκο της αίθουσας με τον περιορισμό των κερκίδων και της χωρητικότητας. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι ο χειρισμός της οροφής, όπου ουσιαστικά αυξομειώνεται το ύψος της αίθουσας χωρίς απαραίτητα να μειώνεται και η χωρητικότητά της. Δύο ικανοποιητικοί χειρισμοί της οροφής αφορούν σε α) μηχανική κατακόρυφη μετακίνηση της οροφής της πλατείας μεταξύ συγκεκριμένων και προκαθορισμένων σημείων και β) στην υιοθέτηση διπλής οροφής, όπου το κάτω

επίπεδο έχει τη δυνατότητα να ανοίγει σε ένα ποσοστό (μηχανικά ή χειροκίνητα) και κατά τμήματα, προσθέτοντας έτσι το ενδιάμεσο τμήμα στον όγκο της αίθουσας. Και οι δύο περιπτώσεις μπορούν να λειτουργήσουν μεταξύ ενός επιθυμητού εύρους τιμών χρόνου αντήχησης, με τη δεύτερη περίπτωση να απαιτεί τις λιγότερες δομικές αλλαγές και μηχανικά μέρη. Η κατακόρυφη μετακίνηση εξ άλλου του συνόλου της οροφής, συμπαρασύρει και μια σειρά από εγκαταστάσεις (φωτισμός, εξαερισμός, πυρασφάλεια) που καλούνται και αυτές με τη σειρά τους να προσαρμοστούν στην κίνηση.

Η μεταβολή στο ποσοστό απορρόφησης της αίθουσας μπορεί να γίνει και με πολύ πιο απλά μέσα και συγκριτικά χαμηλό κόστος σε σχέση με την αλλαγή όγκου. Οι επικρατέστεροι τρόποι είναι α) με περιστρεφόμενα τελάρα με διαφορετικά ηχητικά χαρακτηριστικά σε κάθε επιφάνεια, β) με ενσωματωμένες ήχο-παγίδες στις κατακόρυφες επιφάνειες ή σε τμήματα της οροφής, με δυνατότητα να ανοιγοκλείνουν, είτε γ) με επικάλυψη επιφανειών ανάκλασης από πετάσματα ηχοαπορροφητικού υλικού, τα οποία απομακρύνονται ή τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία.

### 3.2 Ηλεκτρονική ακουστική

Η εξέλιξη της ηλεκτρονικής στον έλεγχο του ήχου, δίνει νέες δυνατότητες στον ακουστικό σχεδιασμό. Όλο και περισσότερες αίθουσες βασίζονται αποκλειστικά σε ηλεκτρονική υποστήριξη ήχου. Εξ άλλου αρκετά θεάματα (σύγχρονες τάσεις θεατρικών έργων, μουσικές παραστάσεις σύγχρονης μουσικής, κινηματογράφος και βίντεο - προβολές αυτόνομες ή ως τμήμα άλλης παράστασης) βασίζονται αποκλειστικά στην ηλεκτρονική παραγωγή του ήχου.

Ο ηλεκτρονικός έλεγχος του ήχου αφορά συστήματα ελεγχόμενης αντήχησης και διάδοσης του, με συλλογή του ήχου πολύ κοντά στην ηχητική πηγή, και στη συνέχεια απόδοσης του με ηχεία πίσω στην αίθουσα, ενισχυμένο και με χρονοκαθυστερήση. Αν και προσφέρουν λύσεις εύκολου και ακριβούς καθορισμού των ακουστικών συνθηκών, η φύση και η ποιότητα του παραγόμενου ήχου είναι καθοριστική, καθώς πάντα υπάρχει ο κίνδυνος να ακούγεται τεχνητός σε μια ζωντανή παράσταση.

## 4. Βαθμός Προσαρμοστικότητας

Κάθε χώρος παραστάσεων, ανεξάρτητα από το είδος και τη χρήση του, έχει συγκεκριμένες ανάγκες και απαιτήσεις για τη σωστή λειτουργία του. Η χρήση ωστόσο της αίθουσας, ουσιαστικά δηλαδή ο τύπος του θεάματος που θα φιλοξενηθεί, είναι το βασικό στοιχείο το οποίο καθορίζει το μέγεθος και τις αμφίδρομες σχέσεις πλατείας - σκηνής, τις ακουστικές και γενικότερα τις ειδικές προδιαγραφές της αίθουσας. Στο επίπεδο του σχεδιασμού είναι απαραίτητο να βρεθούν τα κοινά στοιχεία των διαφορετικών χρήσεων ως προς τις απαιτήσεις τους από την αίθουσα, καθώς και ο τρόπος γεφύρωσης των προδιαγραφών της αίθουσας (σκηνής και πλατείας) ανά χρήση.

Η προσαρμοστικότητα της αίθουσας προϋποθέτει μετασχηματισμό ως προς: α) τη χωρητικότητα - φυσικές διαστάσεις, β) τη διάταξη σκηνής - πλατείας, γ) τις προδιαγραφές της σκηνής και δ) την ακουστική. Τα τρία πρώτα στοιχεία αποτελούν αντικείμενο του αμοιγώς αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, τα οποία πρέπει να

εναρμονιστούν με τον ακουστικό σχεδιασμό. Όλα όμως συνιστούν μετρήσιμες ποιότητες σε μια εξίσωση που ορίζει το Βαθμό Προσαρμοστικότητας της αίθουσας. Η εξίσωση αυτή στο σύνολό της χαρακτηρίζει τον σχεδιασμό του θεατρικού χώρου με όρους ευελιξίας, και την ικανότητά του να προσαρμόζεται σε διαφορετικές απαιτήσεις. Ορίζουν ένα πολυώνυμο που έχει διπλό ρόλο: α) για τις υπάρχουσες αίθουσες τα στοιχεία της εξίσωσης έχουν συγκεκριμένη τιμή, και ο Βαθμός Προσαρμοστικότητας αποτελεί ένα εργαλείο αξιολόγησης της αίθουσας ως προς την ευελιξία της και β) για τον σχεδιασμό νέας αίθουσας τα στοιχεία είναι μεταβλητές και η εξίσωση λειτουργεί ως μια μέθοδος - βοήθημα λήψης αποφάσεων, προκειμένου να συνδυαστούν οι μεταβλητές σε μια βέλτιστη λύση. Ο Βαθμός Προσαρμοστικότητας είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της αξιολόγησης των επιμέρους στοιχείων ενός χώρου, ως προς τις δυνατότητες που έχει ή που πρέπει να έχει, έτσι ώστε να μπορεί να συνδυάσει το μέγιστο βαθμό ευελιξίας με τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η κάθε μεταβλητή αποτελείται από επιμέρους σύνολα σχεδιαστικών χειρισμών και ποιοτικών προδιαγραφών. Η τιμή της κάθε μεταβλητής ορίζει συγκεκριμένους συνδυασμούς ανάμεσα στους χειρισμούς και τις προδιαγραφές για τις υπόλοιπες μεταβλητές και άρα συγκεκριμένες αποφάσεις στο σχεδιασμό, που καθορίζουν την ικανότητα του χώρου αυτού να προσαρμόζεται σε διαφορετικές απαιτήσεις.

## 5. Συμπεράσματα

Οι αίθουσες με δυνατότητα μετασχηματισμού, δεν είναι ούτε κάτι καινούριο, ούτε κάτι πρωτοποριακό. Οι νέες συνθήκες όμως που διαμορφώνονται από τα υβριδικά έργα, απαιτούν μια άλλου είδους προσαρμοστικότητα του χώρου παραστάσεων, από μια απλή εναλλαγή στη χωρική δομή της σχέσης θεατή - θεάματος. Καθώς επαναπροσδιορίζεται ο χώρος παράστασης, αποκτά νέες υποστάσεις και α-χωρικούς προσδιορισμούς. Η προσαρμοστικότητα στην αρχιτεκτονική ευελιξία, αποκόπτεται από το στάδιο του πειραματισμού και λίγο - πολύ επιβάλλεται, καθώς αποτελεί λειτουργικό και αναπόσπαστο στοιχείο στη διεξαγωγή της παράστασης. Η προσαρμογή του σύγχρονου χώρου παραστάσεων σε αυτές τις συνθήκες, προϋποθέτει μια ευελιξία στη χρήση και στη μορφή, καθώς δεν μπορεί πλέον να μένει προσκολλημένη σε ένα μόνο είδος παράστασης.

Ο τρόπος και η κλίμακα των αλλαγών που απαιτούνται για τη μεταβολή των συνθηκών της αρχιτεκτονικής οργάνωσης μιας αίθουσας παραστάσεων και κατ' επέκταση του ακουστικού σχεδιασμού της, εξαρτάται από πολλά ετερόκλιτα στοιχεία. Ο ευέλικτος ακουστικός σχεδιασμός ωστόσο, μιας αίθουσας επιβάλλεται ανεξάρτητα από το είδος της αίθουσας, ειδικότερα δε στην περίπτωση των αιθουσών με δυνατότητα μετασχηματισμού αποκτά νέες προκλήσεις.

Η ευκολία για τη δυνατότητα μετασχηματισμού για κάθε τύπο ευέλικτης αίθουσας, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το μέγεθος της αίθουσας, με αποτέλεσμα να υπάρχει άμεση σχέση ανάμεσα στο είδος της μεταβλητής αίθουσας, με το εύρος μεταβολής του του ακουστικού μοντέλου. Μεγάλες αίθουσες είναι σίγουρα πιο δύσκολο να ρυθμιστούν ακουστικά σε σχέσεις με μικρές, καθώς αφενός δεν βασίζονται μόνο στον απ' ευθείας φυσικό ήχο και άρα προϋποθέτουν πιο εξειδικευμένους χειρισμούς, και αφετέρου η κλίμακα των αλλαγών που απαιτούνται για την ευελιξία κυρίως της κάτοψης είναι τέτοια που καθίσταται λειτουργικά ασύμφορη.

Ο δείκτης προσαρμοστικότητας, ως μέθοδος παραμετροποίησης των ετερόκλιτων στοιχείων σχεδιασμού αιθουσών, σε μια μεταξύ τους συνδυαστική ισορροπία, αλλά και ως φορέας της αξιολόγησης ενός χώρου ως προς τις δυνατότητες που έχει ή που πρέπει να πληρεί, έτσι ώστε να μπορεί να αξιοποιήσει το μέγιστο βαθμό ευελιξίας με τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, δύναται να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο σχεδιασμού χώρων θεάματος με δυνατότητα μετασχηματισμού και ακουστικής συμπεριφοράς τους.

## 5. Βιβλιογραφία

- [1] Μαρτινίδης, Πέτρος, *Μεταμορφώσεις του θεατρικού χώρου, τυπικές φάσεις κατά την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των θεάτρων στη Δύση*, Νεφέλη, Αθήνα (1999).
- [2] Βαροπούλου, Ελένη, *Το Θέατρο στην Ελλάδα*, τόμος Α', Άγρα, Αθήνα (2009).
- [3] Brockett, Oscar & Hildy Oscar, *History of the Theater*, Pearson (2010)
- [4] Μποζίτζιο, Πάολο, *Ιστορία του Θεάτρου*, Τόμος Α' & Β', Αιγόκερως/ Θέατρο, Αθήνα (2006).
- [5] Mielziner, Jo, *The Shapes of Our Theater*, Clarkson N. Potter, Inc/publisher, New York (1970).
- [6] Breton G., *Theaters*, Moniteur, Paris (1989), p19.
- [7] D. Prior, "A space for sound: The rise, fall and fallout of the concert hall as a primary space for listening", in *Architecture, Music, Acoustics*, Ryerson University, Toronto, Canada, June 7-10 (2006).

# **Σεβαστοπούλειο εκπαιδευτικό συγκρότημα, Αθήνα· ακουστικός σχεδιασμός αμφιθεάτρου 180-θέσεων**

Αλεξάνδρα Γ. Σωτηροπούλου

Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχ/κών και Σχολή Πολιτικών Μηχ/κών Ε.Μ.Πολυτεχνείου

[alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το συγκρότημα προβλέπεται να ανεγερθεί στο κέντρο της Αθήνας, στη συμβολή δρόμων ήπιας κυκλοφορίας. Αυτό περιλαμβάνει μεταξύ άλλων, αμφιθέατρο διαλέξεων 180-θέσεων. Βασικό αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό του αμφιθεάτρου είναι το υαλοστάσιο, που φέρει ο εξωτερικός τοίχος της αίθουσας προς το δημόσιο δρόμο. Η κατασκευή ηχομόνωσης του υαλοστασίου αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας για την διασφάλιση ηχοπροστασίας στην αίθουσα. Η αίθουσα είναι σχετικά μικρή και ο σχεδιασμός της στοχεύει στη βελτιστοποίηση του φυσικού ήχου. Η αξιολόγηση του σχεδιασμού βασίζεται σε υπολογιστικές προβλέψεις του Χρόνου Αντήχησης. Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός συνάδει με τις ανάγκες του ακουστικού σχεδιασμού, τόσο ως προς τις επιλογές του κελύφους του αμφιθεάτρου όσο και ως προς τις κατασκευές ηχοπροστασίας.*

## ***Sevastopoulios School in Athens; Acoustic design of the 180-seats lecture theatre***

## **ABSTRACT**

*New educational facilities of the Sevastopoulios School are planned to be erected in a central area of the city of Athens. The facilities comprise, amongst others, a 180-seats lecture theatre; the latter, has extensive glazing on its external wall facing the street, which is important to be given attention regarding sound insulation performance. The acoustics of the auditorium is relying on natural sound, thanks to the room's relatively small size. The acoustical design is based on predictions of Reverberation Time. The inside shape of the auditorium is in rapport with the building's outfit.*

## Εισαγωγή

Η Σεβαστοπούλειος Σχολή πρόκειται να ανεγερθεί στη συμβολή δρόμων ήπιας κυκλοφορίας στο κέντρο της Αθήνας, και αποτελείται από τέσσερα κτίρια που θα στεγάσουν αίθουσες διδασκαλίας, εργαστήρια, βιβλιοθήκη, αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, αμφιθέατρο διαλέξεων 180-θέσεων και λοιπούς χώρους. Ο ακουστικός σχεδιασμός του αμφιθεάτρου διαλέξεων, είναι το αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

Πίναξ 1.1 Βασικά στοιχεία του αμφιθεάτρου

Μελέτη:	αρχιτέκτων: Δημ. Γ. Παπαϊωάννου, ομ. καθ. ΕΜΠ σύμβουλος ακουστικής: Α. Γ. Σωτηροπούλου, αν καθ. ΕΜΠ
Χρονολογία μελέτης:	2013
Χρήση:	διαλέξεις
Χωρητικότητα:	180-θέσεις
Μήκος:	16.70 m
Πλάτος:	10.15 m
Ύψος (μέσο):	3.54 m
Όγκος:	590.40 m <sup>3</sup>
RTmid*:	0.74 s

\* υπολογιστική πρόβλεψη του Χρόνου Αντήχησης στις μεσαίες συχνότητες (500 και 1000 Hz)

### 1. Ακουστικός σχεδιασμός εσωτερικού κελύφους

Το αμφιθέατρο διαλέξεων της Σχολής ευρίσκεται στον 1<sup>ο</sup> όροφο και ο ακουστικός σχεδιασμός του συνοψίζεται στα συνημμένα Σχήματα 1.1, και 1.2.

Η ακουστική του αμφιθεάτρου βασίζεται στον **φυσικό ήχο**, χάρις εις τις σχετικά μικρές διαστάσεις της αίθουσας. Ο τελικός όγκος της αίθουσας είναι 590,40 m<sup>3</sup> που αντιστοιχεί σε 3,28 m<sup>3</sup> ανά άτομο. Ο επιθυμητός Χρόνος Αντήχησης (RT) επιλέγεται στην περιοχή 0,70 ~ 0,95 [s], για πληρότητα αίθουσας 2/3. Ο ακουστικός σχεδιασμός του εσωτερικού κελύφους της αίθουσας στοχεύει:

- στην παροχή πρώτων ανακλάσεων προς το ακροατήριο, αφ' ενός μέσω κατάλληλης πτυχωτής ψευδοροφής, και αφ' ετέρου μέσω των πλευρικών παρειών του χώρου και
  - στη βελτιστοποίηση του απ' ευθείας ήχου, αφ' ενός μέσω κεκλιμένου επιπέδου για το ακροατήριο, και αφ' ετέρου μέσω βάθρου ελαφρώς υπερυψωμένου στη θέση του ομιλητού.
- Οι κατασκευές για την υλοποίηση αυτών των στόχων περιγράφονται κατωτέρω.

Η **πτυχωτή ανακλαστική ψευδοροφή** της αίθουσας (Σχ. 1.1 (c)) είναι κατασκευασμένη από γυψοσανίδα πάχους 1.25 cm. Επίσης, τόσο η **πρόσθια παρειά** όσο και οι **πλευρικές παρειές** της αίθουσας είναι **επενδεδυμένες με ηχοανακλαστικές πλάκες MDF** φινιρισμένες με καπλαμά ξύλου (Σχ. 1.2).

Τα **καθίσματα** του ακροατηρίου είναι **ξύλινα**, των οποίων η βάση και η πλάτη **φέρουν στόφα** επενδεδυμένη με ύφασμα· αυτός ο τύπος καθίσματος, μειώνει τη διαφορά στην ακουστική μεταξύ κενής και πλήρους (ακροατηρίου) αίθουσας. Το **δάπεδο** θα επικαλυφθεί με **linoleum** επί σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, για τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης καθώς και για την αποφυγή του φαινομένου της ηχούς προτείνονται οι εξής κατασκευές:

- Επένδυση της πίσω παρειάς** της αίθουσας, περιλαμβανομένης και της όψης των εκεί θυροφύλλων, με διάτρητες **ηχοαπορροφητικές πλάκες** φινιρισμένες με **καπλαμά ξύλου**· οι εν λόγω πλάκες χρησιμοποιούνται σε δύο τύπους όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1(d). Η χρήση ποικίλου ηχοαπορροφητικού, στοχεύει στην εξισορρόπηση της ηχοαπορρόφησης, μεταξύ των διαφόρων περιοχών του φάσματος.
- Εφαρμογή **ηχοαπορροφητικής επένδυσης** στο πίσω τμήμα της ψευδοροφής, η οποία συνίσταται σε διάτρητη γυψοσανίδα πάχους 1.25 cm (Σχ. 1.1 (c)).

Τέλος, **ελαφρά κλίση** ως προς την κατακόρυφο, του **υαλοστασίου** που διαχωρίζει τον **θαλαμίσκο ελέγχου** από την αίθουσα, είναι απαραίτητη για να αποτρέψει εκεί, εν δυνάμει ηχώ.

Με βάση τον ως άνω σχεδιασμό, ο προβλεπόμενος Χρόνος Αντήχησης (RT), έχει ως εξής:

Πίναξ 1.2 Υπολογιστική πρόβλεψη Χρόνου Αντήχησης [s], στο αμφιθέατρο. Πληρότης 2/3

Οκταβικές ζώνες [Hz]					
125	250	500	1000	2000	4000
0,78	0,76	0,78	0,70	0,79	0,77

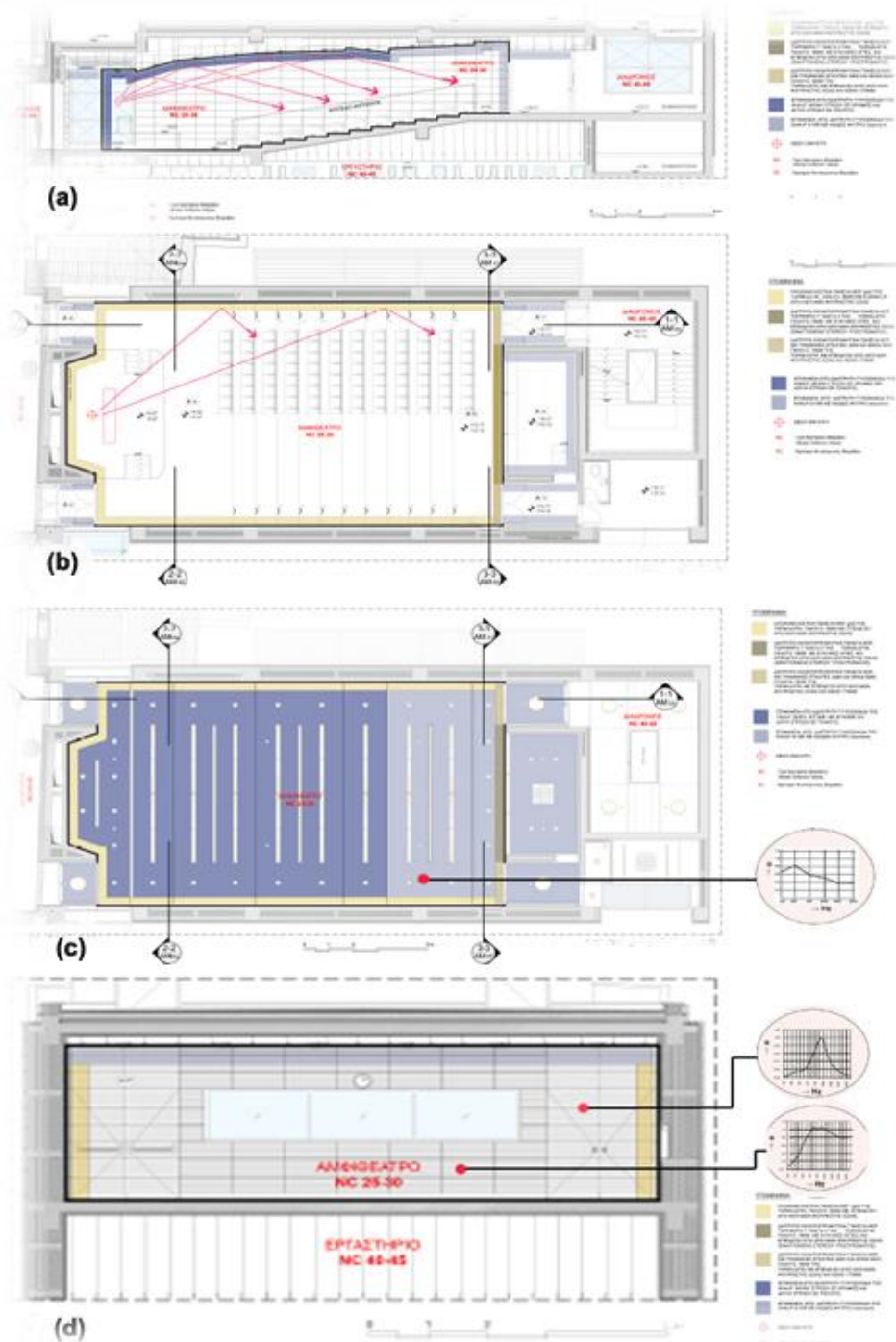
Είναι προφανές ότι οι προβλεπόμενες τιμές του RT ευρίσκονται μέσα στα προβλεπόμενα (επιθυμητά) όρια.

## 2. Σχεδιασμός ηχοπροστασίας του αμφιθεάτρου

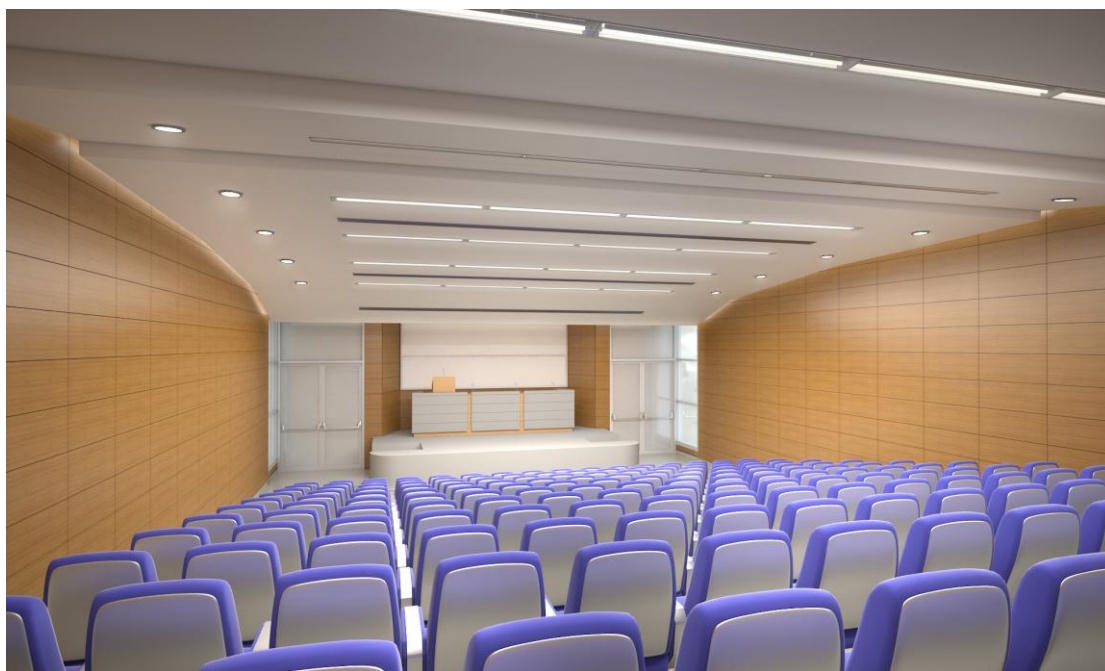
Η μελέτη ηχοπροστασίας, υιοθετεί ως δεκτό όριο θορύβου για το αμφιθέατρο τις στάθμες στη ζώνη NC 25-30. Το άνω όριο θεωρείται ικανοποιητικό, ενώ το κάτω όριο αντιστοιχεί σε πολύ καλές συνθήκες ακρόασης. Ακολουθεί σχολιασμός επιλεκτικά, στοιχείων του εξωτερικού κελύφους του αμφιθεάτρου.

Οι αίθουσες ακροατηρίου κατά κανόνα, σχεδιάζονται χωρίς εξωτερικά ανοίγματα, για λόγους ηχοπροστασίας. Παρόλα αυτά, το παρόν αμφιθέατρο φέρει υαλοπέτασμα στον εξωτερικό τοίχο του καθ' υπόδειξιν του αρχιτέκτονος, βεβαίως με ιδιαίτερη μέριμνα ως προς την ηχομονωτική του κατασκευή. Συγκεκριμένα, το **υαλοπέτασμα** αποτελείται **από δύο υαλοστάσια με ενδιάμεσο κενό 196 mm** (Σχ. 2.1). Έκαστο των υαλοστασίων αποτελείται από δύο φυλλόπηκτους υαλοπίνακες





Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονικά σχέδια του αμφιθεάτρου, (α) Διαμήκης τομή, (β) Κάτοψη, (γ) Κάτοψη οροφής με εν μέρει, διάτρητη γυψοσανίδα KNAUF 6/18R με ινώδες φίλτρο standard, (δ) Όψη πίσω παρειάς του αμφιθεάτρου. Η επιφάνεια της όψης επενδύεται με διάτρητες ηχοαπορροφητικές πλάκες MDF με γραμμικές εγκοπές φινιρισμένες με καπλαμά ξύλου, πάχους 16 mm, σε απόσταση 170mm από στερεό υπόστρωμα, με ορκτοβάμβακα στο κενό πάχους 10mm και βάρους 40kg/m<sup>3</sup>. Οι πόρτες φέρουν διάτρητες ηχοαπορροφητικές πλάκες MDF με κυκλικές σπές ανά 16mm, φινιρισμένες με καπλαμά ξύλου, πάχους 16mm, εφαπτόμενες στερεού υποστρώματος.



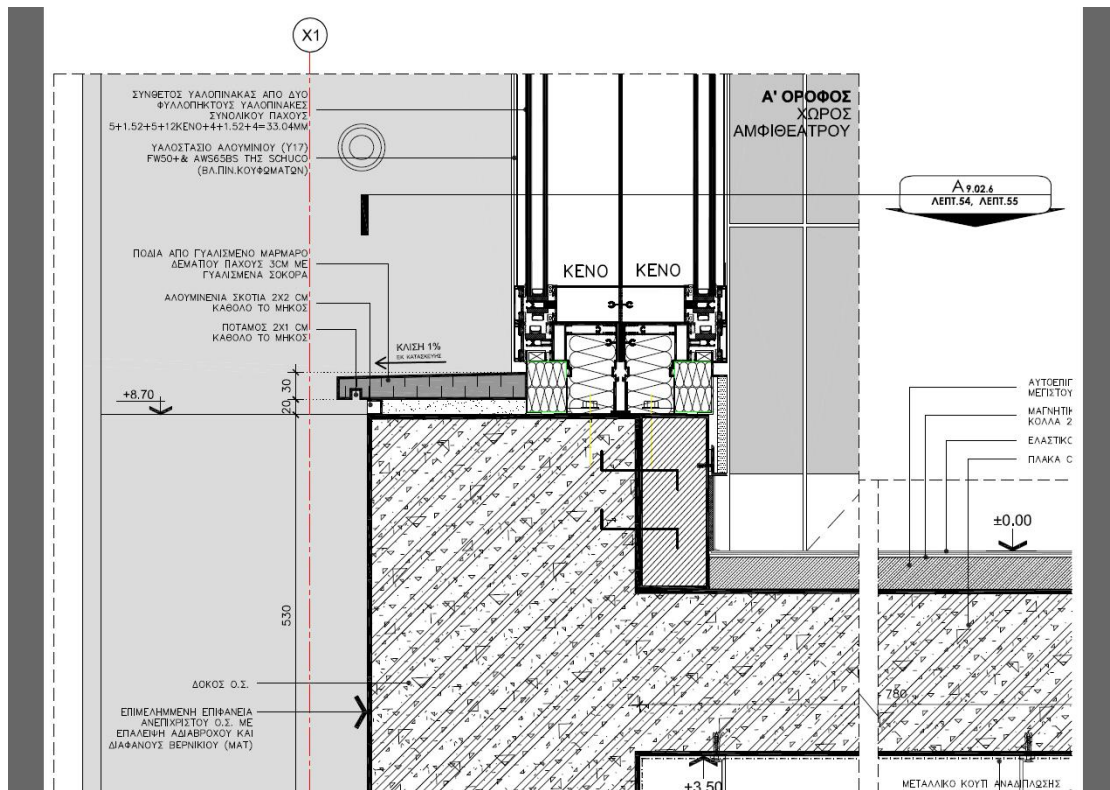
Σχήμα 1.2 Προσομοίωση με Η/Υ πρόσθιας εσωτερικής άποψης του αμφιθεάτρου. [Πλευρικές παρειές από ηχοανακλαστικές πλάκες MDF με καπλαμά ξύλου.]

με περαιτέρω ενδιάμεσο κενό. Ο Σταθμισμένος Δείκτης Ηχομείωσης ( $R_w$ ) εκάστου υαλοστασίου, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι 48 dB. Συνεπώς, η (φαινομένη) ηχομονωτική απόδοση του συνολικού υαλοπετάσματος, στην κατασκευή εκτιμάται άνω των 48 dBA. Με βάση τα ανωτέρω, και δεδομένου ότι στο εξωτερικό (αστικό) περιβάλλον, η στάθμη συνήθων θορύβων δεν υπερβαίνει τα 70 dBA, η προτεινόμενη **κατασκευή του υαλοπετάσματος θεωρείται ικανοποιητική** για πολύ καλές συνθήκες ακρόασης στο αμφιθέατρο.

Περαιτέρω, η **εξωτερική τοιχοποιία** πάχους 60 cm, αποτελείται από δύο μπατικές πλινθοδομές με ενδιάμεσο κενό, και φέρει εξωτερικά επένδυση μαρμάρου, ενώ εσωτερικά της αίθουσας φέρει επένδυση ξύλου. Η θεωρητική ηχομόνωση της κατασκευής εκτιμάται κατ' ελάχιστον στα 55 dB. Με βάση αυτά, και δεδομένου ότι στο εξωτερικό (αστικό) περιβάλλον, η στάθμη συνήθων θορύβων δεν υπερβαίνει τα 70 dBA, **η κατασκευή της εξωτερικής τοιχοποιίας θεωρείται ικανοποιητική** για πολύ καλές συνθήκες ακρόασης στο αμφιθέατρο.

Τέλος, η **στέγαση του αμφιθεάτρου**, είναι δώμα από πλάκα **βέτον** 22 cm επικαλυμμένη με κατασκευές μόνωσης, και με συμβατική ψευδοροφή στο κάτω μέρος της από μονή γυψοσανίδα και κενό ψευδοροφής ποικίλου βάθους μεταξύ 0,20 m και 1,50 m. Η θεωρητική της ηχομόνωση εκτιμάται κατ' ελάχιστον στα 53 dB. Με βάση αυτά, και δεδομένου ότι στο αστικό περιβάλλον η στάθμη συνήθων θορύβων δεν υπερβαίνει τα 70 dBA, **η κατασκευή του δώματος θεωρείται ικανοποιητική** για πολύ καλές συνθήκες ακρόασης στο αμφιθέατρο.

Τέλος, όλες οι **έξοδοι του αμφιθεάτρου** αποτελούνται από δύο επάλληλες **θύρες με παχύ συμπαγές θυρόφυλλο MDF** και με ενδιάμεσο **προθάλαμο (ηχοφράκτη)** με ηχοποροφητική ψευδοροφή. Επίσης για τους **αεραγωγούς** που εξυπηρετούν το αμφιθέατρο, προκειμένου να αποθαρρύνεται η μεταφορά θορύβου μέσω αυτών, προβλέπεται χρήση **ηχοπαγίδων**.



Σχήμα 2.1 Λεπτομέρεια εξωτερικού ναλοστασίου του αμφιθεάτρου. Κούφωμα εξ αλουμινίου τύπου 'FW50' με εκτιμώμενη ηχομόνωση  $R'w > 48$  dB.

### 3. Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός επιχειρεί να βελτιστοποιήσει την καταληπτότητα της φωνής του ομιλητού στο ακροατήριο, με φυσικό τρόπο. Η προσπάθεια βασίζεται στην επιλογή της κατάλληλης μορφής εσωτερικού κελύφους για το αμφιθέατρο, καθώς και στη βελτιστοποίηση τόσο του όγκου του χώρου όσο και του ποσού της εισαγόμενης ηχοαπορρόφησης. Υπολογιστική πρόβλεψη του Χρόνου Αντήχησης (Πίν. 2) επιβεβαιώνει την καταλληλότητα του σχεδιασμού. ως προς τους τεθέντες στόχους. Η στοχευμένη κατασκευή του ναλοπετάσματος στην εξωτερική τοιχοποιία του αίθουσας, πληροί την απαιτούμενη ηχομόνωση. Η χονδροκατασκευή του αμφιθεάτρου, (δηλ. σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου ως προς τη μορφή και συμπαγής βαρέως τύπου ως προς την κατασκευή), αποτελεί αρχιτεκτονική επιλογή που συνάδει με τις ανάγκες για τον ακουστικό σχεδιασμό της αίθουσας. Αυτό στηρίζει την άποψη ότι η ακουστική, ανάλογα με την περίπτωση, είναι δυνατόν να αποτελεί σημαντική παράμετρο της αρχιτεκτονικής σύνθεσης.

### 4. Ευχαριστίες

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τον αρχιτέκτονα, καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτρη Παπαϊωάννου και την μελετητική ομάδα του, για την γόνιμη συνεργασία των και την εκπόνηση μέρους των παρόντων σχεδίων και εικόνων

### 5. Αναφορές

[1] Barron M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design* E&FN SPON, London (1993)

# ***Εργαλεία και τεχνικές μηχανικής μάθησης για την σημασιολογική ανάλυση ήχου***

Νικόλαος Τσίπας<sup>1,a</sup>, Λάζαρος Βρύσης<sup>1,b</sup>, Χαράλαμπος Δημούλας<sup>2,c</sup> & Γεώργιος Παπανικολάου<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ, Α.Π.Θ.

<sup>2</sup> Τμήμα Δημοσιογραφίας & ΜΜΕ, Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [nitsipas@auth.gr](mailto:nitsipas@auth.gr), <sup>b</sup> [lvrysis@auth.gr](mailto:lvrysis@auth.gr), <sup>c</sup> [babis@eng.auth.gr](mailto:babis@eng.auth.gr), <sup>d</sup> [pap@eng.auth.gr](mailto:pap@eng.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται μια επισκόπηση και αξιολόγηση τεχνικών και εργαλείων για την σημασιολογική ανάλυση ηχητικών δεδομένων με μεθόδους μηχανικής μάθησης. Γίνεται αναφορά και διερεύνηση των διαθέσιμων εργαλείων-τεχνικών για την δημιουργία ετικετών, την εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών και την εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης. Πέρα από την καταγραφή των σύγχρονων τάσεων στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, προτείνεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο προσέγγισης προβλημάτων σημασιολογικής ανάλυσης ήχου μέσα από παραδείγματα επίλυσης κλασικών προβλημάτων.*

## ***Tools and machine learning techniques for semantic audio analysis***

### **ABSTRACT**

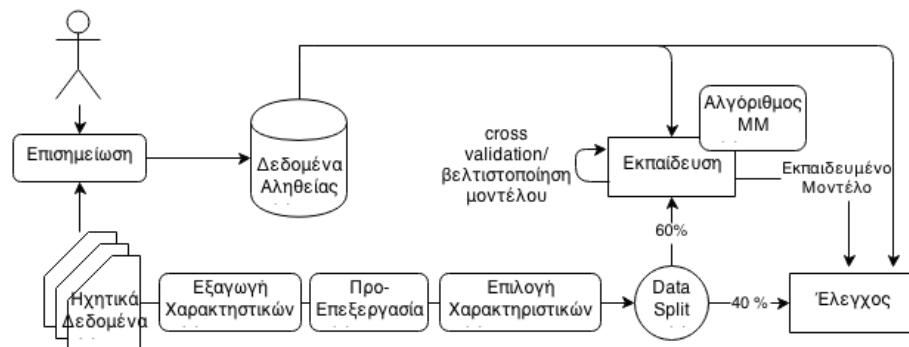
*The purpose of this paper is the review and evaluation of state of the art techniques and tools for the semantic analysis of audio content using Machine Learning algorithms. Available tools and techniques for annotation, audio features extraction and application of machine learning algorithms are referenced and investigated. In addition to reporting the current trends in this research area, a methodological framework for semantic audio analysis is proposed and example solutions to classic problems in the field are provided.*

### **Εισαγωγή / Θεώρηση του προβλήματος**

Με δεδομένη την εκθετική αύξηση του όγκου του διαθέσιμου ψηφιακού πολυμεσικού περιεχομένου και ειδικότερα των ψηφιακών ηχητικών τεκμηρίων,

γίνεται επιτακτική η ανάγκη ύπαρξης μηχανισμών επεξεργασίας του ηχητικού σήματος με σκοπό την εξαγωγή σημασιολογικής πληροφορίας. Η πρόσβαση σε τέτοιου είδους πληροφορία επιτρέπει την ανάπτυξη καινοτόμων μηχανισμών που πολλαπλασιάζουν τις δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου ηχητικής πληροφορίας και παράλληλα προσφέρουν νέους τρόπους αλληλεπίδρασης με το χρήστη. Ενδεικτικά, στο ευρύτερο πεδίο της σημασιολογικής ανάλυσης ήχου περιλαμβάνονται προβλήματα όπως η κατάτμηση ηχητικού σήματος, η αναγνώριση ομιλίας και ομιλητών, η κατηγοριοποίηση πολυμεσικών τεκμηρίων, η ανάλυση συναισθήματος, η εξαγωγή πληροφορίας από την μουσική, κ.α.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας μελετώνται τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος σημασιολογικής ανάλυσης ήχου, διερευνώνται διαθέσιμες υλοποιήσεις σε επίπεδο λογισμικού και προτείνεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο επίλυσης προβλημάτων σημασιολογικής ανάλυσης ήχου μέσα από παραδείγματα.



Σχήμα 1. Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος μηχανικής μάθησης για την σημασιολογική ανάλυση ηχητικού περιεχομένου

## 1. Επισημείωση περιεχομένου & δημιουργία ετικετών(annotations)

Το πρώτο ζήτημα κατά την εφαρμογή μεθόδων μηχανικής μάθησης για τη σημασιολογική ανάλυση ήχου είναι η επισημείωση του ηχητικού περιεχομένου και η δημιουργία ετικετών (annotations) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Η διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια κατάλληλων εργαλείων λογισμικού και οργανώνεται με βάση σχήματα επισημείωσης [1].

Η ανάγκη για την επισημείωση της ηχητικής πληροφορίας δεν είναι καινούρια: εργαλεία έχουν δημιουργηθεί αποκλειστικά για αυτόν το σκοπό, κυρίως για την ανάλυση την ομιλίας. Περιβάλλοντα λογισμικού που εστιάζουν στη διαχείριση αρχείων ήχου προσφέρουν δυνατότητες επισημείωσης υποστηρίζουν λειτουργίες κατάτμησης, δημιουργίας ετικετών, ορθογραφικής και φωνητικής μεταγραφής, συνδυάζουν ευκολίες οπτικοποίησης (κυματομορφή, φασματογράφημα) και ρουτίνες ψηφιακής επεξεργασίας και ανάλυσης (επιτονισμός, ένταση, διάρκεια, διαμορφωτές) της ηχητικής πληροφορίας. Ως χαρακτηριστικές εφαρμογές μπορούν να αναφερθούν: Transcriber, WaveSurfer, PRAAT [2].

Πίνακας 1. Συγκριτικός πίνακας εργαλείων επισημείωσης

<b>Όνομα</b>	Anvil	ELAN	EXMARaLDA	Praat
<b>Ιστοχώρος</b>	www.anvil-software.org	tla.mpi.nl/tools/tla-tools/elan	www.exmaralda.org	www.fon.hum.uva.nl/praat
<b>Χρήση</b>	Πολυτροπική επισημείωση βίντεο/ήχου	Πολυτροπική επισημείωση βίντεο/ήχου	Φωνητική μεταγραφή	Φωνητική/ορθογραφική μεταγραφή
<b>Υλοποίηση</b>	JAVA	JAVA	JAVA	C/C++
<b>Υποστηριζόμενες Πλατφόρμες</b>	Windows, Max OS X, Linux	Windows, Max OS X, Linux	Windows, Max OS X, Linux	Windows, Max OS X, Linux
<b>Ανοιχτού κώδικα</b>	Όχι	Ναι	Όχι	Ναι
<b>Κόστος</b>	Κανένα	Κανένα	Κανένα	Κανένα
<b>Υποστηριζόμενα αρχεία</b>	Βάσει του Java Media Framework	Βάσει του Java Media Framework	Βάσει του Java Media Framework	aiff, aifc, wav, au, nist, flac, mp3
<b>Αποθήκευση δεδομένων</b>	XML	XML	XML	Κείμενο
<b>Εισαγωγή/Εξαγωγή δεδομένων</b>	Tab-Delimited TXT, TextGrid	HTML, Shoebox, CHAT, Tab-Delimited TXT, TextGrid, XML	XML, TextGrid, TASX, ELAN	TextGrid
<b>Έλεγχος βίντεο/ήχου</b>	Καρέ	Χίλιοστό του δευτερολέπτου	Καρέ	Χίλιοστό του δευτερολέπτου

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η ζήτηση για πολυτροπική επισημείωση σε καταγραφές βίντεο (Natural Interactivity and Multimodality - NIMM) [2], με αποτέλεσμα να γίνεται επιτακτική η ανάγκη για χρήση εργαλείων επισημείωσης γενικού σκοπού· παράλληλα με την ηχητική επισήμανση έχουμε και δεδομένα χειρονομιών, εκφράσεων προσώπου και άλλα [3]. Διαφορετικές κατηγορίες επισημείωσης συνδυάζονται για τη βελτιστοποίηση της σημασιολογικής ανάλυσης μιας καταγραφής. Υπό αυτή τη σκοπιά, γίνεται αντιληπτή η δυναμική εργαλείων που υποστηρίζουν πολυτροπική επισημείωση, γι' αυτό στη σύγκρισή που ακολουθεί δε συμπεριλάβαμε μόνο εργαλεία αμιγούς ηχητικής επισημείωσης (Anvil, ELAN) [4].

## 2. Ηχητικά χαρακτηριστικά

Βασική διεργασία κατά την επίλυση προβλημάτων σημασιολογικής ανάλυσης ηχητικών δεδομένων αποτελεί η δημιουργία των διανυσμάτων χαρακτηριστικών (audio feature vectors). Μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατηγοριοποίηση



χαρακτηριστικών που συναντάται στην βιβλιογραφία [5] βασίζεται στον τρόπο υπολογισμού τους (Σχήμα 2) .

Temporal		Spectral		Cepstral
Envelope	Entropy	Roughness		Mel Frequency Cepstral Coefficients
Attack Time	Energy	Brighness	Irregularity	
ZCR	Attack Slope	Flatness	Flux	
Autocorrelation		Chroma	Slope	
		Wavelets	LPC	

Σχήμα 2. Ενδεικτική κατηγοριοποίηση ηχητικών χαρακτηριστικών

Στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα σημασιολογικής ανάλυσης γίνεται συνδυασμός χαρακτηριστικών από τις παραπάνω κατηγορίες ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Συχνά εξάγεται ένα υπερσύνολο διαθέσιμων χαρακτηριστικών και στην συνέχεια εφαρμόζονται αλγόριθμοι αξιολόγησης και επιλογής των πιο κατάλληλων.

### 2.1 Εργαλεία Εξαγωγής Ηχητικών Χαρακτηριστικών

Στον Πίνακα 2 συγκεντρώνονται τα πιο δημοφιλή εργαλεία λογισμικού για την εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών. Στον χώρο της έρευνας τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές ως ανεξάρτητες οντότητες, ενώ αντίθετα σε πιο πρακτικές εφαρμογές τα συναντούμε ενσωματωμένα σε ένα γενικότερο πλαίσιο με την βοήθεια προγραμματιστικών διεπαφών (APIs). Η έξοδος των εργαλείων αυτών είναι συνήθως ένα δομημένο αρχείο κειμένου που περιέχει τα διανύσματα χαρακτηριστικών για κάθε παράθυρο ανάλυσης.

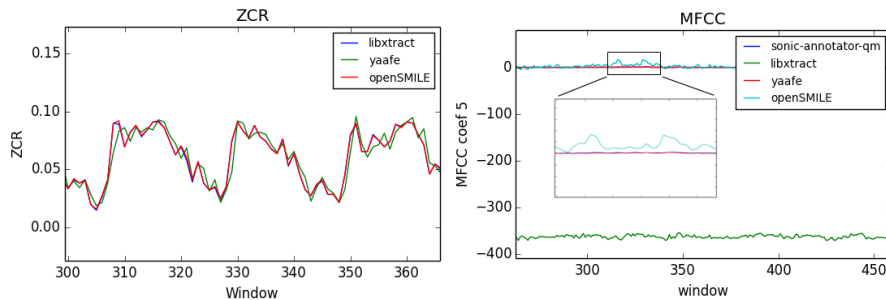
Πίνακας 2: Εργαλεία εξαγωγής ηχητικών χαρακτηριστικών

Όνομα	Γλώσσα	Πρότυπο	CLI	APIs
Sonic Annotator	C++	csv, rdf	✓	C++
Libxtract	C	-	✗	C
Marsyas	C++	arff	✓	C++, Matlab
Yaafe	Python/C++	csv, h5	✓	C++, Matlab, python
jAudio	Java	xml, arff	✓	Java
openSMILE	C++	htk, arff, csv	✓	C++

Το sonic-annotator[6] είναι ένα από τα πλέον καθιερωμένα εργαλεία εξαγωγής χαρακτηριστικών με βασικό πλεονέκτημα τον μεγάλο αριθμό επεκτάσεων (plugins) από τρίτους. Η βιβλιοθήκη Libxtract[7] προσφέρει ένα σύνολο ηχητικών παραμέτρων ωστόσο για να χρησιμοποιηθεί απαιτείται η χρήση του API της βιβλιοθήκης και η συγγραφή κώδικα σε γλώσσα C. Το Marsyas [8] αποτελείται από

ένα σύνολο εργαλείων για την σημασιολογική ανάλυση ήχου που μεταξύ άλλων επιτρέπουν και την εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών. Συνοδεύεται από το bextract που επιτρέπει την εξαγωγή ηχητικών χαρακτηριστικών από την γραμμική εντολών, χωρίς την ανάγκη συγγραφής κώδικα. Το yaafe [9] έχει ως βασικό πλεονέκτημα την υψηλή απόδοση και την πληθώρα προγραμματιστικών διεπαφών. Το jaudio [10] είναι η μοναδική υλοποίηση σε Java η οποία συνοδεύεται και από αντίστοιχο GUI, ωστόσο δεν υποστηρίζεται πλέον από τους δημιουργούς της. Τέλος, το openSMILE [11] επιτρέπει στον χρήστη να παραμετροποιήσει σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών δημιουργώντας pipelines επεξεργασίας. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι και η δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών σε πραγματικό χρόνο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε μια ενδεικτική διερεύνηση σχετικά με το κατά πόσο τα αποτελέσματα της εξαγωγής του ίδιου χαρακτηριστικού με διαφορετικά εργαλεία ταυτίζονται, καθώς συχνά διαφορετικές υλοποιήσεις οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Αριστερά: μηδαιμένες αποκλίσεις για το χαρακτηριστικό ZCR. Δεξιά: Σημαντικές αποκλίσεις για τον 5ο MFCC coefficient

### 3. Εργαλεία και τεχνικές μηχανικής μάθησης

Με δεδομένη την πληθώρα υλοποιήσεων για τους περισσότερους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, πολλές φορές η επίλυση ενός προβλήματος περιορίζεται στην εφαρμογή κάποιου αλγορίθμου στα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Στην πράξη, αυτό οδηγεί αρκετές φορές σε συστήματα με χαμηλή απόδοση και προβλήματα γενίκευσης (generalization). Στο πλαίσιο αυτό αναλύονται τα στάδια μιας γραμμής επεξεργασίας (Σχήμα 1) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής μάθησης.

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας εφαρμόζονται συνήθως μέθοδοι τυποποίησης (standardization) των τιμών κάθε διάστασης του διανύσματος χαρακτηριστικών. Τις περισσότερες φορές εφαρμόζεται κανονικοποίηση με στόχο την απόκτηση μηδενικού μέσου όρου και διακύμανσης ίσης με τη μονάδα για κάθε χαρακτηριστικό [12]. Αυτό αποτρέπει φαινόμενα κατά τα οποία συγκεκριμένα χαρακτηριστικά έχουν μεγαλύτερη επίδραση απ' ό,τι άλλα και παράλληλα μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την σύγκλιση αλγορίθμων μάθησης.

Όπως προαναφέρθηκε, οι παράμετροι ανάλυσης συχνά υπόκεινται σε διαδικασίες αξιολόγησης και επιλογής ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών με σκοπό, αφενός την μείωση της διάστασης του χώρου (dimensionality reduction) και



αφετέρου την διατήρηση των χαρακτηριστικών που συνεισφέρουν περισσότερο (salient features) στον διαχωρισμό των κλάσεων ταξινόμησης [13].

Το τελευταίο στάδιο κατά την επίλυση προβλημάτων μηχανική μάθησης είναι η εκπαίδευση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση του μοντέλου ταξινόμησης. Στο χώρο αυτό υπάρχει ένα αρκετά ευρύ πεδίο διαθέσιμων αλγορίθμων, που εκτείνεται από τους κλασικούς (backpropagation neural networks, logistic regression, k-Nearest Neighbours, naive bayes, decision trees) έως τους πιο σύγχρονους (deep learning neural networks, SVM, random forests) με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εξαρτώνται, εκτός άλλων, και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε προβλήματος. Εκτός από την επιλογή του είδους του αλγορίθμου κρίσιμη είναι και η επιλογή της διαδικασίας εκπαίδευσης ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκπαίδευσης. Η βασική τεχνική που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των παραπάνω φαινομένων είναι η cross-validation [14]. Στον πίνακα 3 γίνεται μια καταγραφή εργαλείων που παρέχουν υλοποιήσεις για τα παραπάνω στάδια επεξεργασίας.

Πίνακας 3. Εργαλεία Μηχανικής Μάθησης

Όνομα	Γλώσσα	GUI	Cluster based	Ανοιχτού Κώδικα
Scikit-learn	Python	✗	✗	✓
WEKA	Java	✓	✗	✓
Matlab	Matlab	✗	✗	✗
Mahout	Java	✓	✓	✓
LabVIEW	G	✓	✗	✗
R	R	✓ (Rattle)	✗	✓

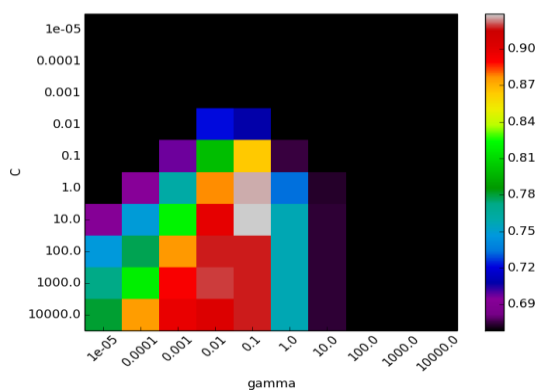
### 3.1 Περίπτωση Μελέτης: Ταξινόμηση δεδομένων ομιλίας / μουσικής

Για την καλύτερη κατανόηση και διερεύνηση του τρόπου αντιμετώπισης προβλημάτων σημασιολογικής ανάλυσης ήχου με την αρχιτεκτονική του Σχήμα 1, θα γίνει επίλυση του κλασικού προβλήματος ταξινόμησης ομιλίας/μουσικής χρησιμοποιώντας το GTZAN music/speech dataset και τον αλγόριθμο ταξινόμησης SVM. Το συγκεκριμένο dataset αποτελείται από 64 αποσπάσματα ομιλίας και 64 αποσπάσματα μουσικής διάρκειας 30 δευτερολέπτων το καθένα (συνολική διάρκεια 64 λεπτά). Για την εκπαίδευση του συστήματος χρησιμοποιείται cross-validation (5-fold). Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με την χρήση του αλγορίθμου SVM. Παρατηρούμε ότι η απόδοση βελτιστοποιείται για την ομάδα χαρακτηριστικών C και για παράθυρο ανάλυσης ίσο με 188 ms.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα απόδοσης SVM ( $C=1$ ,  $\gamma=0.1$ ).  $A=ZCR$ , spectral slope, spectral flux, spectral rolloff, spectral flatness.  $B=13$  MFCC coef,  $C=A+B$ .

	w = 4096 (188ms)			w = 8192 (372 ms)			w = 16384 (752 ms)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
<b>f1-score</b>	0.78	0.88	0.93	0.75	0.88	<b>0.92</b>	0.73	0.87	0.91

Η περαιτέρω αύξηση της απόδοσης του μοντέλου μπορεί να επιτευχθεί με βελτιστοποίηση των τιμών των παραμέτρων  $C$  και  $\gamma$  μέσα από την διαδικασία αναζήτησης πλέγματος (grid search). Η παράμετρος  $C$  καθορίζει την αντιστάθμιση μεταξύ της μεγιστοποίησης του ορίου ταξινόμησης (margin width) και της ανοχής σε λάθος ταξινομημένα δεδομένα, ενώ η παράμετρος  $\gamma$  ορίζει το σχήμα του πυρήνα RBF [15]. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος συναρτήσει των παραμέτρων  $C$  και  $\gamma$ . Οι τιμές για τις παραμέτρους  $C$  και  $\gamma$  που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναζήτηση πλέγματος προέκυψαν από εκθετικά αυξανόμενες αριθμητικές σειρές [16].



Σχήμα 4. Επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων για το μοντέλο SVM με χρήση αναζήτησης πλέγματος. (Βέλτιστη απόδοση για  $C=10$ ,  $\gamma=0.1$ )

#### 4. Συμπεράσματα

Με την εργασία αυτή επιχειρήθηκε η ανάλυση των δομικών στοιχείων συστημάτων σημασιολογικής ανάλυσης ήχου και η εξοικείωση του αναγνώστη με τις μεθόδους επίλυσης αντίστοιχων προβλημάτων. Έγινε μια ενδελεχής επισκόπηση των εργαλείων λογισμικού που χρησιμοποιούνται στα διάφορα στάδια επεξεργασίας με αναφορές στην σχετική βιβλιογραφία. Μέσα από το παράδειγμα ταξινόμησης ομιλίας/μουσικής αφενός αναδείχθηκε ο υψηλός βαθμός πολυπλοκότητας, ακόμη και στην περίπτωση απλών προβλημάτων και αφετέρου προτάθηκε μια δομημένη προσέγγιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια προβλήματα. Συνολικά η εργασία ευελπιστεί να λειτουργήσει ως γνώμονας για ερευνητές χωρίς προηγούμενη εμπειρία στον χώρο της σημασιολογικής ανάλυσης ήχου.

## 5. Αναφορές

- [1] L. Dybkjaer and N. Bernsen, “Data, annotation schemes and coding tools for natural interactivity,” in *INTERSPEECH*, 2002.
- [2] L. Dybkjaer and N. Bernsen, “Towards General Purpose Annotation Tools – How far are we today,” in *LREC*, 2004.
- [3] L. Dybkjaer and N. Bernsen, “Natural Interactivity Resources-Data, Annotation Schemes and Tools,” in *LREC*, 2002.
- [4] K. Rohlfing, D. Loehr, S. Duncan, A. Brown, A. Franklin, I. Kimbara, J.-T. Milde, F. Parrill, T. Rose, T. Schmidt, H. Sloetjes, A. Thies, and S. Wellinghoff, “Comparison of multimodal annotation tools - workshop report,” 2007.
- [5] R. Kotsakis, G. Kalliris, and C. Dimoulas, “Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification,” *Speech Commun.*, vol. 54, pp. 743–762, 2012.
- [6] C. Cannam, C. Landone, and M. Sandler, “Sonic Visualiser : An Open Source Application for Viewing , Analysing , and Annotating Music Audio Files,” in *Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference*, 2010, pp. 1467–1468.
- [7] J. Bullock, “LibXtract: A Lightweight Library for Audio Feature Extraction,” in *Proc. International Computer Music Conference*, 2007
- [8] G. Tzanetakis and P. Cook, “MARSYAS: a framework for audio analysis,” *Organised Sound*, vol. 4, pp. 169–175, 2000.
- [9] B. Mathieu, S. Essid, T. Fillon, J. Prado, and G. Richard, “YAAFE, an Easy to Use and Efficient Audio Feature Extraction Software,” in *Proceedings of the 11th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2010)*, 2010, pp. 441–446.
- [10] C. McKay, I. Fujinaga, and P. Depalle, “jAudio: A feature extraction library,” *Proc. Int. Conf. Music Inf. Retr.*, pp. 600–603, 2005.
- [11] F. Eyben, “openSMILE – The Munich Versatile and Fast Open-Source Audio Feature Extractor Categories and Subject Descriptors,” *Delta*, pp. 1459–1462, 2010.
- [12] S. Aksoy and R. M. Haralick, “Feature normalization and likelihood-based similarity measures for image retrieval,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 22, pp. 563–582, 2001.
- [13] I. K. Fodor, “A survey of dimension reduction techniques,” *Library (Lond)*, vol. 18, pp. 1–18, 2002.
- [14] R. Kohavi, “A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection,” in *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995, vol. 14, pp. 1137–1143.
- [15] M. Boardman and T. Trappenberg, “A Heuristic for Free Parameter Optimization with Support Vector Machines,” *2006 IEEE Int. Jt. Conf. Neural Netw. Proc.*, 2006.
- [16] C.-W. Hsu, C.-C. Chang, and C.-J. Lin, “A Practical Guide to Support Vector Classification,” *BJU Int.*, vol. 101, pp. 1396–400, 2008.

# **Διερεύνηση της δυνατότητας μεταφοράς συναισθηματικής πληροφορίας από το ακουστικό στο οπτικό κανάλι**

Κωνσταντίνος Δρόσος<sup>a</sup> & Ανδρέας Φλώρος<sup>b</sup>

Εργ. Επεξεργασίας Οπτικοακουστικών Σημάτων, Τμ. Τεχνών Ήχου & Εικόνας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο,  
Κέρκυρα

<sup>a</sup>[kdrosos@ionio.gr](mailto:kdrosos@ionio.gr), <sup>b</sup>[floros@ionio.gr](mailto:floros@ionio.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Για την επικοινωνία στις μέρες μας χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά το οπτικό και το ακουστικό κανάλι. Οι τεχνολογικές και επιστημονικές εξελίξεις αναφορικά με το δεύτερο δείχνουν ότι μπορεί να γίνει αναγνώριση αρκετών ειδών πληροφορίας και προσφάτως και συναισθηματικής. Όμως, υπάρχουν άνθρωποι (π.χ. με προβλήματα ακοής) που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποδοτικά το ακουστικό κανάλι για την καθημερινή λήψη πληροφοριών με αποτέλεσμα παράλληλα να αποκόπτονται και από την ηχητικά μεταδιδόμενη συναισθηματική πληροφορία. Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μία πρόταση για την μεταφορά της ηχητικά μεταδιδόμενης συναισθηματικής πληροφορίας στο οπτικό κανάλι μέσω κατάλληλων χρωματισμών χρησιμοποιώντας τη στάθμη της τεχνικής στο πεδίο της αναγνώρισης συναισθημάτων. Η εφαρμογή μίας τέτοιας τεχνικής εκτιμάται ότι θα μπορέσει να αυξήσει την ποιότητα της επικοινωνίας των ανθρώπων με προ-βλήματα ακοής, δίνοντάς τους την ευκαιρία να αντιλαμβάνονται τα συναισθήματα που κανονικά μεταδίδονται μέσω του ακουστικού καναλιού.

## ***Investigation of the Possibility of Mapping Emotional Information from Audio to Visual Channel***

### **ABSTRACT**

*The most prominent elements in modern days communication are the visual and audio channels. Regarding the latter, technological advances portray that the recognition of different kind of information, including emotional, is feasible. But there are people (e.g. with hearing problems) that for regular and everyday usage cannot employ efficiently the auditory channel. The result is that these people tend to be alienated in respect to the transmitted emotional information from the audio channel. In this work the authors present a proposal for the mapping of the emotional information embodied in the auditory channel to proper coloring schemes of the visual information, employing the state of the art in emotion recognition from*

*audio. The application of the presented proposal is believed that will enhance the quality of communication for the people with hearing impairs by giving them the chance to participate (to an extent) in the emotional communication through the audio channel.*

## **Εισαγωγή**

Στις μέρες μας ο ήχος και η εικόνα είναι κυρίαρχα στοιχεία επικοινωνίας. Στις περισσότερες, εάν όχι όλες, εφαρμογές και τρόπους επικοινωνίας η πληροφορία μεταδίδεται μέσω του ακουστικού, μέσω του οπτικού ή και ταυτόχρονα μέσω των δύο καναλιών, π.χ. τηλεόραση, ραδιόφωνο, εφαρμογές Η/Υ και πάντως είδους συσκευές που έχουν οποιοδήποτε είδους διεπαφή χρήστη. Από το πρώτο μπορεί να μεταφερθεί πληροφορία ποικίλων ειδών, όπως σημασιολογικό περιεχόμενο, πληροφορίες για την πηγή, ακόμα και συναισθήματα [1]. Τα τελευταία αποτελούν σημαντική πληροφορία που βοηθά στην εμπύθιση του ανθρώπου και εν γένει επαυξάνουν τόσο την εμπειρία χρήστη όσο και την επικοινωνία [2], [3].

Ο ερευνητικός τομέας της αναγνώρισης συναισθημάτων από μουσικά δεδομένα δεν είναι νέος. Ήδη υπάρχουν εφαρμογές που βοηθούν την κατηγοριοποίηση μεγάλου όγκου δεδομένων μουσικής βάσει του συναισθήματος που αυτά εγείρουν στον ακροατή [4]. Υπάρχουν επίσης αποτελέσματα πάνω στην έρευνα για την αναγνώριση συναισθημάτων από ομιλία και την ανάπτυξη πρωτότυπων εφαρμογών για την διαχείριση κλήσεων έκτακτης ανάγκης [5]. Όμως, μέσω του ηχητικού καναλιού μεταδίδονται και γενικοί ήχοι, δηλαδή μη-μουσικοί και μη-λεκτικοί ήχοι. Παρόλα αυτά, η αναγνώριση συναισθήματος από γενικούς ήχους είναι νέο πεδίο έρευνας [6], χωρίς την παρουσία κάποιας υλοποιημένης εφαρμογής αλλά με δημοσιευμένες εργασίες οι οποίες δείχνουν ότι κάτι τέτοιο είναι εφικτό [7]. Σε κάθε περίπτωση, δηλαδή μουσικής, ομιλίας ή/και γενικών ήχων, απαιτείται η ορθή λειτουργία του ακουστικού οργάνου από τον ακροατή.

Μία μερίδα ανθρώπων δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το ακουστικό κανάλι για την επικοινωνία τους, π.χ. για λόγους υγείας. Έτσι, αποκόπτονται από την λήψη της πληροφορίας που μεταδίδει το κανάλι αυτό, όπως στίχους σε ένα μουσικό κομμάτι, μελωδία, έκτακτες ανακοινώσεις, συναισθήματα. Έχουν παρουσιαστεί διάφορες προτάσεις για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος όπως η χρήση της νοηματικής γλώσσας σε πολυμεσικές εφαρμογές για την οπτικοποίηση των λέξεων [8], η χρήση ενισχυμένου ήχου σε υψηλές στάθμες και χαμηλές συχνότητες για την αντίληψη της μουσικής ως δονήσεις [9] και οπτικών σημάνσεων για έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. ειδοποίηση για φωτιά). Παρόλα αυτά, δεν έχει αναφερθεί η οπτική αναπαράσταση των συναισθημάτων που εγείρονται και μεταδίδονται από τα ηχητικά δεδομένα. Κάτι τέτοιο προϋποθέτει αφενός την αναγνώριση συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα και αφετέρου την αναπαράστασή/μετάδοσή τους με την χρήση του οπτικού καναλιού.

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται ένα πλαίσιο εργασίας για την μεταφορά στο οπτικό κανάλι της συναισθηματικής πληροφορίας που εμπεριέχεται στο ακουστικό. Η αναγνώριση της πληροφορίας αυτής θα πραγματοποιείται με σύγχρονες τεχνικές αναγνώρισης συναισθήματος από ηχητικά δεδομένα ενώ η αναπαράσταση/μεταφορά της στο οπτικό κανάλι με την χρήση κατάλληλων χρωμάτων και χρωματισμών για την έγερση των στοχευμένων συναισθημάτων στον θεατή. Προς αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται νέα ευρήματα πάνω στον χώρο της αναγνώρι-

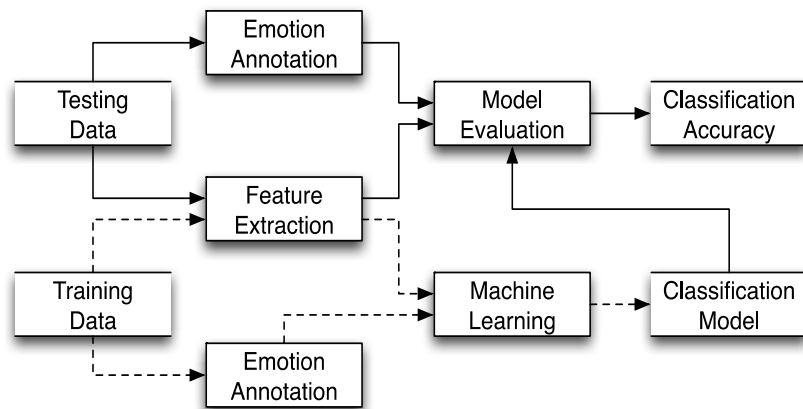
σης συναισθημάτων από γενικούς ήχους αλλά και πρόσφατα αποτελέσματα από τον χώρο της αναγνώρισης συναισθημάτων από μουσική και ομιλία καθώς και της μετάδοσης συναισθημάτων με την χρήση χρωμάτων. Η υπόλοιπη εργασία είναι διαρθρωμένη ως εξής: στην Ενότητα 1 είναι μία επισκόπηση των πρόσφατων ευρημάτων του ευρύτερου τομέα της αναγνώρισης και μετάδοσης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα και χρώματα, αντιστοίχως. Στην Ενότητα 2 παρουσιάζεται το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας ενώ στην Ενότητα 3 αναλύονται και παρουσιάζονται πιθανές εφαρμογές. Τέλος, στην Ενότητα 4 είναι ο επίλογος.

## 1. Αναγνώριση και μετάδοση συναισθημάτων

Για την παρουσίαση του προτεινόμενου πλαισίου εργασίας απαιτείται η αναγνώριση συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα και η αναπαράστασή τους με κατάλληλα χρώματα. Έτσι, σε αυτή την Ενότητα παρουσιάζεται μία σύντομη επισκόπηση των πεδίων της αναγνώρισης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα και της πρόκλησης συναισθημάτων στον θεατή με χρήση κατάλληλων χρωμάτων.

### 1.1 Αναγνώριση συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα

Η αναγνώριση συναισθήματος από ηχητικά δεδομένα μπορεί να θεωρηθεί ως μία διεργασία μηχανικής μάθησης όπου τα βασικά του στοιχεία είναι τα συναισθηματικά επισημασμένα δεδομένα, το χρησιμοποιούμενο μοντέλο συναισθημάτων και τα εξαγόμενα τεχνικά χαρακτηριστικά από τα δεδομένα [7]. Μία γενική περιγραφή της διαδικασίας μπορεί να φανεί στο Σχήμα 1.1.



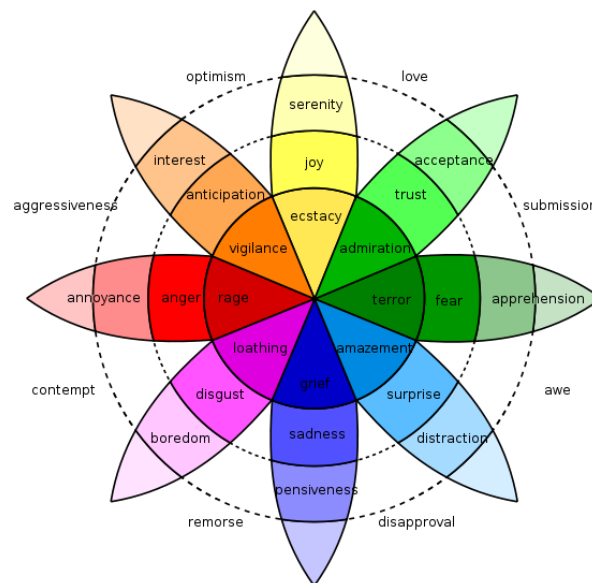
Σχήμα 1.1. Η γενική διαδικασία αναγνώρισης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η διαδικασία της εκπαίδευσης.

Υπάρχουν ήδη κάποιες δημοσιευμένες έρευνες που αφορούν στην προαναφερθείσα αναγνώριση, τόσο από ομιλία, όσο και από μουσική και ηχητικά γεγονότα [10]. Η επιτυχία αναγνώρισης φθάνει και έως 80%, 90% και 89% αντιστοίχως [7], [10]. Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα καλύπτουν μεγάλο εύρος και στις 3

περιπτώσεις, δηλαδή ομιλία [11], μουσική [12], ηχητικά γεγονότα [13] ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά μπορούν να εξαχθούν από διάφορα υπολογιστικά πλαίσια εργασίας [14].

### 1.2 Μετάδοση συναισθημάτων με την χρήση χρωμάτων

Η αναγνώριση συναισθημάτων μπορεί να γίνει και από δεδομένα εικόνας [2], [3]. Πρόσφατες έρευνες παρουσιάζουν την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή του επηρεασμού συναισθημάτων σε θεατές. Αυτό επιτυγχάνεται και με την χρήση χρωμάτων [3] χρησιμοποιώντας την αντιστοιχία τους με συναισθήματα [15]. Ενδεικτικά, στο [3] προτείνεται η χρήση του συναισθηματικού κύκλου των χρωμάτων [15], που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2, για να εγείρει συναισθήματα σε θεατές και αναγνώριση των συναισθημάτων που προκλήθηκαν μέσω των εκφράσεων του προσώπου. Σε άλλη εργασία [16] προτείνεται ξανά η χρήση της θεωρίας του συναισθηματικού κύκλου των χρωμάτων και ο κατάλληλος χρωματισμός εικόνων για την δημιουργία συγκεκριμένων συναισθημάτων στον θεατή.



Σχήμα 1.2. Ο συναισθηματικός κύκλος των χρωμάτων

Με βάση τα παραπάνω, συνδυάζοντας την στάθμη της τεχνικής στην αναγνώριση συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα με την μεταφορά των πρώτων μέσω των χρωμάτων, σε αυτό το άρθρο προτείνεται ο συνδυασμός της αναγνώρισης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα και της στοχευμένης διέγερσης συναισθημάτων με την χρήση χρωμάτων. Το αποτέλεσμα-στόχος θα είναι η μεταφορά της συναισθηματικής πληροφορίας του ηχητικού καναλιού στο οπτικό κανάλι και η

ενεργή υποβοήθηση ανθρώπων με προβλήματα ακοής στο να μετέχουν στην επικοινωνία συναισθηματικής πληροφορίας που μεταδίδεται από το ηχητικό κανάλι.

Πιθανές χρήσεις του παραπάνω πλαισίου μπορεί να είναι η επαύξηση της εμπειρίας του θεατή με προβλήματα ακοής σε μία κινηματογραφική ταινία (π.χ. με την χρήση κατάλληλα χρωματισμένων υποτίτλων) και η καλύτερη εμπύθιση του ανθρώπου σε εικονικά (και μη) περιβάλλοντα όπου χρησιμοποιείται το ηχητικό κανάλι για την μεταφορά συναισθηματικής πληροφορίας (π.χ. βίντεο-παιχνίδια, εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας) με την χρήση φωτισμού βάθους κατάλληλου χρώματος.

## 2. Το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας

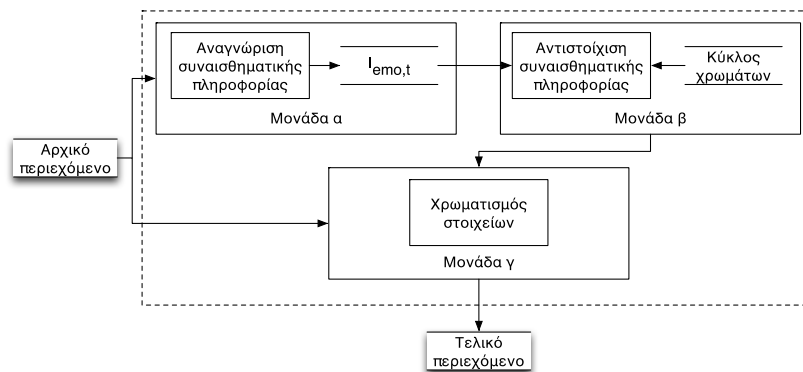
Το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας αφορά οποιουδήποτε είδους πολυμεσικό περιεχόμενο (Cont) το οποίο αποτελεί και την είσοδο στο σύστημα που θα υλοποιεί το εν λόγω πλαίσιο. Η εφαρμογή του πλαισίου θα έχει ως αποτέλεσμα, ήτοι έξοδο, μία παραλλαγή του Cont στην οποία θα έχουν επεξεργαστεί χρωματικά κάποια επιλεγμένα στοιχεία, αναλόγως της εφαρμογής που αφορά το Cont. Από άποψη αρχιτεκτονικής συστημάτων, το εν λόγω πλαίσιο μπορεί να αναλυθεί σε 3 βασικές λειτουργικές μονάδες, ήτοι: α) μονάδα αναγνώρισης συναισθημάτων από ηχητικά δεδομένα, β) μονάδα αντιστοίχισης συναισθημάτων και γ) μονάδα χρωματισμού και αναπαραγωγής.

Στην πρώτη μονάδα υλοποιείται η αναγνώριση συναισθήματος από τα ηχητικά δεδομένα. Έχοντας ως δεδομένο ότι το Cont αποτελείται από 2 υποσύνολα, ήτοι  $Cont_{aud}$  και  $Cont_{vid}$  όπου είναι το ηχητικό και οπτικό περιεχόμενο αντιστοίχως, το  $Cont_{aud}$  αναλύεται και εξάγεται η συναισθηματική πληροφορία σε χρονικά κβάντα  $t$ ,  $I_{emo,t}$  από τα ηχητικά δεδομένα βάσει των υφιστάμενων τεχνικών που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1. Η αποτύπωση της εξαγόμενης πληροφορίας γίνεται με την χρήση ενός συνεχούς μοντέλο συναισθημάτων, ως το συχνότερα και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο και στις 3 κατηγορίες ηχητικών δεδομένων (ομιλία, μουσική, ηχητικά γεγονότα) [1] και χρησιμοποιείται στις επόμενες διαδικασίες του πλαισίου.

Στην μονάδα αντιστοίχισης συναισθημάτων, η  $I_{emo,t}$  χρησιμοποιείται σε συνεργασία με τον συναισθηματικό κύκλο των χρωμάτων [15] με σκοπό να αντιστοιχηθούν οι συναισθηματικές καταστάσεις/συνιστώσες της  $I_{emo}$  σε λεκτικές περιγραφές του συναισθηματικού κύκλου των χρωμάτων. Έτσι, σχηματίζεται ένα σύνολο χρωμάτων  $C_{emo,t}$  για κάθε χρονικό κβάντο  $t$  που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την μετάδοση της συναισθηματικής πληροφορίας του ηχητικού καναλιού από το οπτικό.

Το  $C_{emo,t}$  χρησιμοποιείται στην τρίτη και τελευταία μονάδα του πλαισίου για τον χρωματισμό στοιχείων του  $Cont_{vid}$ . Αναλόγως την εφαρμογή στην οποία υπάρχει το Cont τα στοιχεία αυτά διαφοροποιούνται, χρωματίζονται αναλόγως το  $C_{emo,t}$  και πλέον αναπαράγεται το τροποποιημένο και τελικό περιεχόμενο της πολυμεσικής εφαρμογής. Όλη η προαναφερθείσα περιγραφή φαίνεται στο Σχήμα 2.1 όπου απεικονίζεται συνολικά το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας.





Σχήμα 2.1. Το προτεινόμενο πλαίσιο εργασίας

### 3. Πιθανές εφαρμογές

Οι πιθανές εφαρμογές του προτεινόμενου πλαισίου εστιάζουν κυρίως στην επεξεργασία πολυμεσικού περιεχομένου. Συνεπώς, οι κύριοι τομείς εφαρμογής είναι η ψυχαγωγία και η πληροφόρηση ενώ θα μπορούσε να γίνει επέκταση σε άλλους. Αναφορικά με το περιεχόμενο πολυμεσικών εφαρμογών ψυχαγωγίας, το προτεινόμενο πλαίσιο θα μπορούσε να επαυξήσει σε σημαντικό βαθμό αφενός την αποδοχή και αναζήτηση περιεχομένου και αφετέρου την εμπειρία χρήστη για και από ανθρώπους με απώλεια ακοής.

Πιθανές υλοποιήσεις μπορούν να περιλαμβάνουν:

- Χρωματισμό υποτίτλων σε ταινίες, όπου οι υπότιτλοι θα χρωματίζονται αναλόγως το κυρίαρχο συναίσθημα στην εκάστοτε χρονική στιγμή. Έτσι, ο θεατής που δεν θα μπορεί να λάβει την συναισθηματική πληροφορία από το ηχητικό κανάλι θα την λαμβάνει για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή από το αντίστοιχο χρώμα των υποτίτλων που εμφανίζονται στις εκδόσεις ταινιών για ανθρώπους με απώλεια ακοής
- Χρωματικά εφέ/χρωματισμός οπτικού περιεχομένου, όπου στο οπτικό περιεχόμενο θα εισάγεται χρωματική πληροφορία, π.χ. με την χρήση ambient χρωμάτων, αναλόγως το κυρίαρχο συναίσθημα. Έτσι, ο χρήστης μίας εφαρμογής, π.χ. video game, θα συμμετέχει στον συναισθηματικό/σεναριακό σχεδιασμό της εφαρμογής μέσω της μετάδοσης της συναισθηματικής πληροφορίας από το οπτικό κανάλι. Η διαφορά με την προηγούμενη εφαρμογή συνίσταται στο γεγονός πως στις ταινίες δεν θα αλλοιώνεται το οπτικό περιεχόμενο αλλά μόνο ο χρωματισμός των υποτίτλων.
- Χρωματισμός ενδείξεων, όπου σε οποιαδήποτε διεπαφή χρήστη χρησιμοποιείται το ακουστικό κανάλι για την μετάδοση πληροφορίας που εμφανώς οδηγεί σε συναισθηματική αλληλεπίδραση με τον χρήστη (π.χ. ένδειξη κινδύνου) τότε οι οποιεσδήποτε οπτικές ενδείξεις της διεπαφής θα χρωματίζονται με σκοπό να ανταποκρίνονται στην επιθυμητή συναισθηματική αλληλεπίδραση

#### 4. Επίλογος

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η επικοινωνία της συναισθηματικής πληροφορίας που εμπεριέχεται στο ακουστικό κανάλι μέσω του οπτικού. Για τον σκοπό αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ευρήματα, προτάσεις και πλαίσια εργασίας από τα πεδία αναγνώρισης συναισθημάτων στον ήχο και στην εικόνα και η χρήση της αντίστροφης διαδικασίας, δηλαδή της πρόκλησης συναισθημάτων. Έτσι, η συναισθηματική πληροφορία που μεταδίδεται από το ακουστικό κανάλι θα αναγνωρίζεται και θα μεταδίδεται από το οπτικό.

Για την εφαρμογή των ανωτέρω προτάθηκε ένα πλαίσιο εργασίας. Η υιοθέτησή του είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει στην μείωση των διαφορών της εμπειρίας χρήσης σχεδόν όλων των σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών μεταξύ των ανθρώπων με απώλεια ακοής και των υγιών.

Έτσι, ως πρόταση μελλοντικής εργασίας και έρευνας θα μπορούσε να είναι η πρακτική εφαρμογή του προτεινόμενου πλαισίου σε ρεαλιστικές καταστάσεις και η έρευνα για την αποδοχή και την επαύξηση της εμπειρίας χρήσης των ανθρώπων με απώλεια ακοής.

#### 5. Αναφορές

- [1] K. Drosos, A. Floros, N.G. Kanellopoulos «Affective Acoustic Ecology: Towards Emotionally Enhanced Sound Events» in Proceedings of the 7th Audio Mostly Conference: A Conference on interaction with Sound, A- CM, Σελίδες 109 – 116 (2012)
- [2] E. L. C. Law, V. Roto, M. Hassenzahl, A. P. Vermeeren, J. Kortat «Understanding, scoping and defining user experience: A survey approach» in Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09), ACM, Σελίδες 719 – 728 (2009)
- [3] S. Ryoo ,J. K. Chang «Emotion affective color transfer using feature based facial expression recognition» Advanced Science and Technology Letters, 39, Σελίδες 131–135 (2013)
- [4] AllMusic | Music Search, Recommendations, Videos and Reviews, [www.allmusic.com](http://www.allmusic.com), προσπελάστηκε στις 02/09/2014
- [5] A. V. Petrushin «Emotion in Speech: Recognition and Application to Call Centers» in Proceedings of Conference on Artificial Neural Networks in Engineering (ANNIE 'A99), Σελίδες 7 – 10 (1999)
- [6] F. Weninger, F. Eyben, B. W. Schuller, M. Mortillaro, K. R. Scherer «On the acoustics of emotion in audio: What speech, music and sound have in common» Frontiers in Psychology, 4 (2013)
- [7] K. Drossos, R. Kotsakis, G. Kalliris, A. Floros «Sound Events and Emotions: Investigating the Relation of Rhythmic Characteristics and Arousal» in Proceedings of Intelligent Information Systems and Applications (IISA), IEEE (2013)
- [8] T. M. U. De Araújo et al «An approach to generate and embed sign language video tracks into multimedia contents» Information Sciences: an International Journal, 281, Σελίδες 762 – 780 (2014)
- [9] J. Phillips-Silver et al «Born to dance but beat deaf: A new form of congenital amusia» Neuropsychologia, 49, Σελίδες 961 – 969 (2011)

- [10] D. D. Joshi, P. M. b. Zalte «Speech emotion recognition: A review» IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 4, Σελίδες 34 – 37 (2013)
- [11] G. McKeown, M. Valstar, R. Cowie, M. Pantic, M. Schroder « The SE-MAINE Database: Annotated Multimodal Records of Emotionally Colored Conversations between a Person and a Limited Agent» Affective Computing Transactions, 3, Σελίδες 5 –17 (2012)
- [12] G. Tzanetakis, P. Cook «Musical genre classification of audio signals» Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, 10, Σελίδες 293 – 302 (2002)
- [13] M. M. Bradley, P. J. Lang «The international affective digitized sounds (2nd edition; iads-2): Affective ratings of sounds and instruction manual» NIMH Center for the Study of Emotion and Attention, Gainesville, FL, Tech. Rep. B-3 (2007)
- [14] O. Lartillot, P. Toiviainen «A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio» in International Conference on Digital Audio Effects (2007).
- [15] C. Parkhurst, R. L. Feller «Who invented the color wheel?» Color Research and Application, 7 (1982)
- [16] L. Hea, H. Qia, R. Zaretskib «Emotion transfer for images based on color combinations» Computer Vision and Pattern Recognition (2013)

## ***SpeakGreek: Ανάπτυξη διαδικτυακού συστήματος εκπαίδευσης της ομιλίας***

Κ. Νικολαΐδου<sup>1,a</sup>, Γ. Παπανικολάου<sup>2,b</sup>, Κ. Αβδελίδης<sup>2,c</sup>, Ε. Καϊναδά<sup>d</sup>, Α.  
Σφακιανιάκη<sup>e</sup>, Λ. Βρύση<sup>2,f</sup>, Κ. Κωσταντουδάκης<sup>2,g</sup>, Ι. Σταρτσένκο<sup>h</sup> & Ε. Κέλμαλη<sup>1,i</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Αγγλικής Γλώσσας και Φιλολογίας, Α.Π.Θ

<sup>2</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΑΠΘ

<sup>a</sup> [knicol@enl.auth.gr](mailto:knicol@enl.auth.gr), <sup>b</sup> [pap@eng.auth.gr](mailto:pap@eng.auth.gr), <sup>c</sup> [avdel@auth.gr](mailto:avdel@auth.gr), <sup>d</sup> [ekainada@cc.uoi.gr](mailto:ekainada@cc.uoi.gr), <sup>e</sup> [anna.sfak@gmail.com](mailto:anna.sfak@gmail.com),  
<sup>f</sup> [Ivrysis@auth.gr](mailto:Ivrysis@auth.gr), <sup>g</sup> [kkonstant@ee.auth.gr](mailto:kkonstant@ee.auth.gr), <sup>h</sup> [terrybear@gmail.com](mailto:terrybear@gmail.com), <sup>i</sup> [ekelmali@yahoo.com](mailto:ekelmali@yahoo.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία παρουσιάζει τη δομή και τις πρώτες εφαρμογές του SpeakGreek, ενός διαδικτυακού συστήματος εκπαίδευσης της ομιλίας με τη χρήση βιοανατροφοδότησης για εφαρμογές στην ξενόγλωσση εκπαίδευση και την κλινική παρέμβαση σε άτομα με διαταραχές ομιλίας. Στόχος του εργαλείου είναι να παρέχει εκπαίδευση στην πρόσληψη και παραγωγή βασικών τεμαχιακών και υπερτεμαχιακών στοιχείων της ελληνικής γλώσσας. Η ανάπτυξη του εργαλείου βασίζεται στην ανάλυση ακουστικών και αρθρωτικών δεδομένων της ελληνικής και στην χρήση εφαρμογών τεχνολογίας λόγου συμπεριλαμβανομένης της αυτόματης αναγνώρισης φωνής για την παροχή αξιολόγησης.*

### ***SpeakGreek: Development of an online speech training tool***

#### **ABSTRACT**

*This paper presents the structure and first applications of SpeakGreek, an online biofeedback speech training tool that can be used in second/foreign language education and in clinical intervention for individuals with speech disorders. The tool provides training in the perception and production of key segmental and suprasegmental aspects of Greek. The development of the tool is based on the analysis of acoustic and articulatory data of Greek and on the use of speech technology applications including automatic speech recognition.*

## Εισαγωγή

Η παραγωγή προφορικού λόγου αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία η οποία συνδυάζει γνωσιακές, γλωσσικές και φωνητικές/αρθρωτικές δεξιότητες. Τόσο σε άτομα που μαθαίνουν μια δεύτερη/ξένη γλώσσα όσο και σε άτομα με διαταραχές της ομιλίας, η παραγωγή κατανοητού και καταληπτού προφορικού λόγου είναι εξαιρετικά σημαντική για την επιτυχή τους επικοινωνία. Έτσι, είναι απαραίτητη η εκπαίδευσή τους σε βασικά στοιχεία της γλώσσας όπως οι ήχοι της (φωνήεντα, σύμφωνα) καθώς και ο τόνος, επιτονισμός και ρυθμός της γλώσσας. Πέρα από τα παραδοσιακά μοντέλα διδασκαλίας της προφοράς μιας γλώσσας σε αλλόγλωσσους μαθητές και της κλινικής παρέμβασης σε άτομα με διαταραχές ομιλίας, οι εξελίξεις στην τεχνολογία της ομιλίας με τη χρήση υπολογιστών και εξειδικευμένων λογισμικών έχουν δώσει τη δυνατότητα για περαιτέρω εκπαίδευση στην ξενόγλωσση τάξη και στην κλινική. Μια βασική αρχή που διέπει τη χρήση τέτοιων εκπαιδευτικών εργαλείων είναι η «οπτικοποίηση της ομιλίας» [1], δηλαδή η δυνατότητα που δίνεται στο χρήστη να δει στοιχεία της παραγωγής του στην οθόνη του υπολογιστή έτσι ώστε να μπορεί να τα αντιληφθεί και να τα διαφοροποιήσει. Για παράδειγμα, φασματογραφήματα φωνηέντων και συμφώνων, απεικονίσεις της βασικής συχνότητας σε πραγματικό χρόνο, κίνηση της γλώσσας με τη χρήση συστημάτων υπέρηχου, επαφή της γλώσσας με τον ουρανίσκο σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση του ηλεκτροπαλατογράφου αποτελούν τύπους βιοανατροφοδότησης. Η βιοανατροφοδότηση έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες διαταραχές της ομιλίας, π.χ. βαρηκοΐα-κώφωση, διαταραχές άρθρωσης, φώνησης κτλ. καθώς και στη διδασκαλία της προφοράς της ξένης γλώσσας (π.χ. [1]–[3]).

Ποικίλα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή βιοανατροφοδότησης, π.χ. λογισμικά ακουστικής ανάλυσης, ειδικές τεχνικές καταγραφής αρθρωτικών δεδομένων, ειδικά εκπαιδευτικά λογισμικά, μερικά εκ των οποίων είναι ελεύθερα προσβάσιμα και άλλα εμπορικά διαθέσιμα (βλ. π.χ. [4]–[6], κ.ά.). Ειδική κατηγορία των παραπάνω, στην οποία και εντάσσεται και το εν λόγω πρόγραμμα, αποτελεί αυτή των εργαλείων που αξιοποιούν αποκλειστικά ηχητικό σήμα για την εκτίμηση βιοανατροφοδότησης (βλ. [7], [8], κ.ά.). Τα εργαλεία αυτά αν και παρέχουν ευκολία εφαρμογής (απαιτείται μόνο μικρόφωνο και επεξεργαστική ισχύς), υποφέρουν από ζητήματα αξιοπιστίας της βιοανατροφοδότησης, ιδιαιτέρως όσον αφορά την αρθρωτική πληροφορία. Αυτό οφείλεται στο ότι για το σύνολο των φωνητικών ήχων αφενός η μετάδοσή τους γίνεται μέσω ενός καναλιού που εύκολα πλήττεται από θόρυβο και αφετέρου δεν υπάρχει αναλυτική αντιστρέψιμη μοντελοποίηση ως προς τα αρθρωτικά χαρακτηριστικά. Τα παραπάνω αποτελούν τον πυρήνα των τεχνικών προκλήσεων που καλείται να αντιμετωπίσει το παρουσιαζόμενο σύστημα.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την βασική δομή και τους στόχους του SpeakGreek, ενός διαδικτυακού εργαλείου εκπαίδευσης της ομιλίας το οποίο συνδυάζει την παροχή της βιοανατροφοδότησης και την αυτόματη αναγνώριση φωνής για την εκπαίδευση και αξιολόγηση της ομιλίας του χρήστη.

## 1. Δομή του εκπαιδευτικού εργαλείου

Ο σχεδιασμός τους εκπαιδευτικού εργαλείου περιλαμβάνει (α) την παροχή βασικού υπόβαθρου για την παραγωγή των ήχων και επιλεγμένων υπερτεμαχιακών στοιχείων της ελληνικής, και (β) την εκπαίδευση η οποία αρχικά εστιάζει σε βασικές παραμέτρους της ομιλίας και σταδιακά επεκτείνεται στην εξάσκηση ήχων, συλλαβών, λέξεων και φράσεων/προτάσεων με τη χρήση της βιοανατροφοδότησης και την παροχή αξιολόγησης. Συγκεκριμένα, το εκπαιδευτικό εργαλείο αποτελείται από τα εξής 4 μέρη:

**α) Φωνητική βιβλιοθήκη**, η οποία παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για την άρθρωση των ήχων και επίσης οπτικοποιεί την άρθρωση τους με τη χρήση κινούμενων φωνητικών οδών, βιντεοσκοπημένων ομιλητών, καθώς και δεδομένων ηλεκτροπαλατογράφου και υπέρηχου για επιλεγμένους ήχους.

**β) Βασική εκπαίδευση**, η οποία παρέχει εκπαίδευση σε βασικές παραμέτρους της ομιλίας με τη χρήση βιοανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο και την αξιολόγηση της προσπάθειας. Συγκεκριμένα περιλαμβάνεται εξάσκηση στα εξής:

1. Φώνηση: παραγωγή ηχηρών/άηχων φθόγγων και εναλλαγή τους
2. Διάρκεια φώνησης
3. Έλεγχος και αυξομείωση τονικού ύψους
4. Έλεγχος και αυξομείωση έντασης

Το

Σχήμα 1.1 παρουσιάζει την απεικόνιση μέρους των ασκήσεων (1) και (3) στην οθόνη του υπολογιστή.



Σχήμα 1.1. Ασκήσεις για πρακτική στην παραγωγή ηχηρών ήχων (αριστερά) και για πρακτική στην αυξομείωση του τονικού ύψους (δεξιά).

**γ) Οι ήχοι της γλώσσας μου.** Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εξασκηθεί με τη χρήση βιοανατροφοδότησης και να λάβει αξιολόγηση στην αντίληψη και παραγωγή μεμονωμένων ήχων, συλλαβών και λέξεων. Το

Σχήμα 1.2 παρουσιάζει ένα πρότυπο εφαρμογής που αφορά στην εξάσκηση της παραγωγής μεμονωμένων φωνηέντων. Επιπλέον ασκήσεις συμπεριλαμβάνουν την αντίληψη και παραγωγή συλλαβών, και ελάχιστων ζευγών (π.χ. θύμα-σήμα) τόσο μεμονωμένων όσο και σε προτασιακό πλαίσιο.



Σχήμα 1.2. Άσκηση για πρακτική στην παραγωγή μεμονωμένων φωνηέντων (αριστερά: απλή έκδοση, δεξιά: εικονογραφημένη έκδοση)

(δ) **Η μελωδία της γλώσσας μου.** Στόχος είναι η εξάσκηση στην αντίληψη και παραγωγή του τόνου και επιτονισμού της ελληνικής. Η εξάσκηση του τόνου βασίζεται σε ελάχιστα ζεύγη (π.χ. νόμο-νομό) και η εξάσκηση στον επιτονισμό περιλαμβάνει ασκήσεις εστίασης, ερωτήσεων ολικής και μερικής αγνοίας, επιτονισμό συνεχείας, έκφραση ευγένειας/αγένειας.

## 2. Διάδοση

Το εκπαιδευτικό εργαλείο πρόκειται να είναι ανοιχτό διαδικτυακά για χρήση από δασκάλους και λογοθεραπευτές σε πολλά διαφορετικά εκπαιδευτικά περιβάλλοντα: σχολεία για τυπικούς και μη πληθυσμούς, σχολεία εκμάθησης της Ελληνικής ως δεύτερης/ξένης γλώσσας, νοσοκομειακές κλινικές κ.λπ. Συνοπτικά, οι στόχοι του έργου που αφορούν τη διάδοση συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Την παροχή διεπαφής που επιτρέπει την εύκολη χρήση των εργαλείων εκμάθησης
2. Τη διαθεσιμότητα του λογισμικού εξ' αποστάσεως για χρήση από διαφορετικές ομάδες χρηστών (λ.χ. δασκάλους, λογοθεραπευτές, απλοί χρήστες)
3. Τη συλλογή στοιχείων χρήσης των εργαλείων
4. Την αξιολόγηση του εργαλείου από τους χρήστες

Όλα τα παραπάνω εξυπηρετούνται από τη δημιουργία μιας διαδικτυακής πλατφόρμας φιλοξενίας των βάσεων δεδομένων και των εφαρμογών εκμάθησης. Η πρόσβαση σε αυτή σχεδιάζεται να είναι (α) δημόσια για τη γενική πληροφόρηση σχετικά με το έργο και (β) προσωποποιημένη/διαβαθμισμένη για τις βάσεις δεδομένων και τις εφαρμογές εκπαίδευσης. Σκοπός του ελέγχου πρόσβασης είναι αφενός η συλλογή στοιχείων χρήσης του εργαλείου και αφετέρου η εξασφάλιση των εφαρμογών. Ειδικότερα για τις εφαρμογές εκπαίδευσης, σχεδιάζεται η υλοποίηση ξεχωριστών εκδόσεων για ενήλικους και παιδιά, προσαρμοσμένες στις δυνατότητες κατανόησης και τις ανάγκες της κάθε ομάδας (βλ.

Σχήμα 1.2). Επιπλέον, για την κάθε ομάδα χρηστών σχεδιάζεται η παροχή μακροεργαλείων σε επίπεδο δικτυακής εφαρμογής, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος ομάδας μαθητών ή ασθενών/πελατών από κάποιον επιβλέποντα (π.χ. δάσκαλο, λογοθεραπευτή), η επιβράβευση καλής επίδοσης χρηστών σε πλήθος ασκήσεων.

Το εργαλείο όπως και η ιστοσελίδα του έργου εξυπηρετείται από την υπολογιστική υποδομή του it.auth και θα είναι προσβάσιμα από τη διεύθυνση <http://speakgreek.web.auth.gr>.

### 3. Καταγραφές

Για την ανάπτυξη του εργαλείου δημιουργούνται δύο βάσεις φωνητικών δεδομένων. Η πρώτη περιλαμβάνει οπτικοακουστικές καταγραφές για όλους τους ήχους της ελληνικής σε ποικίλα πλαίσια (μεμονωμένη παραγωγή, παραγωγή σε συλλαβή, και σε λέξεις, καθώς και επιλεγμένων προτάσεων με διαφορετικό επιτονισμό). Για το σκοπό αυτό βιντεοσκοπήθηκαν 3 άτομα (ένας άνδρας, μια γυναίκα και ένα παιδί) οι οποίοι χρησιμεύουν ως μοντέλο για την κατανόηση της παραγωγής και εξάσκηση των ομιλητών. Επιπλέον καταγράφηκαν αρθρωτικά δεδομένα από δύο άτομα με τις τεχνικές του υπέρηχου και του ηλεκτροπαλατογράφου για την οπτικοποίηση της παραγωγής των γλωσσικών ήχων. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την Φωνητική Βιβλιοθήκη (βλ. ενότητα 1) με στόχο την παροχή οπτικοακουστικών πληροφοριών για την παραγωγή βασικών στοιχείων της ελληνικής.

Η δεύτερη βάση δεδομένων αποτελείται από ακουστικά δεδομένα τα οποία συμπεριλαμβάνουν (α) όλους τους ήχους της ελληνικής σε συλλαβικό πλαίσιο, σε δισύλλαβες λέξεις (αληθινές και ψευδολέξεις) με τόνο στην αρχική ή τελική συλλαβή, (β) λέξεων και προτάσεων που χρησιμοποιούνται για την εξάσκηση συγκεκριμένων στοιχείων της ελληνικής, π.χ. του τόνου, του επιτονισμού κτλ. Για το σκοπό αυτό θα ηχογραφηθούν 60 έλληνες ομιλητές (20 άντρες, 20 γυναίκες και 20 παιδιά ηλικίας 8-10 ετών). Στόχος της καταγραφής και ανάλυσης των δεδομένων είναι (α) ο εντοπισμός των στόχων παραγωγής φωνηέντων και συμφώνων και της τυπικής απόκλισης στα Ελληνικά, (β) ο καθορισμός των παραμέτρων που αφορούν την οπτικοποίηση της ανατροφοδότησης που θα λαμβάνουν οι χρήστες του συστήματος, και (γ) η συγκέντρωση δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την αυτόματη εκπαίδευση του συστήματος αυτόματης αναγνώρισης φωνής.

Με σκοπό την ποιοτική εξασφάλιση των φωνητικών βάσεων, έχει ήδη προδιαγραφεί πλήρης μεθοδολογία καταγραφής (λ.χ. υψηλό SNR, κατάλληλες συνθήκες φωτισμού, ποιότητα αποθήκευσης υλικού). Η συλλογή των καταγραφών θα ολοκληρωθεί σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους του Εργαστηρίου Ηλεκτροακουστικής ΑΠΘ και του Εργαστηρίου Φωνητικής του Τμήματος Αγγλικής Φιλολογίας ΑΠΘ.



Πίνακας 3.1 Προδιαγραφές κωδικοποίησης υλικού βάσεων δεδομένων (ΒΔ)

Τύπος	Κινούμενη εικόνα	Ήχος
Βιντεοσκοπήσεις ΒΔ Α	H.264/720p50/2Mbps	LC-AAC/160kbps/2ch
Υπερηχογραφήματα ΒΔ Α	Cinepak/480p30/~1Mbps*	-
Παλατογραφήματα ΒΔ Α	Cinepak/240p30/~150kbps*	-
Ηχογραφήσεις ΒΔ Β	-	PCM/16bit/44.1kHz/2ch

\* Λόγω περιορισμών του υλικού και του λογισμικού καταγραφής

#### 4. Προκλήσεις υλοποίησης

Η επίτευξη της άνωθεν προδιαγεγραμμένης λειτουργικότητας δημιουργεί ένα σύνθετο πλαίσιο απαιτήσεων που αφορά την επεξεργασία του ηχητικού σήματος ομιλίας. Παρακάτω αναφέρεται επιγραμματικά ένα πλήθος απαιτήσεων με ανάγκη συνδυαστικής αντιμετώπισής τους για το σύνολο των εφαρμογών/ασκήσεων:

**α) Ανθεκτικότητα σε περιβάλλον θορύβου.** Καθώς τα εργαλεία των ομάδων (β), (γ) και (δ) (ενότητα 1) πρόκειται να είναι διαθέσιμα για χρήση από προσωπικούς υπολογιστές μέσω διαδικτύου, οι συνθήκες ηχογράφησης δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν απόλυτα. Για το λόγο αυτό προβλέπεται ο σχεδιασμός αλγορίθμων αυτόματης εκτίμησης θορύβου και αποθορυβοποίησης, ενώ παράλληλα θα μελετηθεί η δυνατότητα παροχής βαθμονόμησης ακρίβειας σε συνάρτηση με την πλήρωση οδηγιών και προδιαγραφών ηχογράφησης (λ.χ. εάν χρησιμοποιείται συγκεκριμένο μικρόφωνο/headset ή όχι).

**β) Εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο.** Ο σχεδιασμός των εργαλείων των ομάδων (β) και (γ) απαιτεί να παρέχουν πληροφορία βιοανατροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην επιλογή της πλατφόρμας Adobe Flash για την υλοποίηση των εφαρμογών ασκήσεων. Η πλατφόρμα αυτή αφενός παρέχει τη δυνατότητα πρόσβασης στις συσκευές πρόσληψης πολυμέσων από υπολογιστή (μικρόφωνο) ενώ παρέχει δυνατότητες υλοποίησης αλγορίθμων επεξεργασίας (ActionScript 3.0). Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν ήδη καταστρωθεί και υλοποιηθεί στην εν λόγω πλατφόρμα αλγόριθμοι χαμηλών υπολογιστικών απαιτήσεων (πραγματικού χρόνου) που καλύπτουν το σύνολο σχεδόν των αναγκών των σχετικών εργαλείων.

**γ) Βιοανατροφοδότηση.** Μια από τις κατευθύνσεις που τέθηκαν στα πλαίσια του έργου, αποτελεί η παροχή ερμηνεύσιμης από τον χρήστη πληροφορίας βιοανατροφοδότησης/αξιολόγησης. Δεδομένου ότι η στόχευση των ασκήσεων είναι η παραγωγή ήχων και η δυνατότητα εκπαίδευσης σε σχέση με την εκφορά των ήχων, η πληροφορία αυτή θα πρέπει να σχετίζεται με τον τρόπο άρθρωσης. Η πληροφορία αυτή μπορεί να κωδικοποιείται στο φασματικό περιεχόμενο σε σαφώς ερμηνεύσιμα ποσοτικά χαρακτηριστικά (π.χ. F1/F2 σε συνάρτηση με τη θέση και το ύψος της γλώσσας για τα φωνήεντα). Εντούτοις, η εξαγωγή έμμεσης αρθρωτικής βιοανατροφοδότησης για το σύνολο των φωνητικών ήχων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση τεχνικών εξαγωγής χαρακτηριστικών και αναγνώρισης μέσω κατηγοριοποίησης/μοντελοποίησης βάσει δειγμάτων εκπαίδευσης (έμπειρο

σύστημα). Οι συγγραφείς έχουν ήδη να επιδείξουν σχετική έρευνα [9], βάσει της οποίας σύντομα αναμένονται νέα ερευνητικά αποτελέσματα.

**δ) Αναγνώριση σφαλμάτων εκφοράς.** Τα τυπικά συστήματα αναγνώρισης ομιλίας στοχεύουν πρωταρχικά στην εκτίμηση της πιθανότερης γλωσσικά έγκυρης εκφοράς. Σε αντιδιαστολή, τα εν λόγω εργαλεία στοχεύουν στον εντοπισμό και αξιολόγηση των εσφαλμένων εκφορών. Για το λόγο αυτό σχεδιάζεται η ανάπτυξη εύρωστων αλγορίθμων αναγνώρισης και αξιολόγησης σε τεμαχιακό και υπερτεμαχιακό επίπεδο. Αυτοί πρόκειται να βασιστούν σε τεχνικές τυφλού τεμαχισμού [10] και κατηγοριοποίησης/μοντελοποίησης ηχητικού σήματος γλωσσικού περιεχομένου.

**ε) Ανάλυση μεγάλου όγκου πληροφορίας σώματος.** Όπως ήδη αναφέρθηκε, η εξαγωγή των ερευνητικών συμπερασμάτων σε όλους τους τομείς έρευνας που αφορούν το έργο θα βασιστεί στην ανάλυση των δεδομένων των βάσεων δεδομένων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση των σχετικών αναλύσεων είναι η επισημείωση των καταγραφών με φωνητική πληροφορία· μια διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα που οφείλει να ολοκληρωθεί εγκαίρως. Για το σκοπό αυτό έχει ξεκινήσει η ανάπτυξη εργαλείων αυτοματοποίησης ορισμένων ενεργειών που αφορούν την επισημείωση (επέκταση λειτουργικότητας του λογισμικού αυτόματου φωνητικού χαρακτηρισμού EasyAlign για την ελληνική γλώσσα), ενώ έχει υλοποιηθεί λογισμικό αυτόματου τεμαχισμού των αρχείων βίντεο της βάσης δεδομένων A.

## 5. Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη του εκπαιδευτικού εργαλείου βρίσκεται σε εξέλιξη και ενώνει ερευνητές από πολλούς διαφορετικούς τομείς έρευνας στο πλαίσιο των επιστημών της ομιλίας, όπως θεωρητική γλωσσολογία, παιδαγωγική γλωσσολογία, λογοθεραπεία και τεχνολογία λόγου και υπολογιστών. Σε επίπεδο βασικής έρευνας, αποτελεί την πρώτη προσπάθεια συλλογής και ανάλυσης ελληνικών τεμαχιακών και υπερτεμαχιακών φαινομένων σε τέτοια έκταση. Στόχος είναι να βοηθήσει στη σωστή άρθρωση και παραγωγή ομιλίας, να παρέχει αντικειμενική αξιολόγηση, να υποστηρίξει το χρήστη και να βοηθήσει τον ειδικό δίνοντας την ευκαιρία για περαιτέρω εξάσκηση και εξατομικευμένη πρακτική μέσα και έξω από τις δομές εκπαίδευσης και κλινικής παρέμβασης. Παράλληλα, για την κάλυψη των λειτουργικών απαιτήσεων των επιμέρους εφαρμογών, αναμένεται να προκύψουν καινοτόμες προσεγγίσεις επεξεργασίας του ηχητικού σήματος της ομιλίας. Τέλος, αναμένουμε ότι η ερευνητική κοινότητα και οι σπουδαστές διαφορετικών επιστημονικών περιοχών (γλωσσολογίας, λογοθεραπείας, τεχνολογίας υπολογιστών κλπ) θα επωφεληθούν από την ελεύθερη πρόσβαση στη βάση δεδομένων και το εργαλείο εκπαίδευσης.

## 6. Ευχαριστίες

Η έρευνα εκπονείται στο πλαίσιο του προγράμματος “SpeakGreek: Developing a biofeedback speech training tool for Greek segmental and suprasegmental features: Application in L2 learning/teaching and clinical intervention” και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο)

και εθνικούς πόρους στο πλαίσιο της πράξης ΑΡΙΣΤΕΙΑ II του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση». Ευχαριστίες στον Αναστάσιο Πασχάλη, υποστηρικτικό προσωπικό, για υποστήριξη στην καταγραφή δεδομένων.

## 7. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Y. Maryn, M. De Bodt, and P. Van Cauwenberge, “Effects of Biofeedback in Phonatory Disorders and Phonatory Performance: A Systematic Literature Review,” *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, vol. 31, no. 1, pp. 65–83, Mar. 2006.
- [2] S. Brooks, F. Fallside, E. Gulian, and P. Hinds, “Teaching vowel articulation with the computer vowel trainer. Methodology and results,” *British journal of audiology*, vol. 15, no. 3, p. 151–163, Aug. 1981.
- [3] D. M. Chun, “Technological advances in researching and teaching phonology,” in *Phonology in context*, M. C. Pennington, Ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2007, pp. 135–158.
- [4] A. M. Öster, “Computer-Based Speech Therapy Using Visual Feedback with Focus on Children with Profound Hearing Impairment,” Doctoral Thesis, KTH, Stockholm, 2006.
- [5] M. Eskenazi, “An overview of spoken language technology for education,” *Speech Communication*, vol. 51, no. 10, pp. 832–844, Oct. 2009.
- [6] R. Godwin-Jones, “Emerging technologies-Speech tools and technologies,” *Language Learning & Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 4–11.
- [7] “KAYPENTAX.” [Online]. Available: [http://www.kayelemetrics.com/index.php?option=com\\_index](http://www.kayelemetrics.com/index.php?option=com_index). [Accessed: 14-May-2014].
- [8] “Box of Tricks.” [Online]. Available: <http://www.rcs.hu/boxoftricks/>. [Accessed: 14-May-2014].
- [9] Κ. Αβδελίδης, Γ. Καλλίρης, and Γ. Παπανικολάου, “Διερεύνηση μοντέλου δισδιάστατης αναπαράστασης φωνής και εφαρμογή στην ταξινόμηση με ασαφή λογική,” in *Πρακτικά συνεδρίου 4ου Πανελληνίου συνεδρίου of Ακουστικής ΕΛ.ΙΝ.Α: “ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008*,” Ξάνθη, 2008.
- [10] Κ. Αβδελίδης, “Σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης και σύνθεσης φωνής και ομιλίας με τη χρήση οπτικών και ακουστικών πληροφοριών,” Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2012.

# ***Αναγνώριση και άμεσος χαρακτηρισμός ψαλτικής φωνής σε πραγματικό χρόνο στη βυζαντινή μουσική***

Αθανάσιος Μανιτσάρης<sup>1,a</sup>, Κωνσταντίνος Κοκκινίδης<sup>1,b</sup>, Αλίνα Γκλουσκόβα<sup>1,c</sup> &  
Σωτήρης Μανιτσάρης<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Εγγατία 156, 540 06 Θεσσαλονίκη

<sup>2</sup> Mines ParisTech, PSL Research University, 60 Bd St-Michel, 75272, Paris

<sup>a</sup> [amanitsaris@uom.edu.gr](mailto:amanitsaris@uom.edu.gr) <sup>b</sup> [kkokk@uom.gr](mailto:kkokk@uom.gr) <sup>c</sup> [alina.glushkova@uom.edu.gr](mailto:alina.glushkova@uom.edu.gr)

<sup>d</sup> [sotiris.manitsaris@mines-paristech.fr](mailto:sotiris.manitsaris@mines-paristech.fr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα σύστημα αυτόματης αναγνώρισης και σύγκρισης (ταυτοποίηση & ανάκτηση) ακουστικών σημάτων ψαλτικών φωνών, σε πραγματικό χρόνο, για την αισθητηριοκινητική μάθηση της Βυζαντινής Μουσικής (BM). Το σύστημα εκπαιδεύεται από μια συλλογή περιορισμένου αριθμού ύμνων (corpus) ερμηνευμένων από τον ειδικό (Expert) και στη συνέχεια αναγνωρίζει οποιοδήποτε ύμνο της συλλογής ερμηνευμένο είτε από τον ειδικό είτε τον εκπαιδευόμενο (Learner). Επίσης μπορεί να εκτιμήσει σε πραγματικό χρόνο την απόσταση της επίδοσης των δύο ερμηνειών. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δίνουν υψηλά ποσοστά όσον αφορά (α) την εκπαίδευση του μοντέλου του ειδικού με βάση τις θεμελιώδεις συχνότητες (pitch)  $F_0$  και τους συντελεστές MFCC της συλλογής, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τον βέλτιστο συνδυασμό ψαλτικών ερμηνειών του ειδικού, (β) όσον αφορά την αναγνώριση των ψαλτικών φωνών του εκπαιδευόμενου, με βάση το βέλτιστο συνδυασμό ερμηνειών του ειδικού και (γ) την εκτίμηση της απόστασης της επίδοσης του ειδικού και του εκπαιδευόμενου σε πραγματικό χρόνο και για κάθε χρονική στιγμή.

## ***Real-time recognition and online characterization of singing voice in Byzantine Music***

### **ABSTRACT**

We present a system for recognition and comparison of acoustic signals of singing voices, aiming at the sensorimotor learning of Byzantine music. Our system is trained with hymns performed by the expert and then it is able to recognize any of the interpretations (expert/learner). The system can evaluate in real time the distance of the performance of two musicians. The results are satisfying, regarding (a) the training of expert model with the fundamental frequency (pitch)  $F_0$  and the MFCC coefficients showing in parallel the optimum combination for training (b)

*regarding the recognition of the trainee's singing voice, c) the real-time estimation of the distance between expert's and learner's performance.*

## 1. Εισαγωγή

Η πολιτιστική κληρονομιά κάθε λαού είναι η κουλτούρα των προγόνων του. Εκτός από υλικά – απτά αντικείμενα, όπως παραδείγματος χάριν μνημεία ή συλλογές αντικειμένων, περιλαμβάνει και όλα εκείνα τα άυλα στοιχεία όπως ερμηνείες καλλιτεχνών και τεχνοτροπίες οι οποίες εμπεριέχουν γνώση και ικανότητες από ειδικούς του χώρου που απευθύνονται [1]. Έτσι οι ανθρώπινες χειρονομίες και οι φωνητικές δεξιότητες είναι κάποια από τα στοιχεία τα οποία συνθέτουν την άυλη πολιτιστική κληρονομιά ενός λαού. Ο χώρος της μουσικής και συγκεκριμένα της Βυζαντινής μουσικής είναι ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα άυλης πολιτιστικής κληρονομιάς. Η εκμάθηση της μέσω ενός «αισθητηριακού» συστήματος είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Σήμερα για να μάθει κάποιος να ψέλνει, δηλαδή να ερμηνεύει ύμνους Βυζαντινής μουσικής, θα πρέπει εκτός από την αντίστοιχη μουσική παιδεία, να έχει όπως λένε οι δάσκαλοι-ειδικοί του χώρου, «ακούσματα». Μάλιστα υποστηρίζεται πως όπως ένα μικρό παιδί πριν αρχίσει να μιλά πρέπει πρώτα να ακούσει άλλους να μιλούν, έτσι και ο μαθητής της Βυζαντινής μουσικής θα πρέπει πρώτα να ακούσει τον δάσκαλο να ψέλνει και έπειτα σε συνδυασμό με το μουσικό κείμενο να ψάλλει και αυτός.

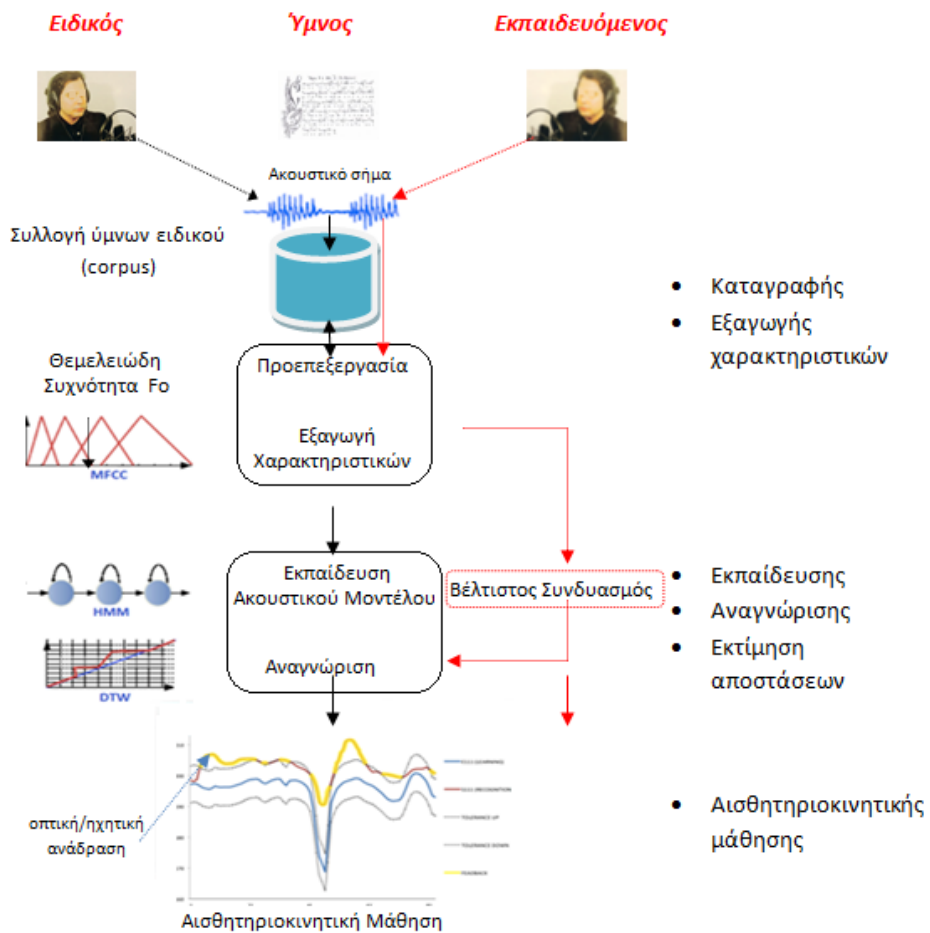
## 2. Μεθοδολογία

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος αυτόματης αναγνώρισης και σύγκρισης (ταυτοποίηση & ανάκτηση) ακουστικών σημάτων ψαλτικών φωνών, σε πραγματικό χρόνο, για την αισθητηριοκινητική μάθηση της Βυζαντινής Μουσικής. Η έρευνα διεξήχθη γύρω από 2 υποθέσεις: **H1**. Δύναται ένα σύστημα εκπαίδευσης μηχανών να ταυτοποιήσει σε πραγματικό χρόνο ύμνους από corpus ερμηνευμένο από ένα ειδικό; **H2**. Δύναται το ίδιο σύστημα όταν εκπαιδευτεί με βάση τον ειδικό να ταυτοποιήσει ύμνους ερμηνευμένους από μαθητευόμενο; Στο σχήμα 2.1 το *σύστημα αυτόματης αναγνώρισης ψαλτικών φωνών*, έχει υλοποιηθεί σε MAX/MSP και περιλαμβάνει 3 υποσυστήματα τα οποία σε πραγματικό χρόνο:

1. *καταγράφουν & εξάγουν χαρακτηριστικά*: επιτρέποντας, στον ειδικό να δημιουργήσει μια συλλογή περιορισμένου αριθμού ύμνων (corpus) και να εξάγουν τις θεμελιώδεις συχνότητες (pitch)  $F_0$  και τους συντελεστές MFCC του ακουστικού σήματος από τις ερμηνείες των ειδικών και των εκπαιδευομένων
2. *εκπαιδεύουν, αναγνωρίζουν & εκτιμούν την απόσταση των ερμηνειών*: εκπαιδεύουν το μοντέλο του ειδικού με βάση τις θεμελιώδεις συχνότητες (pitch)  $F_0$  και τους συντελεστές MFCC της συλλογής, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τον βέλτιστο συνδυασμό ψαλτικών ερμηνειών του ειδικού, *αναγνωρίζουν* τις ψαλτικές φωνές του εκπαιδευόμενου, με βάση το βέλτιστο συνδυασμό και *εκτιμούν την απόσταση* της ερμηνείας μεταξύ ειδικού και εκπαιδευόμενου, σε πραγματικό χρόνο και για κάθε χρονική στιγμή [3]

3. *παρέχουν feedback για την αισθητηριοκινητική μάθηση*: από την εκτίμηση της απόστασης της ερμηνείας μεταξύ ειδικού και εκπαιδευόμενου, σε πραγματικό χρόνο και για κάθε χρονική στιγμή παράγεται κωδικοποιημένο οπτικό ή ηχητικό μήνυμα, βάση του λεξικού σφαλμάτων ερμηνείας, όταν αυτή

Σχήμα 2.1. Δομή του συστήματος αυτόματης αναγνώρισης



η απόσταση ξεπερνά το εύρος ανοχής, σε σχέση με τον ειδικό.

### 2.1 Πρωτόκολλο δημιουργίας της συλλογής ύμνων (corpus)

Η συλλογή των ψαλτικών φωνών έγινε με ηχογραφήσεις ύμνων, βάση πρωτοκόλλου. Ο ειδικός ακολούθησε την παρακάτω διαδικασία, η οποία έχει ως στόχο να προετοιμαστεί ο ίδιος φωνητικά («ζέσταμα» φωνής):

1. απαγγελία των φωνηέντων της ελληνικής γλώσσας (στον φυσικό τόνο της

- φωνής του ερμηνευτή και όχι τραγουδιστά)
  - 2. ερμηνεία των φωνηέντων της ελληνικής γλώσσας στη φυσική κλίμακα
  - 3. απαγγελία των ύμνων (από διαφορετικά γένη, είδη μελοποιίας και ήχους της βυζαντινής μουσικής, κλπ)
- Όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν σε τρεις επαναλήψεις.

## 2.2 Μοντελοποίηση φωνής και εκπαίδευση συστήματος

Η εκπαίδευση του συστήματος βασίζεται στο συνδυασμό Κρυφών Μαρκοβιανών Μοντέλων (HMM) και Δυναμικής Στρέβλωσης Χρόνου (DTW), ενώ κάθε μοντέλο εκπαιδεύεται με μοναδιαία ακολουθία (one-shot-learning) με χρήση της F0 & των συντελεστών MFCC του κάθε ακουστικού σήματος.[4,5,7]

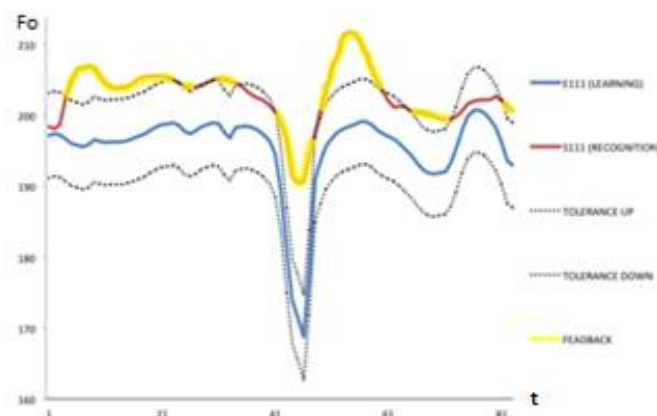
Η υλοποίηση της εκπαίδευσης του συστήματος έγινε με την χρήση της βιβλιοθήκης Gesture Follower η οποία αναπτύχθηκε από τον Benilacqua [2].

## 3. Μελέτη περίπτωσης

Στην έρευνα αυτή επιλεχτήκαν τέσσερα ύμνοι βυζαντινής μουσικής, διάρκειας περίπου 10-30 sec, τα οποία ερμήνευσε ένας ειδικός και ένας εκπαιδευόμενος. Κάθε ερμηνεία περιελάμβανε τρεις επαναλήψεις ανά ύμνο. Η όλη διαδικασία έλαβε υπόψη της δύο σενάρια, την εκπαίδευση του μοντέλου με ακολουθίες χαρακτηριστικών του ειδικού και την αυτόματη αναγνώριση ακολουθιών των ειδικού ή/και του εκπαιδευόμενου.

Για την αυτόματη αναγνώριση και σύγκριση ψαλτικών φωνών, ειδικού και εκπαιδευόμενου σε πραγματικό χρόνο, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται στην εξαγωγή της θεμελιώδους συχνότητας F0 και των συντελεστών MFCC από το ακουστικό σήμα βάση πλαισίων διάρκειας 0,015 sec και επικάλυψης-βήμα 0,005 sec (30%) ενώ η παραθύρωση έγινε με Hamming window.

Σχήμα 3.1. Αισθητηριοκινητική μάθηση με οπτική και ηχητική ανάδραση



Στη συνέχεια, το σύστημα εκπαιδεύεται με βάση τους συντελεστές MFCC του ειδικού και της θεμελιώδους συχνότητας F0, ενώ ο εκπαιδευόμενος καλείται να

ερμηνεύσει έναν από τους ύμνους της συλλογής. Η αναγνώριση γίνεται με βάση τον βέλτιστο συνδυασμό από το σύνολο των ερμηνειών του ειδικού. Ο ύμνος που ψάλλει ο εκπαιδευόμενος αναγνωρίζεται σε πραγματικό χρόνο και εφαρμόζεται άμεσος χαρακτηρισμός του σήματος εισόδου (εκπαιδευόμενος) σε σχέση με το σήμα αναφοράς (ειδικός), ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ του τρέχοντος τμήματος ερμηνείας σε σχέση με το αντίστοιχο του ειδικού. Όταν αυτή η απόσταση ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο εύρος ανοχής, σχήμα 3.1, τότε το σύστημα δύναται να επικοινωνεί με τον εκπαιδευόμενο ώστε να διορθώνει την ερμηνεία του.

#### 4. Αξιολόγηση

Η αξιολόγηση του συστήματος αναγνώρισης ψαλτικής φωνής έγινε μέσω της μεθόδου Jackknife [6] με στόχο τον υπολογισμό των μετρικών Precision και Recall. Δύο πειράματα Jackknife πραγματοποιήθηκαν (Πίνακες 4.1 και 4.2). Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ακολουθίες δεδομένων εκπαίδευσης και αναγνώρισης προερχόμενες από τον ειδικό. Με  $M_i^E, i \in [1,4]$  συμβολίζεται το μαρκοβιανό μοντέλο

Πίνακας 4.1. Precision & Recall ανά ύμνο βασισμένα σε 67 επαναλήψεις του ειδικού με την μέθοδο Jackknife resampling

		Μέγιστες Πιθανοφάνειες				
		$M_1^E$	$M_2^E$	$M_3^E$	$M_4^E$	Recall
Παρατηρήσεις	$C_1^E$	<b>67</b>	-	-	-	100%
	$C_2^E$	-	<b>67</b>	-	-	100%
	$C_3^E$	-	12	<b>55</b>	-	82%
	$C_4^E$	-	-	-	<b>67</b>	100%
<b>Precision</b>		100%	85%	100%	100%	

Πίνακας 4.2. Precision & Recall ανά ύμνο βασισμένα σε 3 επαναλήψεις με την μέθοδο Jackknife resampling μεταξύ του ειδικού και του εκπαιδευόμενου

		Μέγιστες Πιθανοφάνειες				
		$M_1^E$	$M_2^E$	$M_3^E$	$M_4^E$	Recall
Παρατηρήσεις	$C_1^L$	<b>3</b>	-	-	-	100%
	$C_2^L$	-	<b>3</b>	-	-	100%
	$C_3^L$	-	-	<b>3</b>	-	100%
	$C_4^L$	-	-	-	<b>3</b>	100%
<b>Precision</b>		100%	100%	100%	100%	



του εκάστωτε ύμνου και με  $C_i^E, i \in [1,4]$  το δείγμα του ψαλμού που δίνεται ως σήμα προς αναγνώριση.  $M_i^E$  και  $C_i^E$  αναφέρονται σε ερμηνείες του ειδικού. Οι μετρικές Precision και Recall ήταν υψηλότερες από 85% γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της επιλογής των συντελεστών MFCC. Τα αποτελέσματα της μεθόδου Jackknife καθόρισαν-προσδιόρισαν τα βέλτιστα αποσπάσματα των ερμηνειών των ειδικών για την εκπαίδευση του συστήματος. Το δεύτερο πείραμα βασίστηκε στις βέλτιστες αυτές ερμηνείες των αποσπασμάτων των ειδικών με σκοπό την αναγνώριση της ερμηνείας  $C_i^E$  των εκπαιδευόμενων. Οι μετρικές Precision και Recall έδωσαν άριστα αποτελέσματα, γεγονός που επιβεβαίωσε τη χρησιμότητα της παροχής αισθητηριοκινητικής ανάδρασης κατά τη διάρκεια της ερμηνείας.

## 5. Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζεται μια μεθοδολογία και ένα σύστημα αναγνώρισης ψαλτικής φωνής σε πραγματικό χρόνο με στόχο την αισθητηριοκινητική μάθηση βυζαντινής μουσικής. Η μεθοδολογία βασίζεται σε εκπαίδευση Κρυφών Μαρκοβιανών Μοντέλων, ενώ ο άμεσος χαρακτηρισμός της ερμηνείας του εκπαιδευόμενου στη Δυναμική Στρέβλωση Χρόνου. Η στατιστική μέθοδος Jackknife μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την εκπαίδευση του μοντέλου του εκπαιδευτή με τους συντελεστές MFCC. Ταυτόχρονα ανέδειξε το βέλτιστο συνδυασμό ψαλτικών ερμηνειών του ειδικού, οι οποίες όταν χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του συστήματος δίνουν τα υψηλότερα ποσοστά αναγνώρισης. Η ίδια μέθοδος μας έδωσε επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αναγνώριση των ψαλτικών φωνών του εκπαιδευόμενου με βάση το βέλτιστο συνδυασμό ερμηνειών του ειδικού για την εκπαίδευση του συστήματος. Τέλος, το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της επίδοσης του εκπαιδευόμενου σε πραγματικό χρόνο και για κάθε χρονική στιγμή. Ως μελλοντική έρευνα, κρίνεται αναγκαία η γενίκευση της μεθοδολογίας μέσω της καταγραφής ενός μεγάλου αριθμού ειδικών και εκπαιδευομένων αλλά και η μέτρηση συνεισφοράς αισθητηριοκινητικής ανάδρασης στη διαδικασία εκμάθησης.

## 6. Αναφορές

- [1] Unesco 2003. 1998. Segmentation and Categorization of Phonemes in Continuous Speech. Technical Report TR-CST25JUL98, Center for Sensor Technology, University of Pennsylvania.
- [2] Bevilacqua, F., Guédy, F., Sschnell, N., Fléty E. Leroy N., ‘Wireless sensor interface and gesture-follower for music pedagogy’. In Proceedings of *the International Conference of New interfaces for Musical Expression*, New York, USA, pp 124-129, 2007.
- [3] S. Manitsaris, A. Glushkova, F. Bevilacqua and F. Moutarde. 2014. ‘Capture, modeling and recognition of expert technical gestures in wheel-throwing art of pottery’. In *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage Special issue "Interacting with the Past"*, pp 4. 2014.
- [4] Chai, Wei and Barry Vercoe. ‘Folk Music Classification Using Hidden Markov Models’, *Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence*, June 2001.

- [5] A. Mesaros, and J. Astola, "The mel-frequency cepstral coefficients in the context of singer identification," in *Proc. of ISMIR 2005*, London, UK, September 11-15, 2005.
- [6] Abdi, H., Williams, L.J., 2010, «Jackknife», In Neil Salkind (Ed.), *Encyclopedia of Research Design*. Thousand Oaks, CA: Sage
- [7] Rabiner, L. R., 1989, A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. In *Proceedings of the IEEE*, pages 257–286.

# ***Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας κωδικοποίησης του προτύπου MPEG-1 Layer III για διαφορετικά είδη μουσικής με χρήση της μεθόδου Semantic Differential***

Ιωάννα Αρώνη<sup>a</sup> & Νίκος Παπαδάκης<sup>b</sup>

Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ε. Δασκαλάκη, Περιβόλια, 74 100  
Ρέθυμνο

<sup>a</sup> [aroni\\_ioanna@hotmail.com](mailto:aroni_ioanna@hotmail.com), <sup>b</sup> [npapadakis@staff.teicrete.gr](mailto:npapadakis@staff.teicrete.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το πρότυπο MPEG-1 Layer III κατά την κωδικοποίηση ηχητικού υλικού δημιουργεί αλλοιώσεις οι οποίες έχουν φασματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά. Επίσης εισάγεται θόρυβος στο ηχητικό υλικό και δημιουργείται παραμόρφωση. Ο βαθμός επίδρασης των παραπάνω σε διαφορετικά μουσικά είδη, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση listening tests. Για την συγκριμένη εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος Semantic Differential η οποία μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε τρεις βασικές κατηγορίες χαρακτηρισμών. Οι κατηγορίες (factors) είναι οι Evaluation, Potency και Activity (δομή EPA). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, κατάλληλος αριθμός ατόμων κλήθηκε να απαντήσει σε ερωτηματολόγια μετά από ακροάσεις, για διαφορετικά μουσικά είδη.*

*Από την έρευνα προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για τον βαθμό αλλοίωσης που επιφέρει η συμπίεση για κάθε είδος μουσικής σε διαφορετικές κατηγορίες της δομής EPA. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση και την προσαρμογή του προτύπου, ανάλογα με το μουσικό είδος το οποίο καλείται να κωδικοποιηθεί.*

## ***Evaluation of the coding efficiency of the MPEG-1 Layer III protocol using listening tests (Semantic Differential method) for different music genres***

### **ABSTRACT**

*During the coding process, the MPEG-1 Layer III standard introduces audible artifacts which influence the spectral and dynamic characteristics of the audio file being compressed. It also introduces noise and distortion artifacts. The impact of these artifacts in different music genres, with different characteristics, can be measured using listening tests. For the present study, Semantic Differential method was used. This method gives results in three main factors: Evaluation, Potency and*

*Activity (EPA structure). A suitable number of people were asked to fill in questionnaires after listening to files of different music genres, encoded in different bitrates.*

*The study showed useful results for the artifacts introduced by the compression for each music genre in the three EPA factors. These findings can be used to optimize and adapt the MP3 standard, depending on the musical genre that needs to be encoded.*

## **Εισαγωγή**

Το πρότυπο MPEG-1 Layer 3 είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους συμπίεσης ηχητικών σημάτων. Λόγω των προτερημάτων του, όπως ο μικρός απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης και η συμβατότητα του με τα περισσότερα προγράμματα μουσικής αναπαραγωγής, έχει επισκιάσει τις υπόλοιπες μορφές μουσικών αρχείων.

Δυστυχώς, όμως, παρά τα πλεονεκτήματά του, το πρότυπο μειονεκτεί σχετικά στην ποιότητα του αναπαραγόμενου ήχου, μιας και είναι αλγόριθμος απωλεστικής συμπίεσης. Οι διαδικασίες που μεταχειρίζεται ο αλγόριθμος προκειμένου να συμπίεσει το ηχητικό σήμα αλλοιώνουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ήχου.

Αυτές τις αλλοιώσεις μελετά η παρούσα εργασία. Αν και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες να μετρηθεί η ποιοτική απόδοση διαφόρων αλγορίθμων συμπίεσης για διαφορετικά μουσικά είδη, λίγες είναι εκείνες που εστίασαν στη διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στο CD και στο MP3 και μάλιστα από την πλευρά των ακροατών.

Για τη μελέτη των αλλοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν ερωτηματολόγια, κατασκευασμένα με τη μέθοδο Semantic Differential [1]. Μέσω της μεθόδου αυτής, καθίσταται εφικτή η μέτρηση υποκειμενικών χαρακτηριστικών, όπως τα δέχεται ο ακροατής από ένα άκουσμα, μέσω διπολικών κλιμάκων χωρισμένων σε κατηγορίες (δομή EPA).

### **1. Μεθοδολογία**

#### *1.1 Επιλογή Κλιμάκων*

Οι κλίμακες των προσδιορισμών επελέγησαν με βάση τρία κριτήρια: τη συμφωνία τους με τη δομή EPA της μεθόδου, τη φύση του αντικειμένου που εξετάζεται [2] (στην παρούσα περίπτωση, η αξιολόγηση της συμπίεσης των ηχητικών σημάτων) και την κοινή ερμηνεία τους από τους συμμετέχοντες στην έρευνα.

Κάθε κατηγορία περιέχει τρεις γραμμικές [3], ισοδύναμες και σημασιολογικά σταθερές [4] κλίμακες (9 συνολικά). Οι προσδιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των ακουσμάτων φαίνονται στον Πίνακα 1.1. Οι συντομογραφίες e1, e2 κλπ που υπάρχουν σε κάθε κλίμακα, αποτελούν οδηγό για την ανάγνωση των σχημάτων του 2<sup>ου</sup> μέρους.

Πίνακας 1.1 Αντιστοιχία κλιμάκων και παραγόντων των ερωτηματολογίων

Evaluation	Potency	Activity
Χειρότερο-Καλύτερο(e1)	Περισσότερος Θόρυβος-Λιγότερος Θόρυβος(p1)	Πιο Φτωχό Φάσμα-Πιο Πλούσιο Φάσμα(a1)
Πιο Ενοχλητικό-Πιο Απολαυστικό(e2)	Πιο Δύσκολος Διαχωρισμός Οργάνων-Πιο Εύκολος Διαχωρισμός Οργάνων(p2)	Λιγότερο Ζεστό-Περισσότερο Ζεστό(a2)
Λιγότερο Δυνατό-Περισσότερο Δυνατό(e3)	Περισσότερη Παραμόρφωση-Λιγότερη Παραμόρφωση(p3)	Λιγότερο Λαμπρό-Περισσότερο Λαμπρό(a3)

### 1.2 Επιλογή Ακουσμάτων

Τα μουσικά είδη που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι: rock, jazz, ηλεκτρονική μουσική, κλασική μουσική και solo όργανο. Τα κομμάτια επελέγησαν με βάση την αντιπροσωπευτικότητά τους ως προς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχει το κάθε είδος και φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Μουσικά ακούσματα που χρησιμοποιήθηκαν

Μουσικό Είδος	Τίτλος Κομματιού	Συνθέτης/Ερμηνευτής
Rock	Poison	Alice Cooper
Jazz	Blue Train	John Coltrane
Ηλεκτρονική	Traffic	DJ Tiesto
Κλασική	3 <sup>η</sup> Συμφωνία (Ηρωική)	Ludwig van Beethoven
Solo όργανο (Πιάνο)	Moonlight Sonata	Ludwig van Beethoven

Από τα παραπάνω κομμάτια, επελέγησαν φράσεις διάρκειας από 8 έως 12 δευτερόλεπτα, σε ποιότητα CD (44.1kHz, 16 bit). Οι φράσεις που χρησιμοποιήθηκαν επελέγησαν με προσοχή, ώστε να περιέχουν όλα τα μοναδικά γνωρίσματα τα οποία χαρακτηρίζουν το κάθε μουσικό είδος. Στη συνέχεια, τα αποσπάσματα αυτά μετατράπηκαν σε αρχεία MP3 (με τη χρήση του L.A.M.E. encoder), με διαφορετικά bitrates. Για κάθε απόσπασμα δημιουργήθηκαν 3 αρχεία MP3, ένα στα 96, ένα στα 160 και ένα στα 320kbps.

### 1.3 Επιλογή Υποκειμένων

Ο ελάχιστος αριθμός συμμετεχόντων που απαιτείται σε έρευνες με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι 30, σύμφωνα με τον Heise [5].

Στην παρούσα έρευνα συμμετείχαν 40 άτομα (20 άντρες, 20 γυναίκες), με εύρος ηλικιών από 18 έως 29 έτη. Σε αυτό το ηλικιακό εύρος, οι απώλειες της ακοής σε ότι αφορά στην αντίληψη του συχνοτικού φάσματος είναι μηδαμινές [6], γι αυτό και προτιμήθηκε.

Οι συμμετέχοντες αντιπροσωπεύουν το «μέσο» χρήστη των MP3, μιας και χρησιμοποιούν κομμάτια MP3 σε καθημερινή βάση, αλλά δε διαθέτουν εξειδικευμένες γνώσεις σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου.

#### 1.4 Διαδικασία

Κάθε συμμετέχοντας έπαιρνε το ερωτηματολόγιο, διάβαζε τις οδηγίες και δεχόταν διευκρινήσεις, προκειμένου να γίνει η διαδικασία απόλυτα κατανοητή.

Στη συνέχεια, άκουγε το κάθε ζεύγος των ακουσμάτων και συμπλήρωνε το ερωτηματολόγιο. Κάθε ζεύγος, αξιολογήθηκε με 9 διαβαθμισμένες διπολικές κλίμακες εφτά σημείων [7], παράδειγμα των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Οι αριθμοί στο κάτω μέρος της κλίμακας δηλώνουν την αντίστοιχη βαθμολογία η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Τα ζεύγη των ακουσμάτων αποτελούνταν από ένα απόσπασμα σε ποιότητα CD και το ίδιο απόσπασμα σε μορφή MP3. Δεν υπήρχε περιορισμός στον αριθμό των επαναλήψεων του κάθε ζεύγους, ούτε και στο χρόνο που θα αφιέρωνε στο κάθε ένα.

Ο μέσος χρόνος συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου ήταν τα 40 λεπτά με το γρηγορότερο συμμετέχοντα να το ολοκληρώνει σε 30 λεπτά και τον αργότερο σε 70 λεπτά.

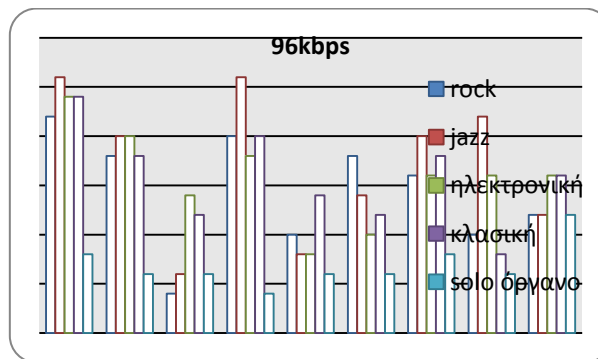
Σχήμα 1.1. Παράδειγμα διπολικής κλίμακας

	Πολύ	Αρκετά	Λίγο	Το Ίδιο	Λίγο	Αρκετά	Πολύ	
Χειρότερο								Καλύτερο
	-3	-2	-1	0	1	2	3	

## 2. Αποτελέσματα

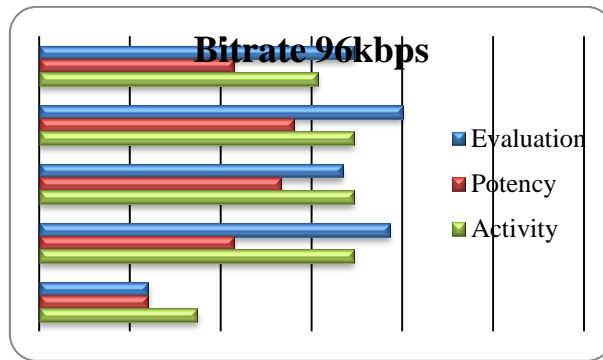
Στο Σχήμα 2.1 και Σχήμα 2.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των κλιμάκων και των factor scores αντίστοιχα για όλα τα μουσικά είδη στο bitrate των 96kbps. Στο Σχήμα 2.3 και Σχήμα 2.4 φαίνονται τα αποτελέσματα για το bitrate των 160kbps. Και στα δύο αυτά bitrate το solo όργανο είναι το είδος με την καλύτερη αξιολόγηση, ενώ τα υπόλοιπα μουσικά είδη παρουσιάζουν αρκετές αλλοιώσεις, κυρίως στον παράγοντα Evaluation. Ακολουθεί ο παράγοντας Activity, ο οποίος αντιπροσωπεύει το συχνοτικό φάσμα και τρίτος ο παράγοντας Potency.

Σχήμα 2.1. Αποτελέσματα κλιμάκων για το bitrate των 96kbps

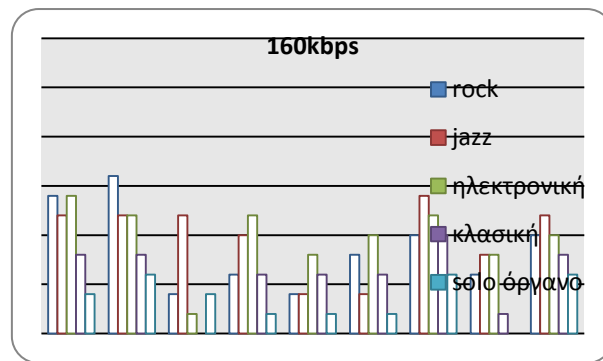


Οι αρνητικές τιμές στα αποτελέσματα δηλώνουν ότι το συμπιεσμένο σήμα (MP3), αξιολογήθηκε αρνητικά σε σχέση με το αρχικό σήμα (CD).

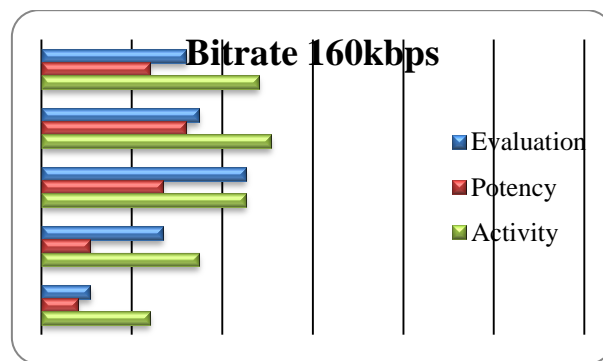
Σχήμα 2.2. Αποτελέσματα factors για τα 96kbps



Σχήμα 2.3. Αποτελέσματα κλιμάκων για το bitrate των 160kbps

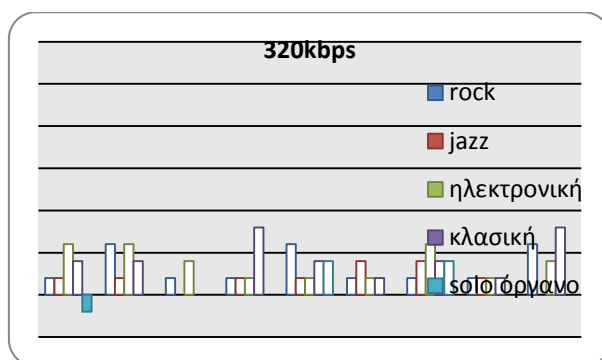


Σχήμα 2.4. Αποτελέσματα factors για τα 160kbps

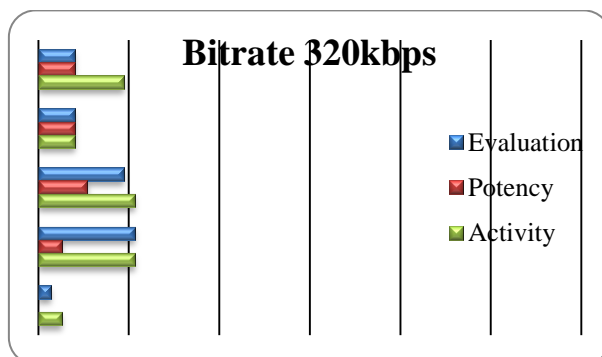


Στο Σχήμα 2.5 και Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι κλίμακες και οι βαθμολογίες των factors για το bitrate των 320kbps. Σε αυτό το bitrate, η κλασική μουσική είναι αυτή που συγκεντρώνει τη χαμηλότερη βαθμολογία, με την ηλεκτρονική μουσική να βρίσκεται πολύ κοντά της, ενώ το solo όργανο έχει και πάλι την καλύτερη βαθμολογία, έχοντας μάλιστα μηδενική βαθμολογία στον παράγοντα Potency. Σε γενικές γραμμές, όμως, και τα πέντε είδη συγκεντρώνουν πολύ ικανοποιητικές βαθμολογίες σε αυτό το bitrate.

Σχήμα 2.5. Αποτελέσματα κλιμάκων για το bitrate των 320kbps



Σχήμα 2.6. Αποτελέσματα factors για τα 320kbps



### 3. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την έρευνα, γίνεται φανερό ότι ο αλγόριθμος επηρεάζει πολλά από τα χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος. Πιο συγκεκριμένα:

Για συμπίεση με λίγες αντιληπτές αλλοιώσεις, δε συνίσταται η χρήση bitrate μικρότερου από αυτό των 160kbps.

Ηχητικά σήματα με μικρό δυναμικό εύρος (π.χ. solo όργανο), μπορούν να κωδικοποιηθούν σε μικρότερα bitrates, σε αντίθεση με σήματα μεγάλου δυναμικού εύρους (π.χ. κλασική μουσική) τα οποία απαιτούν υψηλές τιμές bitrate προκειμένου οι αλλοιώσεις να μη γίνονται ιδιαίτερα διακριτές.



Τα ηχητικά σήματα που δεν έχουν ιδιαίτερες αυξομειώσεις στη δυναμική τους και περιέχουν φυσικά μουσικά όργανα μπορούν να κωδικοποιηθούν σε μικρότερα bitrates σε σχέση με κομμάτια αντίστοιχων αυξομειώσεων που περιέχουν ηλεκτρονικά μουσικά όργανα.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα του αλγορίθμου στα χαμηλά bitrates εντοπίζεται στο συχνοτικό φάσμα των ηχητικών σημάτων και όχι τόσο στην εισαγωγή θορύβου ή παραμόρφωσης, παρ' όλη την ύπαρξη του θορύβου κβαντισμού.

Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό με αυτά παρόμοιων μελετών, όπως αυτές των Pras et al [8] και Ruzanski [9].

Βάσει των ευρημάτων αυτών, είναι σαφές ότι πρέπει κανείς να είναι προσεκτικός στην επιλογή bitrate για την κωδικοποίηση ενός μουσικού αρχείου, αν θέλει να πετύχει την καλύτερη αναλογία ποιότητας/αποθηκευτικού χώρου, ανάλογα με το μουσικό είδος το οποίο θέλει να συμπίσει.

Ο αλγόριθμος δύναται να βελτιωθεί προκειμένου το συχνοτικό φάσμα ενός ηχητικού σήματος να μην αλλοιώνεται σε μεγάλο βαθμό κατά τη συμπίεση. Θα μπορούσε, ακόμη, να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος MP3, ο οποίος, λαμβάνοντας υπ' όψιν του το μουσικό είδος και το δυναμικό εύρος του εκάστοτε αρχείου, να βελτιστοποιεί την απόδοσή του, προσφέροντας στον ακροατή τη δυνατότητα χρήσης μικρού αποθηκευτικού χώρου, χωρίς το συμπίεσμένο αρχείο να υστερεί σε ποιότητα.

#### 4. Αναφορές

- [1] Osgood, C.E., Suci, G.J., Tannenbaum, P.H. *The measurement of meaning* University of Illinois (1957)
- [2] Al-Hindawe, J. «Considerations when constructing a semantic differential scale» La Trobe working papers on linguistics, **vol. 9** (1996)
- [3] Messick, S.J. «Metric properties of the semantic differential» *Educational and Psychological Measurement*, **17**, pp 200-206 (1957)
- [4] Norman, W. «Stability characteristics of the semantic differential» *American Journal of Psychology*, **72**, pp 581-584 (1959)
- [5] Heise, D.R. «Some methodological issues in semantic differential research» *Psychological Bulletin*, **72** **6**, pp 406-422 (1969)
- [6] Takeda, S. et al. «Age variation in the upper limit of hearing» *European journal of applied physiology*, **65**, pp 403-408 (1992)
- [7] Miller, G.A. «The magical number seven, plus or minus two» *Psychological Review*, **63**, pp 81-97 (1956)
- [8] Pras, A. et al. «Subjective evaluation of mp3 compression for different musical genres» *AES 127<sup>th</sup> Convention*, New York, NY, USA, paper 7879 (2009)
- [9] Ruzanski, E.P. «Effects of MP3 encoding on the sounds of music» *IEEE Potentials*, **25**, pp 43-45 (2006)

# **Καταγραφή και μελέτη δυναμικών ψυχοακουστικών χαρακτηριστικών με εφαρμογή στη μελέτη της αντίληψης πλευρίωσης ηχητικών πηγών**

Νικόλαος Νικολαΐδης<sup>a</sup>, Κωνσταντίνος Παστιάδης<sup>b</sup> & Γεώργιος Παπαδέλης<sup>c</sup>

Τμήμα Μουσικών Σπουδών Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [nnikolao@mus.auth.gr](mailto:nnikolao@mus.auth.gr), <sup>b</sup> [pastiadi@mus.auth.gr](mailto:pastiadi@mus.auth.gr), <sup>c</sup> [papadeli@mus.auth.gr](mailto:papadeli@mus.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι διπλός: κατά πρώτον, η καταγραφή και μελέτη δυναμικών αποκρίσεων σε ψυχοφυσικές διεργασίες, και, κατά δεύτερον, η εξειδίκευση του προηγούμενου στόχου στην αντίληψη της πλευρίωσης ηχητικών πηγών.

Παρουσιάζεται ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η πιστοποίηση ακρίβειας ενός εξειδικευμένου υλικολογισμικού για την μελέτη της αντίληψης πλευρίωσης ηχητικών πηγών.

Κατόπιν, παρουσιάζεται μια στοχευμένη ψυχοακουστικής δοκιμασίας για την μελέτη της διακριτικής ικανότητας στην πλευρίωση ηχητικών πηγών με δυναμική μεταβολή της διωτικής στάθμης. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται για την μελέτη της διακριτικής ικανότητας των ακροατών είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του *pattern* μεταβολής της διωτικής στάθμης και της καταγραφής της απόκρισης αντιληπτής θέσης της πηγής από τον ακροατή. Όπως φαίνεται: i) Οι αποκρίσεις των ακροατών εμφανίζουν υψηλότερη συσχέτιση με τα ερεθίσματα όταν οι φαινόμενες ηχητικές πηγές έχουν ως σημείο αναφοράς το κέντροσε σχέση με αυτές που έχουν ως σημείο αναφοράς δεξιά. ii) Οι συσχετίσεις δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα με την συχνότητα του ηχητικού ερεθίσματος, iii) Οι συσχετίσεις είναι υψηλότερες για σταθερό ρυθμό «κίνησης» της πηγής, και, iv) Οι συσχετίσεις μεταβάλλονται μονότονα με το εύρος δυναμικής διωτικής μεταβολής της στάθμης, δηλαδή της φαινομενικής κίνησης της ηχητικής πηγής.

## ***Recording dynamic psychoacoustic characteristics with application in the study of the perception of sound sources' lateralization***

### **ABSTRACT**

*The aim of this work is twofold: first, the recording and study of dynamic responses in psychophysical processes, and second, a realization of the previous target in the perception of sound sources' lateralization.*

*We present the design, development and evaluation of accuracy of specialized software for the study of perception of lateralization of sound sources.*

*Next, we present a targeted psychoacoustic the study of spatial resolution in sound sources' lateralization by dynamically changing the Interaural Level Difference (ILD). The index used to study the listeners' performance is the correlation coefficient between the pattern of variation of ILDs and the responses of perceived source location. As shown: i) The responses of the listeners have a higher correlation with the stimulus when the apparent sound sources are at 0° as a reference. ii) The responses do not vary considerably with the frequency of sound stimuli, iii) Correlations are higher for fixed rate "movement" of the source, and, iv) Correlations vary monotonically with ILD, i.e. with the apparent motion of the sound source.*

## **Εισαγωγή**

Η σύζευξη και εφαρμογή της Ψυχοφυσικής με τη μουσική τεχνολογία αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα διεπιστημονικότητας, καθώς συνδυάζει επιστημονικούς κλάδους, όπως την Μουσικολογία, την Ακουστική, την Επεξεργασία Σήματος, την Ψυχοακουστική, την Τεχνητή Νοημοσύνη και την Επικοινωνία Ανθρώπου-Υπολογιστή (Human-Computer Interaction HCI).

Ο στόχος της εργασίας είναι διπλός. Αφενός η ανάπτυξη ενός συστήματος που θα χρησιμοποιείται σε ψυχοακουστικές δοκιμασίες, για την καταγραφή της απόκρισης των υποκειμένων σε πραγματικό χρόνο. Αφετέρου, το σύστημα που αναπτύσσουμε εξυπηρετεί τον έτερο στόχο της εργασίας μας, δηλαδή τη μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών αντίληψης της πλευρίωσης ηχητικών πηγών.

### **1. Συστήματα μέτρησης ψυχοφυσικών επιδόσεων με οπτικό ή ακουστικό ερέθισμα**

Ως συστήματα καταγραφής συμπεριφοράς, θα μπορούσαμε να ορίσουμε κάθε εφαρμογή ή σύστημα το οποίο καταγράφει την αντίδραση και τη συμπεριφορά ενός ατόμου, βάση ενός αρχικού ερεθίσματος. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και ως διαγνωστικά εργαλεία στον ιατρικό τομέα.

Ο αρχικός διαχωρισμός γίνεται σε 2 ομάδες. Στην πρώτη ομάδα, ανήκουν τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ως αρχικό ερέθισμα κάποιο οπτικό υλικό (εικόνες ή διαδοχή εικόνων), όπως το PsychoPY[1] και το PsyScope[2], καθώς και τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ακουστικά ερεθίσματα (ήχους), όπως το Shinji[3], το Psychoacoustic Software Suite (PSS)[4] και το ExpSuite[5]. Στην δεύτερη ομάδα, ανήκουν τα συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τα δυο είδη ερεθισμάτων, (οπτικό και ακουστικό) όπως το Music Experiment Development System (MEDS).

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των συστημάτων θα μπορούσε να βασίζεται στο κατά πόσο πραγματοποιείται κάποια αλλαγή (π.χ. αλλαγή μορφής της διεπαφής) κατά τη διαδικασία της καταγραφής. Αντίθετα με τα «στατικά» συστήματα, στα «δυναμικά» ο χρήστης μπορεί να αλλάζει τις επιλογές του κατά τη διάρκεια του ερεθίσματος, ώστε αυτές να προσαρμόζονται στις μεταβολές που μπορεί να υπάρχουν στο ηχητικό ερέθισμα κατά τη διάρκεια του χρόνου.

## **2. Ανάπτυξη συστήματος πραγματικού χρόνου για δυναμική καταγραφή απόκρισης αντίληψης χωρικής τοποθέτησης ηχητικών ερεθισμάτων**

Τα υφιστάμενα συστήματα προσφέρουν δυναμική καταγραφή σε πραγματικό χρόνο, ευκολία στη χρήση και διαδικτυακή χρήση. Εντούτοις παρουσιάζουν και ορισμένες ανεπάρκειες, όπως: δεν είναι πιστοποιημένα ως προς την ακρίβειά τους και απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις σε κάποια από αυτά για το προπαρασκευαστικό μέρος ενός πειράματος, δεν είναι πάντα πιστοποιημένα ως προς την ακριβή δυναμική καταγραφή σε πραγματικό χρόνο, και, τέλος, δεν είναι εύκολη η προσαρμογή σε διαφορετικού τύπου και διαβάθμισης μετρήσεις της αντίληψης του ακροατή. Για όλους τους παραπάνω λόγους επιλέξαμε τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας νέας πλατφόρμας, που θα μπορεί να υποστηρίξει τους εξελεγχόμενους στόχους που θέσαμε.

Οι προτεινόμενες τεχνικές απαιτήσεις συστήματος που θέτει η Microsoft για την λειτουργία του Visual Studio[6] είναι 2.2 GHz επεξεργαστής, 1024 MB μνήμη RAM, 7200 RPM σκληρό δίσκο. Το σύστημα που χρησιμοποιήσαμε εμείς είχε 3.2 GHz επεξεργαστή, 4GB μνήμη RAM και σκληρό δίσκο με 7200RPM.

Η εφαρμογή-σύστημα που αναπτύξαμε βασίστηκε στην Visual Basic, καθώς η μετατροπή από Windows based εφαρμογή σε Web application είναι πιο εύκολη απ' ό,τι σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιεί το Visual Studio με βάση το .NET Framework και το ASP.NET.

Στην μετατροπή της εφαρμογής από υπολογιστή σε διαδικτυακή εφαρμογή, δεν χρειάζεται να γραφτεί ξανά ο κώδικας. Έτσι η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μέσω διαδικτύου. Ασφαλώς, σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο χρόνος απόκρισης μεταξύ του υπολογιστή του χρήστη και του υπολογιστή που είναι εγκατεστημένη η εφαρμογή.

### *2.1 Λογισμικό A.L.E. ("Auditory Lateralization Environment")*

Σκοπός και κύριος άξονας στον οποίο βασίστηκε η κατασκευή της εφαρμογής-συστήματος "A.L.E", είναι η εύχρηστη καταγραφή των αποκρίσεων ακροατών σε ηχητικά ερεθίσματα.

Το περιβάλλον της A.L.E. αποτελείται από 2 φόρμες (επιφάνειες εργασίας). Η μία συλλέγει τις απαραίτητες πληροφορίες για τον συμμετέχοντα-υποκείμενο, ενώ η δεύτερη είναι η βασική φόρμα της εφαρμογής.

Σε αυτήν βρίσκεται ενσωματωμένη μια instance του Windows Media Player, ο οποίος είναι και το βασικό μας όργανο αναπαραγωγής του ερεθίσματος προς τον χρήστη. Ο χρήστης μετακινεί ένα slider για να καταδείξει την αντιληπτή κάθε στιγμή θέση της πηγής. Έχει επίσης την δυνατότητα επανάληψης της παρουσίασης του ηχητικού ερεθίσματος. Η λειτουργία της εφαρμογής "A.L.E." βασίζεται στον τρόπο καταγραφής δεδομένων με βάση την λειτουργία "Arraylist" που προσφέρεται από το πλαίσιο λειτουργίας .NET Frameworks, και οι αποκρίσεις των ακροατών αποθηκεύονται σε μορφή αρχείου κειμένου, ως λίστα συμβάντων με βήμα 100ms.

## 2.2 Διακρίβωση - πιστοποίηση ακρίβειας καταγραφής του A.L.E.

Λόγω του στόχου και της φύσης της εφαρμογής (καταγραφή δεδομένων και αντιδράσεων του χρήστη σε πραγματικό χρόνο) απαιτείται η διεξαγωγή δοκιμών πιστοποίησης ακρίβειας στην καταγραφή της απόκρισης των υποκειμένων. Έτσι υποβάλαμε την εφαρμογή μας σε συνδυασμούς υλικολογισμικού για να εξετάσουμε σε ποια συστήματα η εφαρμογή μας αποδίδει ικανοποιητικά, σε ότι αναφορά τους χρόνους δειγματοληψίας και αφ' ετέρου αν η επιταχυνόμενη ακρίβεια καταγραφής επιτρέπει την λήψη έγκυρων, ως προς το μελετούμενο φαινόμενο, αποτελέσματα.

Η εφαρμογή μας ελέγχεται επί δύο διαφορετικών διαμορφώσεων hardware. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σύστημα είναι ένας υπολογιστής με επεξεργαστή Intel Pentium 4 2.4 GHz με 500MB RAM και λειτουργικό σύστημα Windows XP SP3, ενώ το δεύτερο είναι υπολογιστής με επεξεργαστή Intel Pentium B960 με 2GB RAM και λειτουργικό σύστημα Windows 7. Σε αυτά τα δύο συστήματα δοκιμάσαμε την εφαρμογή μας από 500 φορές. Οι δείκτες ενδιαφέροντος αφορούν την αρχική καθυστέρηση που έχουμε στην έναρξη του ηχητικού σήματος και τις όποιες αποκλίσεις μπορεί να υπάρχουν στις ενδιάμεσες μετρήσεις στο βήμα των 100 ms που έχουμε ορίσει την εφαρμογή μας. Όπου αρχική καθυστέρηση εννοούμε την διαφορά μεταξύ των χρόνων του Player και τον χρόνο καταγραφής που υπάρχει στην αρχή κάθε αναπαραγωγής. Ενώ ενδιάμεσες καθυστερήσεις, τις τυχαίες διαφορές μεταξύ των χρόνων των δυο παραπάνω σε ενδιάμεσα χρονικά σημεία.

Στο πρώτο σύστημα (Pentium 4) ο μέσος όρος της αρχικής καθυστέρησης είναι στα 242 ms και η τυπική απόκλιση στα 66 ms, ενώ ο μέσος όρος των ενδιάμεσων καθυστερήσεων είναι στα 14ms και η τυπική απόκλιση στα 18ms.

Στην περίπτωση του Intel Pentium B960, τα αντίστοιχα αποτελέσματα έχουν ως εξής: ο μέσος όρος της αρχικής καθυστέρησης ανέρχεται σε 544ms και η τυπική απόκλιση στα 30ms, ενώ ο μέσος όρος των ενδιάμεσων καθυστερήσεων είναι στα 0.02ms με τυπική απόκλιση στα 4ms.

Συμπερασματικά, το πρώτο σύστημα παρουσιάζει καλύτερη ανταπόκριση στην εκκίνηση αναπαραγωγής, όμως το δεύτερο σύστημα είναι πιο ακριβές στην καταγραφή των δεδομένων μας, καθώς αυτό που μας απασχολεί για την ακρίβεια της εφαρμογής μας είναι οι ενδιάμεσες καθυστερήσεις. Η αντιστάθμιση της αρχικής καθυστέρησης μπορεί να γίνει από τον διαχειριστή του πειράματος με αφαίρεση του μέσης τιμής από τα ληφθέντα αποτελέσματα.

Στον ρυθμό δειγματοληψίας των 100ms που λειτουργεί η εφαρμογή μας, η τυπική απόκλιση της τάξεως των 4ms δεν είναι μεγάλη σε σχέση με τον ρυθμό δειγματοληψίας. Έτσι η εγκυρότητα της εφαρμογής μας θεωρείται επαρκής.

## 3. Μελέτη της δυναμικής αντίληψης πλευρίωσης ηχητικών πηγών

Με τον όρο αμφιωτική ακρόαση, δηλώνουμε την ικανότητα του ανθρώπου να μπορεί συγκρίνει και να αξιοποιεί ακουστικά σήματα και στα δύο αυτιά. Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης του ήχου στα δύο αυτιά ονομάζεται διωτική διαφορά χρόνου (Interaural Time Difference, I.T.D.)[7], ποικίλει ανάλογα με τη γωνία της ηχητικής πηγής και είναι το κύριο χαρακτηριστικό για τον καθορισμό κατεύθυνσης ήχων χαμηλής συχνότητας. Επίσης το κεφάλι προκαλεί μία «ακουστική σκιά», που εκφράζεται ως διωτική διαφορά έντασης (Interaural Level Difference, I.L.D.)[7].

Ποικίλει και αυτή ανάλογα με την γωνία της ηχητικής πηγής και είναι πιο αποτελεσματική στον καθορισμό κατεύθυνσης ήχων υψηλής συχνότητας.

### 3.1 Υφιστάμενη κατάσταση γνώσης

Το 1988 οι Perrott και Tucker[8] μελέτησαν την ελάχιστη γωνία ηχητικής μετατόπισης (Minimum audible movement angle M.A.M.A.) σε σχέση με την συχνότητα σήματος και την ταχύτητα που κινείται η ηχητική πηγή. Η χωρική διακριτική ικανότητα ήταν καλύτερη στις συχνότητες κάτω από τα 1000Hz και στις συχνότητες από πάνω από 2000Hz. Μεταξύ 1300-2000Hz τα αποτελέσματα της χωρικής διάκρισης ήταν αρκετά φτωχά.

Το 1992 οι Chandler και Grantham[9], έδειξαν ότι στις συχνότητες 500-5000Hz, με ταχύτητα από 10°/s μέχρι 180°/s, ο μέσος όρος των ελάχιστα αντιληπτών γωνιών ήταν 8.8°@10°/s μέχρι 20.2°@180°/s. Σε συχνότητα 3000Hz ο μέσος όρος της γωνία ηχητικής αντίληψης ήταν υψηλότερος (8.4° στα 3000Hz και 3.4° στις υπόλοιπες συχνότητες). Η ελάχιστη γωνία ηχητικής μετατόπισης (M.A.M.A.) και η ελάχιστη γωνία ηχητικής αντίληψης (Minimum Audible Angle M.A.A.) σε σχέση με το εύρος του ηχητικού ερεθίσματος σε γωνίες των 0° και 60°. Έτσι βρήκαν ότι η ελάχιστη αντιληπτή γωνία ηχητικής κίνησης μικραίνει δραματικά, καθώς το εύρος του ερεθίσματος αυξάνεται, αλλά χωρίς ιδιαίτερη διαφορά για 0° και 60°.

Τα παραπάνω πειράματα και έρευνες έγιναν με την χρήση ηχείων μέσα σε ανηχοϊκό θάλαμο. Στην έρευνά του, ο Yost (1981)[10], ο οποίος διεξήγαγε πειράματα με τη χρήση ακουστικών, χρησιμοποίησε δύο τρόπους ώστε να πετύχει την ηχητική πλαγίωση, μεταβάλλοντας είτε την χρονική διαφορά μεταξύ των δύο καναλιών των ακουστικών είτε την διαφορά έντασης μεταξύ τους. Για διαφορές έντασης (που μας ενδιαφέρουν περισσότερο στο πείραμά μας) άνω των 10 dB, ο ήχος απομονώνεται σε ένα από τα δύο κανάλια και δημιουργεί την αίσθηση του ενός από τα δύο άκρα.

### 3.2 Διεξαγωγή ψυχοακουστικής δοκιμασίας

Στην ψυχοακουστική δοκιμασία που διεξάγαμε, καταγράψαμε την χωρική αντίληψη του ακροατή σε σχέση με την φαινομενική ταχύτητα κίνησης της ηχητικής πηγής η οποία προέρχεται από την διαφορά έντασης στα ακουστικά του ακροατή. Δηλαδή μελετάμε την δυναμική ηχητική πλευρίωση λόγω εντασιακών διαφορών. Το σύστημα που χρησιμοποιήσαμε για το πείραμά μας αποτελείται από έναν υπολογιστή (Mac mini "Core 2 Duo" 2.66, 4GB RAM), μία κάρτα ήχου ( M-Audio Firewire 410) και ένα ζευγάρι ακουστικά (Sennheizer HD 545 reference). Στο πείραμα πήραν μέρος 35 ακροατές. Τα ηχητικά ερεθίσματα ήταν σήματα ζωνών λευκού θορύβου με εύρος ζώνης 250Hz :

- διάρκειας 30 δευτερολέπτων
- συχνότητας 500Hz και 2000Hz
- με σημείο αναφοράς τις 0° και 60°
- εύρος διαφοράς έντασης μεταξύ των δύο καναλιών από 0.5dB μέχρι 7.5dB με βήματα του 1dB
- ο ρυθμός μεταβολής είναι σταθερός (2dB/s) ή τυχαίος.

Μέτρο επίδοσης των ακροατών στην παρακολούθηση της δυναμικής πλευρίωσης των ηχητικών ερεθισμάτων είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της

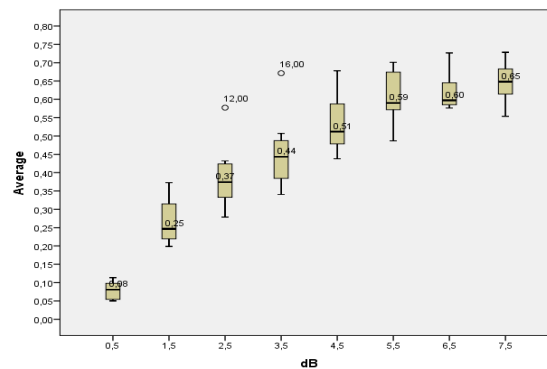
απόκρισης αντίληψης θέσης της πηγής και του Pattern μετατόπισης του ερεθίσματος. Ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας γίνεται με χρήση one-way ANOVA για κάθε τιμή του εύρους διαφοράς έντασης μεταξύ των καναλιών.

### 3.3. Αποτελέσματα

#### 3.3.1. Συντελεστές συσχέτισης αποτελεσμάτων με βάση την διαφορά έντασης μεταξύ των δυο καναλιών

Στο πείραμά μας, μελετήσαμε την πλευρίωση των ηχητικών πηγών ανάλογα με την διαφορά εντάσεων μεταξύ των δυο καναλιών και την βαθμιαία αύξηση τους από τα 0.5dB μέχρι τα 7.5 dB. Όπως αναφέραμε αυτή η διαβάθμιση στηρίχθηκε στην μελέτη του Yost(1981).

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε τον μέσο συντελεστή συσχέτισης μεταξύ μεταβαλλόμενου ερεθίσματος και απόκρισης των ακροατών ως προς το εύρος της μεταβολής μεταξύ των καναλιών.

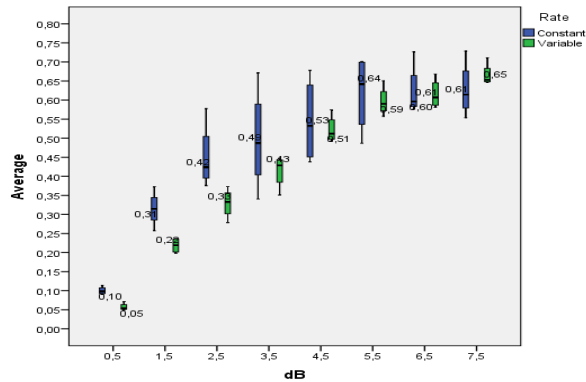


#### 3.3.1. Συντελεστής συσχέτισης με βάση την διαφορά έντασης μεταξύ των δυο καναλιών

Παρατηρείται ότι όσο πιο μεγάλο είναι το τόξο το οποίο κινείται η ηχητική πηγή, τόσο πιο εύκολο είναι για τον ακροατή να την εντοπίσει και να καταγράψει την κίνησή της. Επίσης παρατηρούμε ότι στις μικρότερες διαφορές εντάσεων, οι μέσοι όροι παρουσιάζουμε μεγαλύτερη συγκέντρωση, ενώ όσο η διαφορά μεγαλώνει παρατηρούμε ότι αυξάνεται το εύρος στο μέγιστο και ελάχιστο των μέσων όρων. Οι παρατηρούμενες διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές.

#### 3.3.2. Συντελεστές συσχέτισης ως προς την διαφορά έντασης ανάμεσα στα δυο κανάλια και σε σχέση με τον ρυθμό (ταχύτητα) «κίνησης» της πηγής

Στο επόμενο διάγραμμα αποτυπώνεται ο μέσος όρος συσχέτισης της διαφοράς έντασης μεταξύ των δυο καναλιών σε σχέση με τον τρόπο αυξομειώσεως αυτής (σταθερός ή τυχαίος).

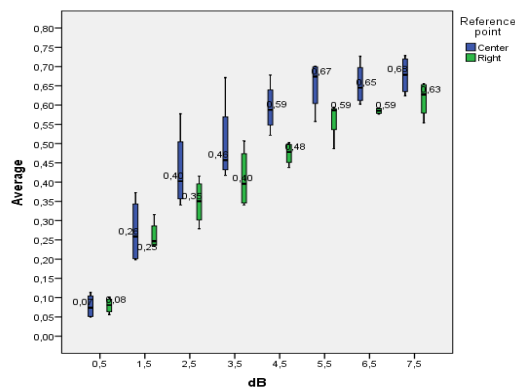


### 3.3.2 Συντελεστής συσχέτισης της διαφοράς έντασης μεταξύ των δυο καναλιών σε σχέση με τον τρόπο αυξομείωσής της

Παρατηρούμε ότι όταν ο ρυθμός αυξομείωσης είναι σταθερός, ο μέσος όρος είναι μεγαλύτερος στις μικρότερες διακυμάνσεις των dB και καθώς το εύρος διακύμανσης μεγαλώνει, η διαφορά μεταξύ των μέσων όρων μικραίνει μέχρι που στις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, ο μέσος όρος, όταν ο ρυθμός αυξομείωσης είναι τυχαίος, είναι μεγαλύτερος από όταν ο ρυθμός αυξομείωσης είναι σταθερός. Επίσης βλέπουμε ότι υπάρχει μεγαλύτερος βαθμός συγκέντρωσης στους μέσους όρους, όταν η διακύμανση των dB είναι με τυχαίο ρυθμό απ' ότι όταν είναι με σταθερό. Οι παρατηρούμενες διαφορές ως προς τον τρόπο αυξομείωσης της έντασης είναι στατιστικά σημαντικές, με εξαίρεση τις περιπτώσεις του μεγαλύτερου εύρους διακύμανσης στάθμης (6.5 και 7.5dB).

### 3.3.3 Συντελεστές συσχέτισης ως προς την διαφορά έντασης ανάμεσα στα δυο κανάλια και σε σχέση με το σημείο αναφοράς

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα βλέπουμε την σχέση που υπάρχει μεταξύ της διακύμανσης των dB της ηχητικής πηγής με το σημείο αναφοράς της.



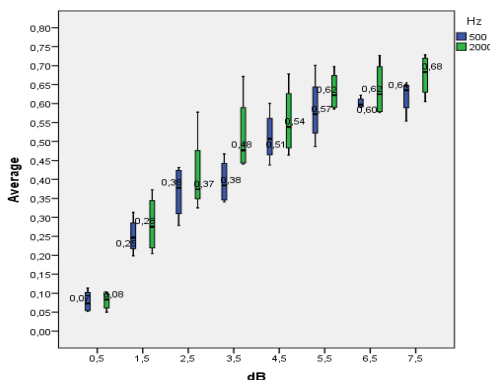


### 3.3.3 Συντελεστής συσχέτισης των dB διαφοράς μεταξύ των δυο καναλιών σε σχέση με το σημείο αναφοράς της ηχητικής πηγής

Έτσι μπορούμε να δούμε ότι στις μικρότερες διακυμάνσεις της έντασης μεταξύ των δυο καναλιών η διαφορά στους μέσους όρους είναι μικρές. Όσο η διακύμανση αυτή, η διαφορά των μέσων όρων μεγαλώνει, ενώ στις μεγαλύτερες διακυμάνσεις διαφοράς έντασης μεταξύ των δυο καναλιών η διαφορά αυτή βλέπουμε ότι μικραίνει. Επίσης βλέπουμε ότι υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση όταν η ηχητική πηγή κινείται με τυχαίο ρυθμό και μικρότερη διαφορά μεταξύ μέγιστων και ελάχιστων τιμών απ' ότι όταν η ηχητική πηγή κινείται με σταθερό ρυθμό. Οι παρατηρούμενες διαφορές ως προς το σημείο αναφοράς είναι στατιστικά σημαντικές με εξαίρεση αυτές των χαμηλότερων τιμών διακύμανσης στάθμης.

### 3.3.4 Σχέση μεταξύ διαφοράς έντασης και συχνότητας του ερεθίσματος

Η τελευταία σχέση που θα δούμε, είναι η σχέση που υπάρχει μεταξύ του εύρους διακύμανσης της διαφοράς έντασης μεταξύ των δυο καναλιών και της συχνότητας των ηχητικών πηγών. Έτσι στο παρακάτω σχεδιάγραμμα θα δούμε αυτή τη σχέση και κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματά μας για το εύρος “κίνησης” της ηχητικής πηγής σε σχέση με την συχνότητα της.



### 3.3.4 Συντελεστής συσχέτισης διαφοράς έντασης σε σχέση με τη συχνότητα της ηχητικής πηγής

Όπως φαίνεται, γενικά για τα 2kHz εμφανίζονται σχετικά υψηλότεροι μέσοι όροι συσχέτισης, αλλά με μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τα 500Hz. Επίσης, οι διαφορές μεταξύ των δύο συχνοτήτων σε αρκετές περιπτώσεις (διαφορές στάθμης) δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

#### 4. Συμπεράσματα

Η εργασία δίνει το έναυσμα για μια προσπάθεια ανάπτυξης και εξέλιξης στην τεχνολογία διεπαφών που μπορεί να βοηθήσει στον ερευνητικό τομέα της ευρύτερης Μουσικολογικής έρευνας και ειδικότερα στον τομέα της Ψυχοακουστικής.

Στην εργασία παρουσιάστηκε η ανάπτυξη ενός συστήματος πραγματικού χρόνου για δυναμική καταγραφή απόκρισης αντίληψης, με στοιχεία σχετικά με την πιστοποίηση της ακρίβειας καταγραφής, και την εφαρμογή του στην μελέτη αντίληψης της δυναμικής πλευριώσης ηχητικών πηγών με βάση την εντασιακή διωτική διαφορά.

Η μελέτη αυτή έδειξε ότι:

- Οι ηχητικές πηγές που εμφανίζουν ως σημείο αναφοράς το κέντρο έχουν μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης από αυτές που έχουν ως σημείο αναφοράς δεξιά.
- Οι ηχητικές πηγές της συχνότητας των 2kHz παρουσιάζουν σχετικά υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης από ηχητικές πηγές των 500Hz, αλλά χωρίς συστηματική τάση.
- Ηχητικές πηγές που κινούνται με σταθερό ρυθμό, παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης από τις ηχητικές πηγές που κινούνται με τυχαίο ρυθμό
- Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος της κίνησης της ηχητικής πηγής τόσο μεγαλύτερο είναι και ο βαθμός συσχέτισης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματά μας, είναι σαφές ότι το εύρος της εντασιακής μεταβολής αποτελεί τον ισχυρότερο παράγοντα διαφοροποίησης.

Στις υπόλοιπες μεταβλητές των ηχητικών πηγών δεν παρουσιάστηκαν μεγάλες διαφορές στις επιμέρους κατηγορίες και πιθανώς δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα αποτελέσματα δεν συμβαδίζουν με προηγούμενες μελέτες. Για παράδειγμα, αναφορικά με τις παρατηρούμενες στην εργασία μας επιδόσεις ως προς τη συχνότητα των ηχητικών ερεθισμάτων, η διαφορά αυτή είναι μικρή και σε πολλές περιπτώσεις στατιστικά μη σημαντική. Αντίθετα παλαιότερες έρευνες (Mills1958) έδειξαν ότι για ήχους 2kHz η διακριτική ικανότητα είναι μικρότερη σε σχέση με ήχους συχνότητας 500Hz. Μια πιθανή ερμηνεία της εμφανιζόμενης διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων της μελέτης μας από αυτά προηγούμενων μελετών είναι και το γεγονός ότι τα προηγούμενα πειράματα που μελετήθηκαν έγιναν με τη χρήση ηχείων. Αυτό σημαίνει ότι για την επίτευξη της κίνησης της ηχητικής πηγής, υπήρχε διαφορά χρόνου και έντασης μαζί. Ενώ στην περίπτωσή μας, λόγω της χρήσης ακουστικών, η διαφορά αυτή ήταν μόνο διαφορά έντασης.

Σε συνδυασμό με την περαιτέρω ανάπτυξη του μετρητικού συστήματος, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση προσφορότερων τρόπων λήψης καταγραφής πλευριώσης για την επαύξηση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων π.χ. αξιοποίηση εξελιγμένων τεχνικών καταγραφής κίνησης (motion tracking) τα οποία ήδη χρησιμοποιούνται σε άλλου είδους τεχνολογικά συστήματα.

## Αναφορές

- [1] “PsychoPy”, [http://www.hans.strasburger.de/psy\\_soft.html](http://www.hans.strasburger.de/psy_soft.html), Ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης 27/1/2014
- [2] “Psychoacoustic Software Suite”, <http://www.mathworks.gr/matlabcentral/fileexchange/28235-psychoacoustic-software-suite>, Ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης 27/1/2014
- [3] “Psychoacoustic Test System”, [http://www.noe.co.jp/en/product/pdt5/pd5\\_14.html](http://www.noe.co.jp/en/product/pdt5/pd5_14.html), Ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης 27/1/2014
- [4] “Psychoacoustic Software Suite”, <http://www.mathworks.gr/matlabcentral/fileexchange/28235-psychoacoustic-software-suite>, Ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης 27/1/2014
- [5] “ExpSuite: Software for Psychoacoustic Tests”, [http://www.kfs.oeaw.ac.at/index.php?option=com\\_content&view=article&id=353:expsuite-software-for-psychoacoustic-tests&catid=103:projdesc-audac3&Itemid=521&lang=de](http://www.kfs.oeaw.ac.at/index.php?option=com_content&view=article&id=353:expsuite-software-for-psychoacoustic-tests&catid=103:projdesc-audac3&Itemid=521&lang=de), Ημερομηνία τελευταίας Προσπέλασης 27/1/2014
- [6] “Visual Studio 21010”, <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/52f3sw5c%28v=vs.90%29.aspx> , Ημερομηνία τελευταίας Προσπέλασης 27/1/2014
- [7] Michael A. Akeroyd, «*The psychoacoustics of binaural hearing*», International Journal of Audiology 2006, Vol.45(Supplement 1):S25-S33
- [8] D.R. Perrott και J. Tucker, «*Dynamic directional activity*». Journal of the Acoustical Society of America, Vol.83, Issue 4, 1988.
- [9] David W. Chandler and D. Wesley Grantham, «*Minimum audible movement angle in the horizontal plane as a function of stimulus frequency and bandwidth, source azimuth, and velocity*», Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 91, Issue 3, 1992
- [10] Brian C.J. Moore, *Hearing*, Academic Press, 1995, σελ. 298-303

## ***Η επίδραση του τονικού ύψους στην εκτίμηση της συμφωνίας/διαφωνίας δίφωνων μουσικών συνηχήσεων***

Λάζαρος Μητσκόπουλος<sup>1,a</sup>, Γεώργιος Παπαδέλης<sup>2,b</sup>, Φίλιππος Καργόπουλος<sup>1,c</sup> & Γεώργιος Παπανικολάου<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Ψυχολογίας, Α.Π.Θ.

<sup>2</sup> Τμήμα Μουσικών Σπουδών, Α.Π.Θ.

<sup>3</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ, Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [mitskolt@psy.auth.gr](mailto:mitskolt@psy.auth.gr), <sup>b</sup> [papadeli@mus.auth.gr](mailto:papadeli@mus.auth.gr), <sup>c</sup> [kargop@psy.auth.gr](mailto:kargop@psy.auth.gr), <sup>d</sup> [pap@eng.auth.gr](mailto:pap@eng.auth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Το φαινόμενο της συμφωνίας και διαφωνίας αποτελεί ένα από τα κεντρικά ζητήματα της ψυχοακουστικής, για το οποίο έχουν προταθεί πολλές θεωρίες και πολλά μοντέλα υπολογισμού [1]. Η παρούσα έρευνα εξέτασε την επίδραση του τονικού ύψους στην υποκειμενική εκτίμηση της αρμονικότητας ή δυσαρμονικότητας δίφωνων μουσικών συνηχήσεων σε άτομα χωρίς μουσική εκπαίδευση. Η πειραματική διαδικασία βασίστηκε σε ηχογραφημένες εκτελέσεις δίφωνων συνηχήσεων στο πιάνο με τη χρήση δύο διαφορετικών τεχνικών ηχοληψίας. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν μια ιεραρχία στην αξιολόγηση των συνηχήσεων και σημαντικές διαφοροποιήσεις στις αξιολογήσεις ανάλογα με την περιοχή της μουσικής έκτασης στην οποία βρίσκονταν, αλλά μη σημαντικές διαφορές ως προς την τεχνική ηχοληψίας. Τα ευρήματα συζητήθηκαν σε σύνδεση με τη μουσική θεωρία και τα διαθέσιμα θεωρητικά πλαίσια.

### ***The effect of pitch register on consonance/dissonance rating of musical intervals***

#### **ABSTRACT**

*The phenomenon of consonance and dissonance constitutes one of the central topics in psychoacoustics, also being one for which there have been proposed many theories and models [1]. The present study examined the effect of pitch register on perceived consonance/dissonance of concurrently sounding dyads by individuals without formal musical training. The experimental procedure was based on recorded performances of the dyads on the piano using two different sound recording techniques. The results revealed a hierarchy in the evaluation of consonance/dissonance and significant differences in ratings depending on the register but no significant differences as to the sound recording technique that was used. The findings were discussed in the light of current frameworks of music theory.*

## Εισαγωγή

Ένα σημαντικό γνώρισμα όλων των μουσικών συνηγήσεων είναι το γεγονός ότι μπορούν να γίνουν αντιληπτές ως αρμονικές, εύηχες ή δυσαρμονικές, διάφωνες. Η διάκριση αυτή περιγράφεται στη μουσική θεωρία με τους όρους *συμφωνία* και *διαφωνία* και ξεκίνησε από τον Πυθαγόρα [2], ο οποίος υποστήριξε ότι τα μουσικά διαστήματα με αναλογίες 1:2, 2:3 και 3:4, δηλαδή η οκτάβα και τα διαστήματα της φυσικής  $5^{15}$  και  $4^{15}$  είναι αρμονικά ή σύμφωνα, ενώ τα υπόλοιπα είναι δυσαρμονικά ή διάφωνα. Αργότερα, ο Zarlino [3] πρότεινε να συμπεριληφθούν στην κατηγορία των συμφώνων και τα διαστήματα  $3^{15}$  -μεγάλα και μικρά-, καθώς και τα διαστήματα  $6^{15}$  -μεγάλα και μικρά-, των οποίων οι αναλογίες ήταν 4:5, 5:6, 3:5 και 5:8 αντίστοιχα. Τα διαστήματα αυτά ονομάστηκαν ατελείς συμφωνίες σε αντιδιαστολή με τις τέλει που είχαν διατυπωθεί νωρίτερα από τον Πυθαγόρα.

Μέχρι τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, το φαινόμενο της συμφωνίας και διαφωνίας ενέπιπτε αποκλειστικά στα ενδιαφέροντα της φιλοσοφίας, των μαθηματικών και της μουσικής θεωρίας, ώσπου ο Hermann von Helmholtz [4] πρότεινε μια ψυχοφυσιολογική προσέγγιση για το φαινόμενο σύμφωνα με την οποία η διαφωνία οφείλεται στα διακροτήματα που δημιουργούν οι συγκρούσεις παρακείμενων αρμονικών καθώς διεγείρουν κοντινές ομάδες υποδεκτικών κυττάρων στον κοχλία. Η αισθητηριακή εμπειρία που συνδέεται με αυτή τη διεργασία ονομάζεται *τραχύτητα* (*roughness*).

Πειραματικές έρευνες στην αντίληψη της συμφωνίας και διαφωνίας ενίσχυσαν την εγκυρότητα της θεωρίας του Helmholtz [4] αναδεικνύοντας επιπλέον τη σημασία παραγόντων όπως του εύρους της κρίσιμης ζώνης [5] και της στάθμης των προσλαμβανόμενων ήχων [6-7]. Τα μοντέλα αυτά δέχτηκαν κριτικές τόσο σε μεθοδολογικό [8] όσο και σε συμπερασματολογικό επίπεδο [1, 9] και κρίθηκαν ως ανεπαρκή να δώσουν μια πλήρη εξήγηση της αντιληπτής συμφωνίας και διαφωνίας [10].

Η ανεπάρκεια αυτή έδωσε ώθηση για ανάπτυξη νέων ψυχοακουστικών μοντέλων με στόχο να παρέχουν μια πληρέστερη περιγραφή των φαινομένων που σχετίζονται με την τραχύτητα [11], ενώ παράλληλα αναπτύχθηκαν και κάποια θεωρητικά πλαίσια τα οποία επιχειρήσαν μια συνθετική προσέγγιση στην έννοια της συμφωνίας συνδυάζοντας την τραχύτητα με τη συμφωνία σε μουσικοθεωρητικό πλαίσιο αναφοράς [12] και επικαλούμενα εμπλεκόμενους γνωστικούς μηχανισμούς [13].

Παρά το εύρος τους, τα παραπάνω μοντέλα δεν έχουν επιχειρήσει μια συστηματική σύνδεση των προτάσεων και των ευρημάτων τους με παραμέτρους των μουσικών ήχων όπως το τονικό ύψος, δηλαδή τη θέση ενός φθόγγου στην μουσική έκταση. Έτσι, η παρούσα έρευνα είχε ως στόχο να εξετάσει την επίδραση του τονικού ύψους στην υποκειμενική εκτίμηση της αρμονικότητας ή δυσαρμονικότητας δίφωνων μουσικών συνηγήσεων από σύνθετους ήχους και κατ'επέκταση να διερευνήσει εάν ο βαθμός της συμφωνίας ή διαφωνίας των αντίστοιχων μουσικών διαστημάτων, όπως εκφράζεται από την τονική μουσική θεωρία, είναι ανεξάρτητος από τη θέση ενός συγκεκριμένου διαστήματος κατά μήκος της μουσικής έκτασης. Η βασική υπόθεση της έρευνας ήταν ότι ακόμη και οι σύμφωνες συνηγήσεις, όπως αυτές σε διαστήματα  $3^{15}$  και  $5^{15}$  θα αξιολογηθούν ως

λιγότερο αρμονικές στη χαμηλή περιοχή συγκριτικά με τις αντίστοιχες συνηχήσεις στη μέση και την υψηλή περιοχή της μουσικής έκτασης.

## **1. Μέθοδος**

### *1.1 Πειραματικό σχέδιο*

Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν ήταν το τονικό ύψος ή η θέση στη μουσική έκταση ως ανεξάρτητη μεταβλητή και η υποκειμενική εκτίμηση της συμφωνίας ή διαφωνίας ως εξαρτημένη μεταβλητή. Το τονικό ύψος διακρίθηκε σε τρεις κατηγορίες κατ' αντιστοιχία με τρεις περιοχές της μουσικής έκτασης, τη χαμηλή τη μέση και την υψηλή. Παράλληλα, ελέγχθηκε πειραματικά η επίδραση της τεχνικής ηχοληψίας στη διαμόρφωση των εκτιμήσεων.

### *1.2 Συμμετέχοντες*

Στο πείραμα συμμετείχαν κατόπιν τυχαίας επιλογής 40 άτομα τα οποία ήταν φοιτητές/τριες ή εργαζόμενοι/ες και εκ των οποίων οι 16 ήταν άντρες. Κανένας από τους συμμετέχοντες δεν είχε μουσική εκπαίδευση και κανένας, επίσης, δεν διέθετε απόλυτη ακοή τονικού ύψους. Οι ηλικίες τους κυμαίνονταν από 16 έως 30 χρονών με μέσο όρο 22.53 και τυπική απόκλιση 2.24.

### *1.3 Έργα-υλικό*

Τα ερεθίσματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της συμφωνίας ή διαφωνίας ήταν 138 δίφωνες μουσικές συνηχήσεις. Οι συνηχήσεις αυτές αποτελούνταν από τα 12 πιθανά διαστήματα από το ημιτόνιο ως την οκτάβα σε κάθε μία από 3 περιοχές -χαμηλή, μέση και υψηλή- και τις 11 αναστροφές τους. Ειδικότερα, ως θεμέλιοι φθόγγοι χρησιμοποιήθηκαν η C2 (65 Hz) για τη χαμηλή περιοχή με τη C3 (130 Hz) για τις αναστροφές των διαστημάτων στην περιοχή αυτή, η C4 (261 Hz) για τη μέση περιοχή με την C5 (523 Hz) για τις αναστροφές και η C6 (1046 Hz) για την υψηλή περιοχή με την C7 (2093 Hz) για τις αναστροφές. Όλες οι συνηχήσεις εκτελέστηκαν σε ακουστικό πιάνο (Steinway grand piano) με ομοιόμορφη δυναμική (mf) και μέση διάρκεια 4 sec περίπου και ηχογραφήθηκαν με τη χρήση δύο τυπικών μεθόδων ηχοληψίας: α) Με προσομοιωτή κεφαλής-κορμού (B&K Head and Torso Simulator Type 4100 – HATS 4100) τοποθετημένου στη θέση του πιανίστα. Η μέθοδος αυτή αποτυπώνει το φασματικό περιεχόμενο του ήχου που προσλαμβάνει ένας εκτελεστής σε πραγματικές συνθήκες συνυπολογίζοντας την επίδραση της κεφαλής και του κορμού και μπορεί να αποδώσει τη συγκεκριμένη ηχητική ποιότητα κατά την αναπαραγωγή μέσω ακουστικών. β) Με σύστημα δύο πυκνωτικών μικροφώνων μεγάλου διαφράγματος με καρδιοειδή πολική απόκριση, σε διάταξη AB stereo (1m) τοποθετημένων κατά μήκος του ανοίγματος του καπακιού και σε απόσταση 1m περίπου από τις μεσαίες χορδές του πιάνου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στην ηχοληψία του πιάνου προκειμένου να αποδώσει την αίσθηση της στερεοφωνίας κατά την αναπαραγωγή του ήχου εκμεταλλευόμενη τη χρονική καθυστέρηση (διαφορά φάσης) με την οποία ο ίδιος ήχος προσλαμβάνεται από τα δύο μικρόφωνα ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Η ηχογράφηση πραγματοποιήθηκε στο χώρο ηχοληψίας

ενός τυπικού στούντιο ηχογραφήσεων στο Εργαστήριο Ηλεκτροακουστικής και Τηλεοπτικών Συστημάτων (Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Α.Π.Θ.). Η παρουσίαση των ηχογραφημένων συνηχησεων στους συμμετέχοντες έγινε μέσω επαγγελματικών ακουστικών κλειστού τύπου. Το πειραματικό σχέδιο υλοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Psychopy2 [14]. Η καταγραφή των αξιολογήσεων των ακροατών για κάθε συγκεκριμένη συνήχηση έγινε με την παρουσίαση μιας οπτικής αναλογικής κλίμακας σε οθόνη υπολογιστή, με το αριστερό άκρο να αντιπροσωπεύει το «πολύ δυσαρμονικό» και το δεξί άκρο να αντιπροσωπεύει το «πολύ αρμονικό». Χρησιμοποιώντας ένα ποντίκι οι συμμετέχοντες έπρεπε να κάνουν κλικ στο σημείο της κλίμακας που αντιπροσώπευε την εκτίμηση τους για την εκάστοτε μουσική συνήχηση.

#### 1.4 Διαδικασία

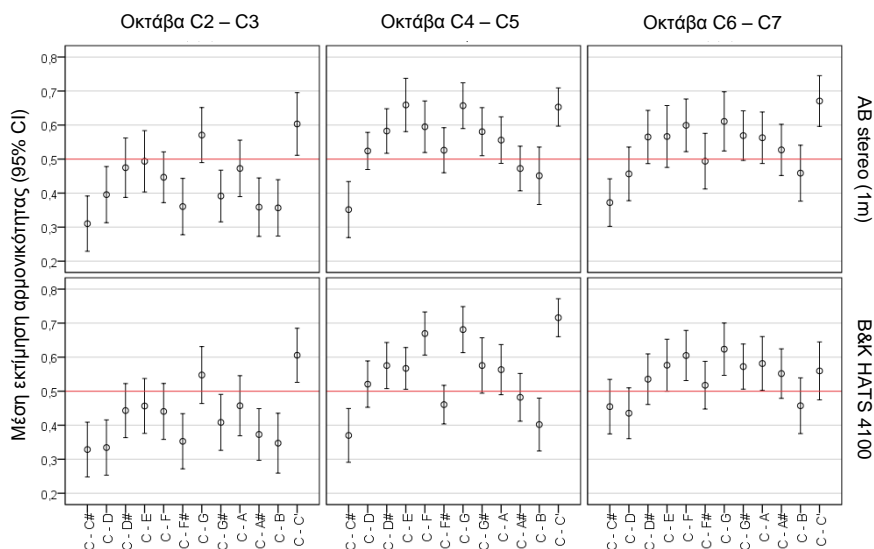
Το πείραμα διεξήχθη ξεχωριστά για κάθε συμμετέχοντα σε χώρους ασφαλείς από εξωτερικούς περισπασμούς. Οι συμμετέχοντες ενημερώθηκαν αναλυτικά για τη διαδικασία και το ρόλο τους στο πείραμα πριν την έναρξη. Η αξιολόγηση έγινε μεμονωμένα για κάθε μουσική συνήχηση και υπήρχε η δυνατότητα επαναληπτικής ακρόασης της συνήχησης πριν από την αξιολόγηση. Η στατιστική ανάλυση διενεργήθηκε μέσω του στατιστικού πακέτου IBM SPSS 22.0.

## 2. Αποτελέσματα

### 2.1 Πολυμεταβλητή ανάλυση διακύμανσης (MANOVA)

Η ανάλυση έδειξε σημαντικές διαφορές ανάμεσα στους μέσους όρους αξιολόγησης υπό την επίδραση του τονικού ύψους, χρησιμοποιώντας το Pillai's trace,  $V = 0,274$ ,  $F(24, 446) = 2,947$ ,  $p = ,00$ ,  $\eta_p^2 = ,13$ . Δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στους μέσους όρους αξιολόγησης υπό την επίδραση της τεχνικής ηχοληψίας (Pillai's trace,  $V = 0,053$ ,  $F(12, 222) = 1,041$ ,  $p = ,732$ ).

Επιπρόσθετες μονομεταβλητές αναλύσεις στα επίπεδα του τονικού ύψους κατέδειξαν στατιστικώς σημαντική διαφορά στους μέσους όρους εκτίμησης ανά περιοχή (σχήμα 2.1) για όλα τα μουσικά διαστήματα εκτός των διαστημάτων της 2<sup>ης</sup> μικρής (C-C#) και της οκτάβας (C-C'). Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν ανά ζεύγη συγκρίσεις για περαιτέρω διερεύνηση των διαφορών στα μουσικά διαστήματα ως προς τις τρεις περιοχές της μουσικής έκτασης οι οποίες έδειξαν τα ακόλουθα: Όλα τα μουσικά διαστήματα στους μέσους όρους των οποίων παρατηρήθηκαν διαφορές συγκέντρωσαν σημαντικά χαμηλότερη αξιολόγηση στην χαμηλή περιοχή συγκριτικά με την μέση περιοχή ενώ, εκτός του διαστήματος της 7<sup>ης</sup> μεγάλης (C-B), δεν υπήρξε καμία σημαντική διαφορά μεταξύ των αξιολογήσεων στα διαστήματα μεσαίας και υψηλής περιοχής. Τέλος, η σύγκριση των αξιολογήσεων στα διαστήματα χαμηλής και υψηλής περιοχής έδειξε στατιστικώς σημαντικές διαφορές στις αξιολογήσεις υπέρ της υψηλής περιοχής για όλα τα διαστήματα εκτός της 2<sup>ης</sup> μεγάλης (C-D) και της 5<sup>ης</sup> (C-G).

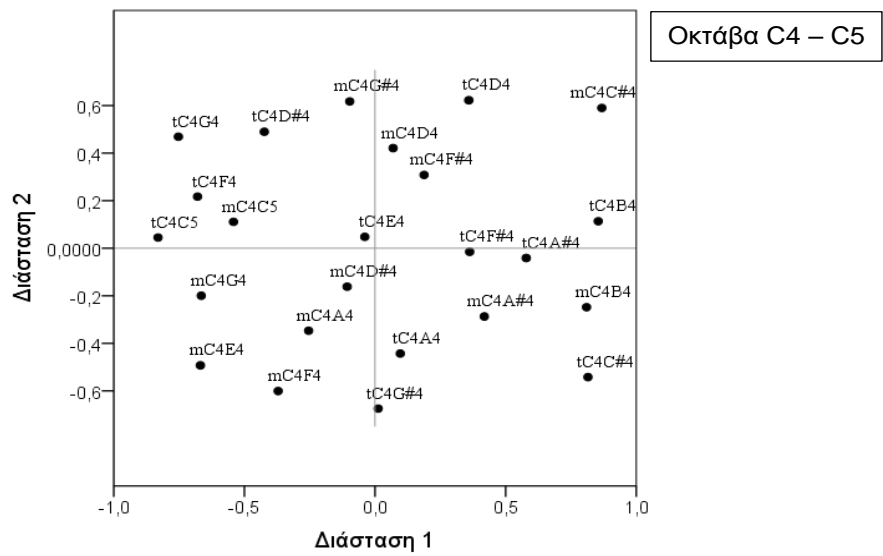
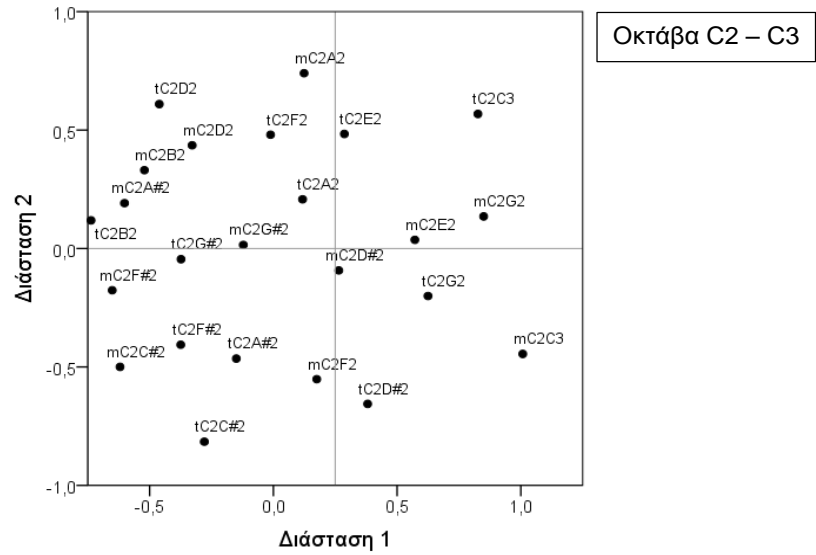


Σχήμα 2.1 Μέσες εκτιμήσεις της αρμονικότητας (0=πολύ δυσαρμονική, 1=πολύ αρμονική) για κάθε μουσική συνήχηση στις τρεις διαφορετικές περιοχές της μουσική έκτασης και για τις δύο τεχνικές ηχοληψίας.

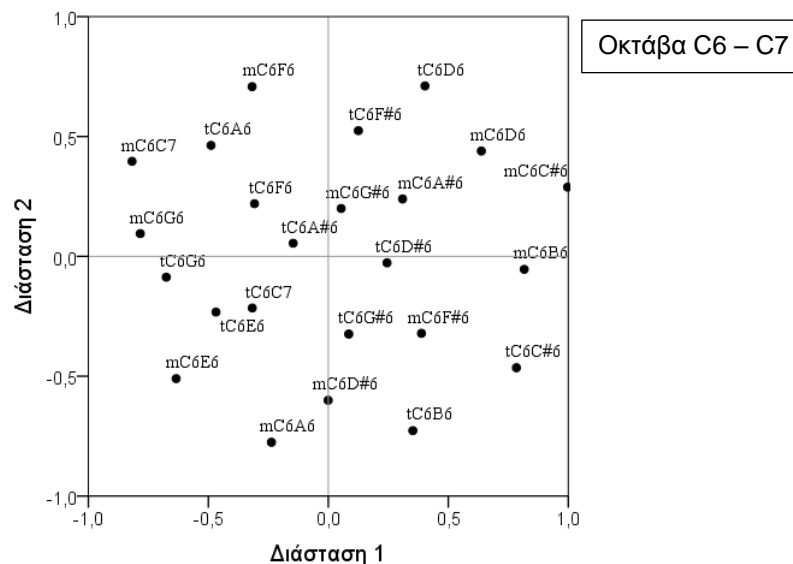
## 2.2 Πολυδιάστατη Κλιμακοποίηση (Multidimensional Scaling)

Για την διερεύνηση των εγγυτήτων ή αποστάσεων μεταξύ των μουσικών διαστημάτων και την γεωμετρική αναπαράστασή τους σε έναν αντιληπτικό χάρτη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PROXSCAL για μετρική πολυδιάστατη κλιμακοποίηση. Η αναπαράσταση των αποστάσεων έγινε σε μία και σε δύο διαστάσεις. Η μία διάσταση αναπαριστά το 85% της διασποράς των τιμών ( $S\text{-Stress} = ,25$ ) ενώ οι δύο διαστάσεις αναπαριστούν το 94% της διασποράς των ( $S\text{-Stress} = ,13$ ). Οι γραφικές αναπαραστάσεις φανέρωσαν κάποιες κεντρικές τάσεις σχετικά με την αντιληπτική ιεραρχία των μουσικών διαστημάτων ως προς την αρμονικότητα ή τη δυσαρμονικότητά τους (βλ. Σχήμα 2.2). Τις μικρότερες αξιολογήσεις ανεξαρτήτως από το τονικό ύψος και την τεχνική ηχοληψίας φάνηκε να συγκεντρώνουν τα διαστήματα 2<sup>ης</sup> μικρά (C-C#) και 7<sup>ης</sup> μεγάλα (C-B) ενώ αμέσως επόμενα στο χώρο βρίσκονταν τα τρίτονα (C-F#), και τα διαστήματα 7<sup>ης</sup> μικρά (C-A#) και 2<sup>ης</sup> μεγάλα (C-D). Στο αντίθετο άκρο του άξονα συγκεντρώθηκαν τα μουσικά διαστήματα που αξιολογήθηκαν ως περισσότερο αρμονικά από τους συμμετέχοντες, δηλαδή τα διαστήματα 3<sup>ης</sup> μεγάλα (C-E), 5<sup>ης</sup> (C-G) και τα διαστήματα οκτάβας (C-C'). Μια τελευταία ομάδα διαστημάτων που συμπεριλαμβάνει τα 6<sup>ης</sup> μικρά (C-G#) και μεγάλα (C-A), τα 4<sup>ης</sup> (C-F) και τα 3<sup>ης</sup> μικρά (C-D#) συγκέντρωσε αξιολογήσεις που την τοποθέτησαν περίπου στο κέντρο αναφορικά με τα αρμονικά και τα δυσαρμονικά διαστήματα.





Σχήμα 2.2 Διδιάστατη αναπαράσταση των εγγυτήτων στις αξιολογήσεις των διαστημάτων στη χαμηλή, μέση και υψηλή περιοχή (επόμενη σελίδα) και για τις δύο τεχνικές ηχοληψίας ( $m = AB$  stereo,  $t = HATS$ ).



Σχήμα 2.2 Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα.

### 3. Συμπεράσματα

Οι αναλύσεις που περιγράφηκαν παραπάνω στηρίζουν την ερευνητική υπόθεση καθώς οι υποκειμενικές εκτιμήσεις αρμονικότητας ή δυσαρμονικότητας δεν έμειναν σταθερές ανά διάστημα στις τρεις περιοχές της μουσικής έκτασης, και ακόμα και τα διαστήματα  $3^{15}$  και  $5^{15}$  τα οποία χαρακτηρίζονται ως σύμφωνα από τη μουσική θεωρία, αξιολογήθηκαν ως λιγότερο αρμονικά στη χαμηλή περιοχή συγκριτικά με τη μέση και την υψηλή.

Η δυσαρμονικότητα της χαμηλής περιοχής μπορεί να ερμηνευθεί από το μεγαλύτερο πλήθος αρμονικών συγκριτικά με τις άλλες δύο περιοχές [4-5], γεγονός που συνεπάγεται περισσότερες συγκρούσεις μεταξύ παρακείμενων αρμονικών στην περίπτωση συνήχησης. Οι περισσότερες αυτές συγκρούσεις οδηγούν σε μεγαλύτερης έκτασης διακροτήματα συνοδευόμενα από μεγαλύτερου βαθμού τραχύτητα.

Επίσης, έναν άλλο παράγοντα στον οποίο πιθανότατα αποδίδεται αυτή η διαφορά μεταξύ των περιοχών της έκτασης, συνιστά η μεταβλητότητα του εύρους της κρίσιμης ζώνης [15]. Το εύρος αυτό είναι μικρό στην υψηλή περιοχή αλλά μεγαλώνει προοδευτικά προς την χαμηλή περιοχή της μουσικής έκτασης. Επομένως, ήταν αναμενόμενο, όπως και συνέβη, τα διαστήματα μέχρι και την  $5^{\eta}$  να συγκεντρώνουν χαμηλότερες αξιολογήσεις στις χαμηλές περιοχές, μια τάση που μειώνεται ανεβαίνοντας κατά μήκος του ηχητικού φάσματος. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι η τάση αυτή δεν ισχύει και για το διάστημα  $2^{15}$  μικρό το οποίο βρίσκεται μέσα στο εύρος της κρίσιμης ζώνης ακόμα και στην υψηλή περιοχή.

Ενδιαφέρον από ερμηνευτικής σκοπιάς παρουσιάζουν και οι κεντρικές τάσεις που προέκυψαν από την πολυδιάστατη κλιμακοποίηση. Κατά μήκος του οριζόντιου

άξονα, τα διαστήματα παρουσιάζουν μια ιεραρχία η οποία παραμένει σχετικά σταθερή ανάμεσα στις τρεις περιοχές της έκτασης, γεγονός που μπορεί να προσεγγιστεί τόσο με μια ακουστική ερμηνεία όσο και με μια ψυχολογική ερμηνεία. Επίσης, είναι δυνατό να γίνει μια ευρύτερη σύνδεση αυτών των αποτελεσμάτων και με τη μουσική θεωρία.

Αρχικά, τα διαστήματα 2<sup>ης</sup> και 7<sup>ης</sup> μικρά και μεγάλα καθώς και τα τρίτονα, τα οποία συγκέντρωσαν τις χαμηλότερες αξιολογήσεις είναι αυτά τα οποία η μουσική θεωρία έχει χαρακτηρίσει ως διάφωνα έχοντας ως βάση την περιπλοκότητα των αναλογιών συχνοτήτων τους. Αντίθετα, τα διαστήματα τα οποία συγκέντρωσαν τις υψηλότερες αξιολογήσεις στα πλαίσια κάθε τονικής περιοχής, δηλαδή τα διαστήματα 3<sup>ης</sup> μεγάλα, 5<sup>ης</sup> και οκτάβας είναι αυτά τα οποία η μουσική θεωρία έχει χαρακτηρίσει ως σύμφωνα έχοντας ως βάση την απλότητα των αναλογιών συχνοτήτων τους. Η τελευταία ομάδα διαστημάτων η οποία ως προς τις αξιολογήσεις που συγκέντρωσε βρίσκεται ανάμεσα στις δύο προηγούμενες περιλαμβάνει τα διαστήματα 4<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> μικρά και 6<sup>ης</sup> μικρά και μεγάλα τα οποία είναι ατελείς συμφωνίες στη μουσική θεωρία εκτός της 4<sup>ης</sup> που είναι τέλεια. Οι αναλογίες των συχνοτήτων αυτών των διαστημάτων είναι πολυπλοκότερες από αυτές των τέλει συμφωνιών αλλά απλούστερες από αυτές των διάφωνων.

Ως προς τη διασπορά των διαστημάτων κατά μήκος του κάθετου άξονα, δεν ήταν δυνατή μια σαφής σύνδεση των διαφοροποιήσεων στις αξιολογήσεις με κάποιο φυσικό ή αντιληπτικό μέγεθος. Είναι πιθανό οι διαφοροποιήσεις αυτές να οφείλονται σε στοιχεία των τεχνικών ηχοληψίας τα οποία δεν έγιναν φανερά στις συγκρίσεις μεγάλης κλίμακας στα πλαίσια της πολυμεταβλητής ανάλυσης. Ωστόσο, η έλλειψη μιας υποτυπώδους ομαδοποίησης των διαστημάτων ανάλογα με τις τεχνικές ηχοληψίας αποτελεί ένα πρόβλημα για την ερμηνεία αυτή. Υπάρχει, επίσης, και η πιθανότητα οι διαφοροποιήσεις αυτές να οφείλονται και σε παραμέτρους που δεν ελέγχθηκαν βάσει του πειραματικού σχεδίου, όπως η ανομοιόμορφη επίδραση φασικών διαφορών μεταξύ των φθόγγων κάθε συνήχησης, ή παραγόντων που συνδέονται με κεντρικές διεργασίες της ακουστικής επεξεργασίας. Επομένως, η ιεραρχία η οποία φάνηκε στις υποκειμενικές αξιολογήσεις συνδέεται στενά με την ιεραρχία που θεμελίωσε η θεωρία της τονικής μουσικής και τούτο το εύρημα είναι αξιοσημείωτο έχοντας υπόψη ότι στο πείραμα συμμετείχαν άτομα χωρίς μουσική εκπαίδευση. Το πρότυπο αυτό μπορεί να οφείλεται σε ακουστικές ιδιότητες των ίδιων των ηχητικών ερεθισμάτων [4-5], σε παράγοντες που σχετίζονται με ανώτερες γνωστικές λειτουργίες και πολιτισμικές επιδράσεις ή και σε ένα συνδυασμό των δύο παραπάνω [12-13]. Η τελευταία περίπτωση προσφέρει ένα ενδιαφέρον ερώτημα και για μελλοντικές έρευνες.

#### 4. Αναφορές

- [1] P. N. Vassilakis, *Perceptual and Physical Properties of Amplitude Fluctuation and their Musical Significance*. Doctoral Dissertation. Los Angeles: University of California, Los Angeles (2001).
- [2] D. Deutsch, (ed.) *The psychology of music*. Academic Press (2012).
- [3] J. Tenney, *A history of consonance and dissonance*. New York: Excelsior (1988).
- [4] H. L. F. Helmholtz, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*, 2nd ed., A.J. Ellis, Trans. New York: Dover Publications, Inc., 1875 (1954).
- [5] R. Plomp and W. J. Levelt, «Tonal consonance and critical bandwidth» *J. Acoust. Soc. Am.*, **38**(4), pp 548-560 (1965).
- [6] A. Kameoka and M. Kuriyagawa, «Consonance theory, part I: Consonance of dyads» *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**(6), pp 1451- 1459 (1969).
- [7] A. Kameoka and M. Kuriyagawa, «Consonance theory, part II: Consonance of complex tones and its calculation method» *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**(6), pp 1460-1469 (1969).
- [8] K. Mashinter, «Calculating sensory dissonance: Some discrepancies arising from the models of Kameoka & Kuriyagawa, and Hutchinson & Knopoff» *Empirical Musicology Review*, **1**(2), pp 65-84 (2006).
- [9] E. Terhardt, «Pitch, consonance and harmony» *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**(5), pp. 1061-1069 (1974).
- [10] G. M. Bidelman, «The role of the auditory brainstem in processing musically relevant pitch» *Frontiers in Psychology*, **4**, pp 1-13 (2013).
- [11] P. N. Vassilakis, «SRA: A web-based research tool for spectral and roughness analysis of sound signals» in *Proceedings of the 4th Sound and Music Computing (SMC) Conference*, edited by C. Spyridis et al. Lefkada, Greece: National Kapodistrian University of Athens, pp 319-325 (2007).
- [12] P. N. Johnson-Laird, E. O. Kang and Y. C. Leong, «On musical dissonance» *Music Perception*, **30**(1), pp 19-35 (2012).
- [13] N. McLachlan, D. Marco, M. Light, & S. Wilson, «Consonance and pitch» *Journal of Experimental Psychology: General*, **142**(4), pp 1142-1158 (2013).
- [14] J. W. Peirce, «PsychoPy-psychophysics software in Python» *Journal of neuroscience methods*, **162**(1), pp 8-13 (2007).
- [15] E. Zwicker, G. Flottorp, & S. S. Stevens, «Critical bandwidth in loudness summation» *J. Acoust. Soc. Am.*, **29**(5), pp 548-557 (1957).

# ***Εισαγωγή στις Head Related Transfer Functions και διερεύνηση της χρήσης μη εξατομικευμένων HRTF για την σύνθεση binaural σημάτων***

Νικόλαος Μπούρας<sup>a</sup> & Γεώργιος Παπανικολάου<sup>b</sup>

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών ΗΥ, Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [kin@wna.gr](mailto:kin@wna.gr), <sup>b</sup> [pap@eng.auth.gr](mailto:pap@eng.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Οι Head related transfer functions χρησιμοποιούνται στη σύνθεση binaural σημάτων, η αναπαραγωγή των οποίων με τη χρήση ακουστικών δημιουργεί την ψευδαίσθηση της χωρικής θέσης του ήχου. Η αντίληψη της θέσης αυτής διαφέρει από ακροατή σε ακροατή, λόγω των διαφορετικών ανατομικών χαρακτηριστικών. Η μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη χρήση των εξατομικευμένων HRTF του εκάστοτε ακροατή. Δεδομένης της δυσκολίας υπολογισμού των φίλτρων αυτών, χρησιμοποιούνται συνήθως οι μη εξατομικευμένες HRTF από δημόσιες βιβλιοθήκες. Στην παρούσα εργασία μελετάται αν είναι δυνατή η επιλογή μίας βέλτιστης μη εξατομικευμένης HRTF μέσα από ένα πεπερασμένο σύνολο φίλτρων, μέσω ενός σύντομου ψυχοακουστικού πειράματος. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής αναδεικνύουν την μοναδικότητα των HRTF και τη δυσκολία επιλογής μιας μη εξατομικευμένης HRTF. Ο συνδυασμός πολλών μη εξατομικευμένων HRTF για τη σύνθεση μιας βέλτιστης HRTF, φαίνεται να είναι μια αποδεκτή λύση.*

## ***Introduction to Head Related Transfer Functions and evaluation of non-individualized HRTF in synthesizing binaural signals***

### **ABSTRACT**

*The head related transfer functions are used in the synthesis of binaural signals, which create the sense of spatial position of the sound source when reproduced in headphones. The subjective perception of this position varies from listener to listener due to different anatomical features. Therefore the best accuracy is achieved by applying individualized HRTF. Given the difficulty of calculating these filters, non-individualized public HRTF are usually applied in practise. In this study we examine whether it is possible to select*

*an optimal non-individualized HRTF through a finite set of filters through a short psychoacoustic experiment. The results of this study highlight the uniqueness of the HRTF and the difficulty of choosing a non-individualized HRTF. It appears that combining multiple non-individualized HRTFs could provide an optimized HRTF synthesis for an individual.*

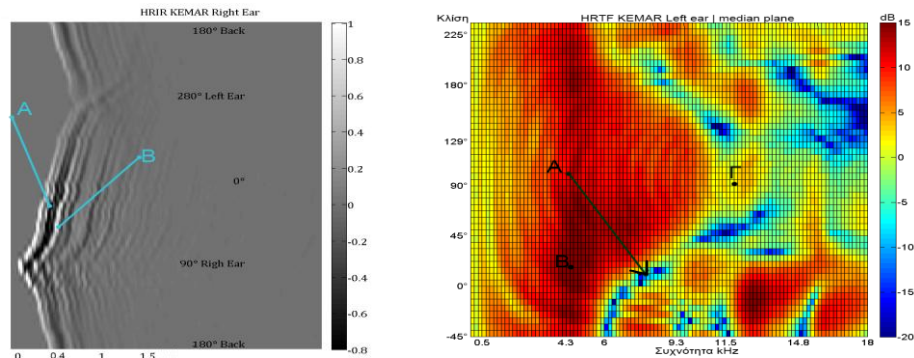
## 1. Εισαγωγή

Η ηχητική πίεση που δημιουργεί μια τυχαία ακουστική πηγή στο τύμπανο του αυτιού, περιγράφεται στο πεδίο του χρόνου από την Head Related Impulse Response (HRIR) ή στο πεδίο της συχνότητας από την Head related Transfer Function (HRTF). Οι μετρήσεις των HRTF πραγματοποιούνται με τη χρήση καθοδικών μικρόφωνων στο κανάλι του αυτιού. Από κάθε θέση στο χώρο που μας ενδιαφέρει, αναπαράγεται ένα ηχητικό σήμα και καταγράφεται η ηχητική πίεση στο κανάλι του αυτιού του ακροατή, η ηχητική πίεση στο σημείο του κέντρου του κεφαλιού του, όταν αυτός δεν είναι παρών και η ηχητική πίεση που παράγει η ηχητική πηγή, έστω ηχείο. Μετασχηματίζοντας τις παραπάνω μετρήσεις στο πεδίο της συχνότητας και υπολογίζοντας τον λόγο:

$$\left[ \frac{P_{\text{καναλιού}}}{E_{\text{ηχείου}}} \right] / \left[ \frac{P_{\text{κέντρο κεφαλιού}}}{E_{\text{ηχείου}}} \right] \quad (1,1)$$

προκύπτει η HRTF για τη συγκεκριμένη θέση της ηχητικής πηγής. Είναι προφανές ότι οι μετρήσεις αυτές επηρεάζονται από τα ανατομικά χαρακτηριστικά του ακροατή.

Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζονται, αριστερά η απεικόνιση των HRIRs στο horizontal plane για το δεξί αυτί, και δεξιά οι HRTFs στο median plane για το αριστερό αυτί ενός ακουστικού ανδρείκελου. Στην HRIR, φαίνεται η αναμενόμενη σταδιακή εξασθένηση του κύματος καθώς η πηγή απομακρύνεται από το δεξί αυτί και η συμμετρία της απόκρισης στις 0 και 180 μοίρες. Οι απότομες μεταβολές στο σημείο A οφείλονται στις ανακλάσεις στο πτερύγιο, ενώ στο Σημείο B οφείλονται στις ανακλάσεις του ώμου. Στις HRTFs (Σχήμα 1-1 δεξιά) είναι φανερό πως τα μέγιστα της απόκρισης στα 4kHz (περιοχή B) οφείλονται στον συντονισμό στο κανάλι, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από την κλίση της πηγής. Αντίθετα, οι αποσβέσεις (Βέλος A), επηρεάζονται από την κλίση της πηγής και οφείλονται στις καταστρεπτικές ανακλάσεις στο πτερύγιο του αυτιού. Τα βυθίσματα αυτά θεωρούνται ισχυρές υποδείξεις εντοπισμού της κλίσης της πηγής και είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη μορφολογία του πτερυγίου. Στη περιοχή Γ (πηγή πάνω από το κεφάλι) η απόκριση είναι σχεδόν επίπεδη.



Σχήμα 1.1

Οι HRTFs χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση σημάτων, αντίστοιχων με αυτών που θα προκαλούσε μια ηχητική πηγή σε μια συγκεκριμένη θέση στο χώρο. Το στερεοφωνικό σήμα που προκύπτει από τη σύνθεση ενός μονοφωνικού σήματος και την HRTF του αριστερού και του δεξιού αυτιού ονομάζεται *binaural* σήμα. Η αναπαραγωγή των *binaural* σημάτων μέσω ακουστικών -ιδανικά- δημιουργεί την ψευδαίσθηση της χωρικής θέσης του ακουστού σήματος. Η εφαρμογή προϋποθέτει γραμμικότητα του συστήματος η οποία και ισχύει [1].

Η ακρόαση *binaural* σημάτων που είναι αποτέλεσμα σύνθεσης με εξατομικευμένες HRTF, δημιουργούν μια ακριβέστερη, όσον αναφορά το *localization*, ηχητική ψευδαίσθηση. Ωστόσο, η απόκτηση εξατομικευμένων HRTFs είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται HRTFs οι οποίες έχουν μετρηθεί από μια ποικιλία ανθρώπων ή ομοιωμάτων του κεφαλιού (μη εξατομικευμένες).

Το ηχητικό τοπίο που προκύπτει με τη χρήση μη εξατομικευμένων συναρτήσεων δεν είναι τέλειο. Τις περισσότερες φορές είναι έντονο το φαινόμενο του *Front/Back confusion*, ενώ οι ήχοι αντιλαμβάνονται «μέσα στο κεφάλι». Ακόμα, η ακρίβεια στον εντοπισμό της θέσης της ηχητικής πηγής είναι περιορισμένη. Παρόλα αυτά ο ακροατής μπορεί να αναγνωρίσει μερικές υποδείξεις εντοπισμού [2]. Η ακρίβεια και η ένταση των προβλημάτων αυτών δεν είναι σταθερή και αλλάζει με τη χρήση διαφορετικών φίλτρων HRTF σε ένα ακροατή. Η επιλογή της βέλτιστης μη εξατομικευμένης HRTF βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος.

## 2. Υποκειμενικό ακουστικό πείραμα

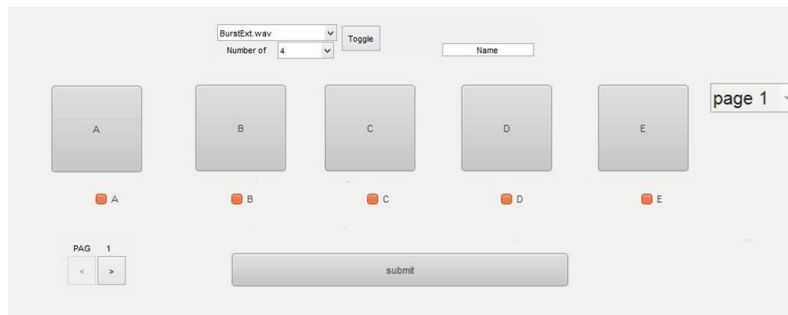
### 2.1 Υποκείμενα

Στο υποκειμενικό ακουστικό πείραμα συμμετείχαν εθελοντικά 20 άτομα, 13 άνδρες και 7 γυναίκες με κανονική ακοή. Η ηλικία των εθελοντών ήταν στο διάστημα 21 με 40 ετών με μέση τιμή τα 23 χρόνια. Το 20% των συμμετεχόντων είχε συμμετάσχει σε

προηγούμενο μας υποκειμενικό ακουστικό πείραμα. Το υπόλοιπο ποσοστό δεν είχε συμμετάσχει ξανά σε ψυχοακουστικό πείραμα. Πριν τις ακροάσεις, σε κάθε υποκείμενο πραγματοποιούνταν μια σύντομη επεξήγηση του πειράματος και των χαρακτηριστικών τα οποία καλούνταν να αναγνωρίσει.

## 2.2 Όργανα μέτρησης

Το γραφικό περιβάλλον του πειράματος αναπτύχθηκε στη *MATLAB* και η οδήγηση πραγματοποιήθηκε με την εξωτερική κάρτα ήχου AISIO M-audio Fast Pro ULTRA. Για την αναπαραγωγή χρησιμοποιήθηκαν τα πάνω ηχεία τετραφωνικών ακουστικών, ειδική παραγγελία, της εταιρίας Sennheiser [9]. Η ταυτόχρονη αναπαραγωγή των δύο καναλιών επιβεβαιώθηκε με αναλογικό παλμογράφο, ενώ η στάθμη αναπαραγωγής των ακουστικών μετρήθηκε σε dbA, για σήμα ελέγχου λευκού θορύβου με χρήση του Norsonic 110 Sound Level Analyser.



Σχήμα 2.1. Γραφική διεπαφή GUI

## 2.3 Σήμα διέγερσης

Το ηχητικό ερέθισμα που χρησιμοποιήθηκε εδώ αποτελούνταν από λευκό θόρυβο διάρκειας 500ms, διαμορφωμένο σε ένα ημίτονο με συχνότητα 15Hz (White Noise Burst) [3]. Η στάθμη αναπαραγωγής ορίστηκε στα 70dbA  $\pm$ 0.5.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τις βάσεις των CIPIC database [4] και IRCAM HRIR database [5]. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δέκα σύνολα φίλτρων –πέντε από την κάθε βάση-, λόγω του ότι τα φίλτρα αυτά εμφανίζουν πλούσιο φασματικό περιεχόμενο στα αζιμούθια 0° και 180°. Στον πίνακα 2.1 εμφανίζεται ο αύξων αριθμός των HRTF όπως σημειώνονται στη παρούσα εργασία και η αντίστοιχη ονοματολογία στην εκάστοτε βάση.



Πίνακας 2.1

HRTF ID	HRTF DB	Subject No
1	CIPIC	3
2	CIPIC	8
3	CIPIC	11
4	CIPIC	12
5	CIPIC	58
6	IRCAM	14
7	IRCAM	22
8	IRCAM	28
9	IRCAM	32
10	IRCAM	59

#### 2.4 Διαδικασία

Η μορφή του πειράματος προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την αρχική σχεδίαση όπως παρουσιάζεται στα [6] [7] [8]. Μέσω μίας διαδικασίας δύο φάσεων, παρουσιάζονται αλληλουχίες binaural σημάτων για δέκα προ-επιλεγμένες HRTF. Στη πρώτη φάση ο ακροατής καλείται να επιλέξει τις HRTF που εμφανίζουν διακριτή διαφορά ως προς το κατακόρυφο επίπεδο με μηδενική κλίση (κριτήριο Front/Back confusion), ενώ στη δεύτερη φάση, καλείται να επιλέξει αυτές που εμφανίζουν διακριτή διαφορά κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο (κριτήριο κλίσης).

Αντίθετα με την αρχική σχεδίαση των αναφορών [6] [7] [8], στη παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του externalization (η πηγή να μην αντιλαμβάνεται μέσα στο κεφάλι) αφού θεωρούμε ότι το κριτήριο αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί στα υπόλοιπα δύο. Επιπλέον, παρουσιάζονται όλες οι HRTF και στα δύο κριτήρια αξιολόγησης, ανεξάρτητα αν στη πρώτη φάση μια HRTF δεν επιλέχθηκε. Η επιλογή αυτή, βασίστηκε στην υπόθεση, βάση παρατήρησης, ότι η επιλογή μίας συνάρτησης μεταφοράς για binaural αναπαραγωγή μπορεί να δημιουργήσει επιτυχημένα την ψευδαίσθηση της θέσης της εικονικής πηγής ως προς κάποιο επίπεδο (έστω horizontal plane) ανεξάρτητα αν αποτυγχάνει να δημιουργήσει αντίστοιχη αίσθηση σε κάποιο άλλο επίπεδο (έστω frontal plane). Η επιβεβαίωση του ισχυρισμού αυτού είναι και στόχος της παρούσας εργασίας.

Για την επιλογή κατάλληλου φίλτρου σε κάθε μία από τις δύο φάσεις, παρουσιάζονται οι δέκα HRTF, τρεις φορές η καθεμία σε ομάδες των πέντε, στις επιλογές A,B,C,D και E της διεπαφής (Σχήμα 2-1). Σε κάθε πεντάδα, κάθε HRTF εμφανίζεται μία φορά και η σειρά εμφάνισης περιγράφεται από το τμήμα ενός Latin square 10×10. Για κάθε HRTF παρουσιάζονταν τέσσερα ζευγάρια binaural σημάτων. Σε

κάθε πεντάδα η αλληλουχία των σημάτων ήταν ίδια, αλλά μεταξύ διαφορετικών πεντάδων η αλληλουχία ήταν διαφορετική και μοναδική.

Στη πρώτη φάση, τέσσερα ζευγάρια binaural σημάτων παρουσιάζονταν, για φαινομενικές πηγές πάνω στο cone of confusion στα πιθανά αζιμούθια  $[30^\circ, 150^\circ]$ ,  $[60^\circ, 120^\circ]$ ,  $[210^\circ, 330^\circ]$ ,  $[240^\circ, 300^\circ]$ . Ο ακροατής καλούνταν να διακρίνει αν μεταξύ των ζευγαριών η ηχητική πηγή βρισκόταν μπροστά ή πίσω από αυτόν. Η σειρά παρουσίασης των ερεθισμάτων ως προς το μπροστά ή πίσω επίπεδο δεν ήταν σταθερή.

Στη δεύτερη φάση, παρουσιάζονταν τέσσερα ζευγάρια binaural σημάτων στα πιθανά αζιμούθια  $[30^\circ, 60^\circ, 150^\circ, 240^\circ, 330^\circ]$  με κλίση  $\pm 30^\circ$ . Ο ακροατής καλούνταν να διακρίνει αν μεταξύ των ζευγαριών υπήρχε διαφορά κλίσης της ηχητικής πηγής ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ανεξάρτητα από το αζιμούθιο. Η σειρά παρουσίασης της κλίσης δεν ήταν σταθερή.

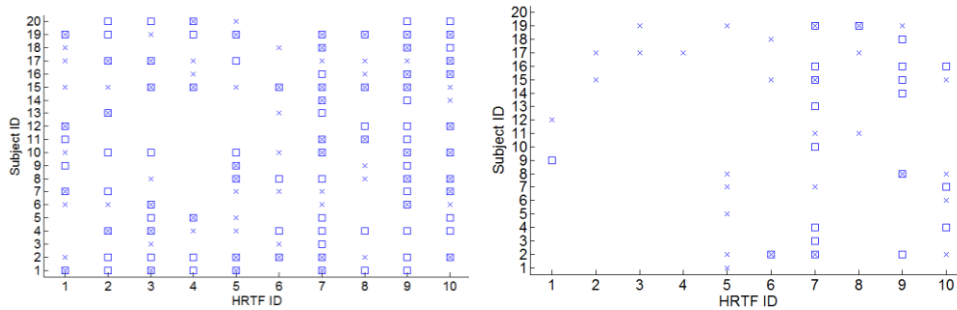
Και στα δύο κριτήρια, μια HRTF επιλέγονταν αν ο ακροατής μπορούσε να αναγνωρίσει το αντίστοιχο κριτήριο τουλάχιστον σε τρία από τα τέσσερα ζεύγη binaural σημάτων. Η επιθυμητή HRTF επιλέγονταν με το αντίστοιχο checkbox. Επιλέγοντας “confirm”, οι επιλογές αποθηκεύονταν και παρουσιάζονταν η επόμενη πεντάδα των HRTF. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν ως ότου παρουσιαστούν και οι έξι προκαθορισμένες πεντάδες των HRTF. Λόγω του τρόπου παρουσίασης, μια HRTF μπορούσε να επιλεγθεί από μηδέν έως τρεις φορές.

### 3. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του πειράματος εντοπισμού αυτού, επεξεργάστηκαν στη Matlab. Εξετάστηκαν για το κάθε ακροατή ξεχωριστά, αλλά και στο σύνολο, ώστε να οδηγήσουν σε γενικά συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν σε δύο κατηγορίες:

- HRTF που επιλέχθηκαν τουλάχιστον δύο στις τρεις φορές (χαλαρό κριτήριο)
- HRTF που επιλέχθηκαν τρεις στις τρεις φορές (αυστηρό κριτήριο).

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η κατανομή των επιλεγμένων συναρτήσεων μεταφοράς για το σύνολο των υποκειμένων για τα δύο κριτήρια. Η αριστερή εικόνα αφορά το χαλαρό κριτήριο αξιολόγησης και η δεξιά εικόνα το αυστηρό. Ο συμβολισμός «□» δηλώνει τις HRTF που επιλέχθηκαν για το Front/Back confusion και ο συμβολισμός «×» αυτές που επιλέχθηκαν για το Up/Down discrimination.

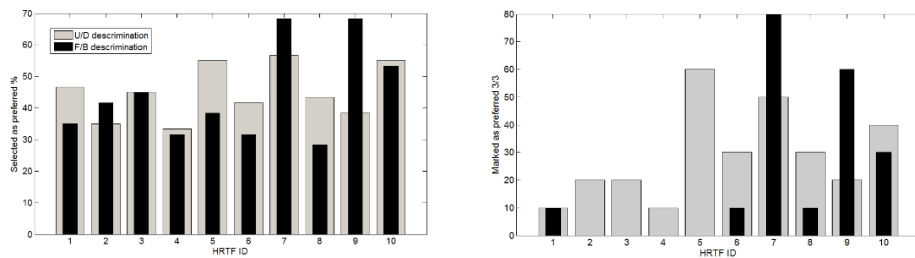


Σχήμα 3.1. Κατανομή των επιλεγμένων HRTF ανά υποκείμενο. □ Front/Back διάκριση, × Up/Down διάκριση. Αριστερά: χαλαρό κριτήριο, Δεξιά: αυστηρό κριτήριο.

Στο Σχήμα 3-1 αριστερά δεν παρατηρείται, τουλάχιστον εκ πρώτης όψεως, μια συστηματική προτίμηση των υποκειμένων για κάποιο σύνολο HRTF. Ίσως μόνο, οι HRTF με ID 7,9,10 να έχουν επιλεγθεί περισσότερες φορές. Αντίθετα στο Σχήμα 3.1 δεξιά, γίνεται αμέσως αντιληπτός ένας διαχωρισμός των προτεινόμενων HRTF. Όπως φαίνεται, οι HRTF ID 2,3,4,5 δεν ικανοποιούν το αυστηρό κριτήριο για τη διάκριση Front/ Back, ενώ στις συναρτήσεις με ID 7,9 εμφανίζεται έντονη προτίμηση. Ακόμα αίσθηση προκαλεί το γεγονός, πως τα φίλτρα 2 έως 5 δεν επιλέχθηκαν από κανένα υποκείμενο για το κριτήριο του Front/Back, ενώ υπάρχουν και υποκείμενα που δεν επέλεξαν καμία συνάρτηση μεταφοράς όσον αφορά τη διάκριση κλίσης.

Για την σφαιρική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παραθέτονται δύο ραβδόγραμμα (

Σχήμα 3.2) που παρουσιάζουν το ποσοστό επιλογής της κάθε HRTF στο σύνολο των ακροατών. Αριστερά τα ραβδόγραμμα για το χαλαρό κριτήριο και δεξιά για το αυστηρό.



Σχήμα 3.2. Ραβδόγραμμα ποσοστού επιλογής HRTF ανά υποκείμενο. Με μαύρο χρώμα Front/Back διάκριση ενώ με γκρι διάκριση κλίσης. Αριστερά: χαλαρό κριτήριο, Δεξιά: αυστηρό κριτήριο

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι για το μη αυστηρό κριτήριο επιλογής, σχεδόν το 70% των ακροατών προτίμησε τα φίλτρα 7 και 9 για Front/Back κριτήριο, ενώ το φίλτρο 10 επιλέχθηκε από το 55%. Τα υπόλοιπα φίλτρα επιλέχθηκαν με μέση τιμή από το 37% των ακροατών. Όπως φαίνεται, ακόμα και στο χαλαρό κριτήριο, υπάρχει μια ξεκάθαρη προτίμηση των ακροατών για δύο από τις δέκα HRTF για οριζόντιο επίπεδο. Αντίθετα, μία ανάλογη προτίμηση για το κριτήριο κλίσης δεν γίνεται εύκολα φανερή. Συγκεκριμένα τα φίλτρα 5,7 και 10 επιλέχθηκαν από το 55% των ακροατών, ενώ τα υπόλοιπα επιλέχθηκαν από το  $40\% \pm 5\%$ .

Αν και στο αυστηρό κριτήριο *Σχήμα 3-2 δεξιά* η έντονη προτίμηση των φίλτρων 7 και 9 από την πλειοψηφία των ακροατών για το οριζόντιο παραμένει, η κατανομή των προτιμήσεων των HRTF για την κλίση της πηγής, αλλάζει σημαντικά. Συγκεκριμένα, μπορεί να σημειωθεί μία φανερή προτίμηση των φίλτρων 5 και 7, για το αυστηρό κριτήριο. Βέβαια αυτή η έντονη μεταβολή στις προτιμήσεις των ακροατών οφείλεται στην αδυναμία αυτών να τηρήσουν το αυστηρό κριτήριο. Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 3.1 δεξιά* το 40% των ακροατών δεν μπόρεσε να επιλέξει κάποια HRTF και τις τρεις φορές παρουσίας.

#### 4. Συμπεράσματα

Φαίνεται λοιπόν, πως η επιλογή μίας HRTF για τη διάκριση κλίσης είναι σημαντικά πιο δύσκολη από την επιλογή μια HRTF όσον αφορά το Front/Back confusion. Επιπλέον γίνεται φανερό πως η επιλογή μιας HRTF βάση της ικανότητας διάκρισης του Front/Back δεν σημαίνει απαραίτητα ικανότητα διάκρισης της κλίσης της πηγής και αντίστροφα. Για παράδειγμα για τον ίδιο ακροατή μια HRTF μπορεί να προτιμήθηκε 3 φορές για το κριτήριο του Front/Back Confusion και καμία φορά για το κριτήριο του Up/Down discrimination και το αντίστροφο. Τέλος, είναι εμφανής μια αδυναμία αναγνώρισης της Front/Back διάκρισης στις HRTF της βάσης του CIPIC για το αυστηρό κριτήριο, αλλά όχι για τη διάκριση κλίσης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης μας, αναδεικνύουν την μοναδικότητα των HRTF και τη δυσκολία επιλογής μίας, μη εξατομικευμένης HRTF, που να επιτυγχάνει τη βέλτιστη σύνθεση binaural σημάτων για το οριζόντιο και το κάθετο επίπεδο. Η εξαγωγή και ο συνδυασμός χαρακτηριστικών όπως interaural time differences, interaural level differences[10] και pinna notches[11] από τις προτιμώμενες HRTF που προκύπτουν από τα διάφορα κριτήρια, πιθανότατα να είναι μια αποδεκτή λύση στη σύνθεση binaural σημάτων με τη χρήση μη εξατομικευμένων head related transfer functions. Η συζήτηση για το συγκεκριμένο βήμα είναι ανοιχτή.

#### 5. Αναφορές

- [1] V. R. Algazi and R. O. Duda, «Headphone-Based Spatial Sound» *Signal Processing Magazine, IEEE*, pp. 28(1):33-42 (2011)

- [2] E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F. L. Wightman, «Localization using nonindividualized head-related transfer functions» *J Acoust Soc Am*, pp. 94(1):111-123 (1993)
- [3] Middlebrooks JC. «Narrow-band sound localization related to external ear» *J Acoust Soc Am*, pp. 92:2607-2624, (1992)
- [4] Center of image Processing and Integrated computing Database [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://interface.cipic.ucdavis.edu/sound/hrtf.html>.
- [5] Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique DATABASE [Ηλεκτρονικό], Available: <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/index.html>
- [6] Agnieszka Roginska, Gregory H. Wakefield and Thomas S. Santoro, «User selected HRTFs: Reduced complexity and improved perception» σε *Undersea Human Systems Integration Symposium* (2010)
- [7] Yunhao Wan, Alireza Zare and Kyla McMullen, «Evaluating the Consistency of Subjectively Selected Head-Related Transfer Functions (HRTFs) Over Time,» σε *AES 55TH International Conference*, Helsinki, Finland, 2014
- [8] Boren Braxton, Roginska Agnieszka «The Effects of Headphones on Listener HRTF Preference,» σε *131st Convention AES*, New York (2011)
- [9] Μπούρας Ν, Παπανικολάου Γ, « Ψυχοακουστική διερεύνηση της χωρικής ακουστικής ιδιότητας», διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ., pp: 60-62, Θεσσαλονίκη (2014)
- [10] S. A. Gelfand, «Hearing», informa Healthcare 5<sup>th</sup> edition, (2009)
- [11] E. Wenzel, M. Arruda, D. Kistler and F. Wightman «Localization using nonindividualized head-related transfer functions» *J Acoust Soc Am*, pp (91):111-123, (1993)

## ***Η ακουστική ορθόδοξων ναών της νεωτέρας Ελλάδος· σύγχρονες προσεγγίσεις***

A. Σωτηροπούλου<sup>1,2,a</sup>, I. Καραγιάννης<sup>1,b</sup>, A. Στάμος<sup>2,d</sup> & Θ. Σερβετάς<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [mediumswing@hotmail.com](mailto:mediumswing@hotmail.com), <sup>c</sup> [cyberthanasis@gmail.com](mailto:cyberthanasis@gmail.com),  
<sup>d</sup> [servetasthomas@gmail.com](mailto:servetasthomas@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Οι πρώτες προσπάθειες αποτίμησης της προβληματικής ακουστικής ελληνορθόδοξων ναών της νεωτέρας περιόδου, είναι σχετικά πρόσφατες και βασίζονται είτε σε φυσικές ακουστικές μετρήσεις είτε σε πειράματα της αντίληψης της ακουστικής εντός των ναών. Στην παρούσα μελέτη γίνεται ανασκόπηση αυτών των μελετών. Αυτές καταλήγουν ότι, οι τιμές των ακουστικών παραμέτρων που μετρήθηκαν ευρέθησαν εκτός επιθυμητών ορίων· επίσης επιχειρήθηκε στις εργασίες εκείνες, ερμηνεία αυτού του ευρήματος μέσω αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών των ναών. Τέλος, επιβεβαιώνεται στις μελέτες εκείνες πειραματικά, ότι η παρουσία μεγαφώνων στους σύγχρονους ελληνορθόδοξους ναούς επικαλύπτει την φυσική ποιότητα του βυζαντινού ακροάματος.*

### ***The acoustics of orthodox churches in modern Greece· a literature review***

#### **ABSTRACT**

*The earliest attempts to investigate the acoustics of orthodox churches in modern Greece are fairly recent and refer either to physical measurements or to subjective evaluation experiments of the acoustics during live liturgy. The present study is a review of the above research work. Relevant acoustic measurements from various studies of this kind demonstrate that the values of critical acoustic parameters are well beyond optimal values· interpretation of this is attempted in terms of architectural characteristics of the churches. Furthermore, it was experimentally confirmed that the use of loudspeakers in orthodox churches of modern Greece mars the quality of the authentic byzantine chant.*

#### **Εισαγωγή**

Μιλώντας για τη σύγχρονη εκκλησιαστική αρχιτεκτονική στην Ελλάδα της νεωτέρας περιόδου, διαπιστώνουμε πως η χρήση νέων υλικών, όπως το μπετόν, έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αύξηση του όγκου των ναών με σκοπό την εξυπηρέτηση ευρύτερου εκκλησιάσματος, αλλά δημιούργησαν πρόβλημα στην

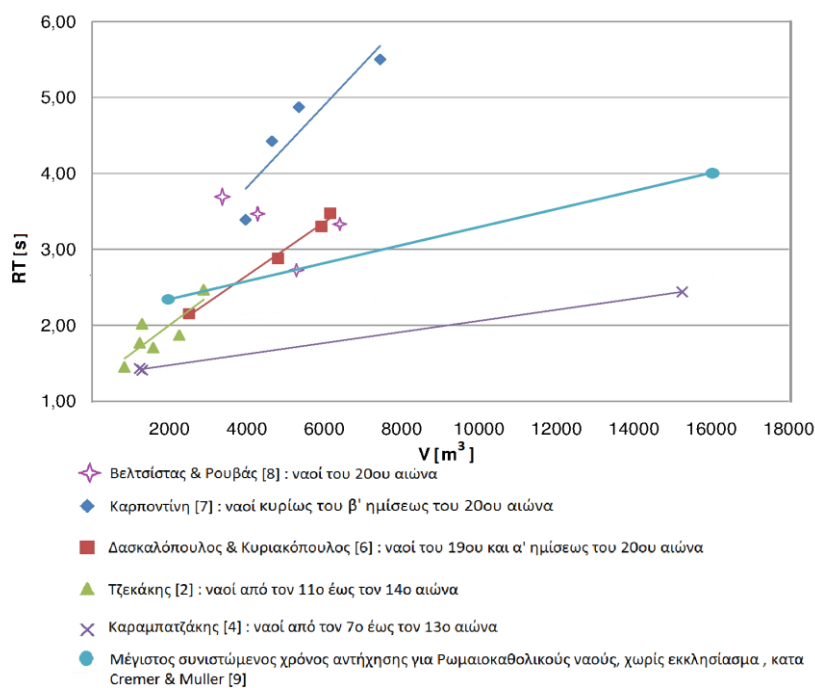
ακουστική των χώρων. Οι Ελληνορθόδοξοι ναοί της νεωτέρας Ελλάδος είναι αναπαραγωγή αυθεντικών βυζαντινών ναών, όπως ρυθμού βασιλικής με τρούλο, τρίκλιτης βασιλικής, οκταγωνικού και σταυροειδούς εγγεγραμμένου σε τρούλο, κλπ. Όμως το βασικό χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί από τα πρωτότυπα των, είναι ότι οι νεώτεροι ναοί εμφανίζονται σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αλλοίωση της καλής ακουστικής και η κατά κανόνα χρήση ηλεκτρονικής ενίσχυσης που, συχνά, αντί να διορθώνει επιτείνει το πρόβλημα.

Οι πρώτες προσπάθειες αποτίμησης του προβλήματος σχετικά με την ακουστική ελληνορθόδοξων ναών της νεωτέρας Ελλάδας ανάγονται μόλις στην τελευταία πενταετία και προέρχονται κυρίως από ερευνητική ομάδα του Ε.Μ.Π. Η εν λόγω ομάδα διεξήγε τόσο φυσικές ακουστικές μετρήσεις σε ναούς όσο και πειράματα καταγραφής της αντίληψης της ακουστικής στους ίδιους ναούς. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανασκόπηση (review) των μελετών αυτών, με σκοπό την συστηματική καταγραφή του προβλήματος και της ερμηνείας αυτού σε σχέση με τον σχεδιασμό των ναών. Επίσης επιχειρείται σύγκριση με αντίστοιχες προγενέστερες μελέτες σε αυθεντικές βυζαντινές εκκλησίες.

## **1. Ανασκόπηση ερευνητικών εργασιών στην ακουστική ελληνορθόδοξων ναών της νεωτέρας περιόδου**

Η ακουστική χώρων λατρείας στο δυτικό κόσμο έχει αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικής μελέτης τις πρόσφατες δεκαετίες [1]. Ταυτόχρονα, ολιγάριθμοι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη της ακουστικής αυθεντικών βυζαντινών ναών [2,3,4,5]. Τέλος, μόλις στην τελευταία πενταετία, η ακουστική ελληνορθόδοξων ναών της νεωτέρας περιόδου, έχει αποτελέσει αντικείμενο επιστημονικής έρευνας. Η εργασία της ομάδας του ΕΜΠ συγκαταλέγεται μεταξύ των ολιγάριθμων προσπαθειών σε αυτή την κατεύθυνση [6,7,8,10].

Δύο κατηγορίες ναών της νεώτερης Αθήνας μελετώνται από την ομάδα του ΕΜΠ, ήτοι, ναοί του 19<sup>ου</sup> και α΄ ημίσεως του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όπως είναι η Χρυσοσπηλαιώτισσα, ο Αγ. Γεώργιος Καρύτση, ο Αγ. Βασίλειος στην οδό Μπουμπουλίνιας στο κέντρο της πόλης κλπ. Οι ναοί της δεύτερης ομάδας ανήκουν στο β΄ ήμισυ του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όπως είναι η Αγ. Σοφία Ν. Ψυχικού κλπ. και έχουν κατά κανόνα ενιαίους (συνεχείς) και σχετικά μεγάλους όγκους. Οι δώδεκα εκκλησίες που επελέγησαν από τις δύο ομάδες, είναι αντίγραφα ναών τύπου είτε σταυροειδούς μετά τρούλου είτε βασιλικής μετά τρούλου, και φαίνονται στον Πίνακα 1. Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν χωρίς εκκλησίασμα, σε αντιπροσωπευτικές θέσεις για τον κάθε ναό. Αποτιμήθηκαν ευρείας χρήσης ακουστικές παράμετροι σε όλο το φάσμα, ήτοι ο χρόνος αντήχησης, ο χρόνος απόσβεσης των πρώτων ανακλάσεων (Early Decay Time), το κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων (50ms Early Energy Fraction), ο λόγος των πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις (80ms Early-to-Late Sound) και ο θόρυβος βάθους. Αποτελέσματα των μετρήσεων στις μεσαίες οκτ. ζώνες (500 και 1000 Hz) παρατίθενται στους Πίνακες 2 και 3. Επίσης στο Σχήμα 1, απεικονίζονται οι Χρόνοι αντήχησης των δώδεκα ναών της Αθήνας, μαζί με αντίστοιχες μετρήσεις σε αυθεντικούς βυζαντινούς ναούς μετά τρούλου στη Θεσσαλονίκη της εποχής από τον 7<sup>ο</sup> έως 14<sup>ο</sup> αιώνα, από τις μελέτες των Τζεκάκη [2,3] και Καραμπαντζάκη [4,5].



Σχήμα 1. Μετρήσεις χρόνου αντήχησης στις μεσαιές συχνότητες

Εκκλησία	Χρόνος κατασκευής (αιώνας)	Όγκος [m <sup>3</sup> ]
1. Άγ. Γεώργιος Καρύτση	19ος	2500
2. Άγ. Βασίλειος Μπουμπουλίνας	α' ήμισυ 20ου	4800
3. Χρυσοσπηλαιώτισα	19ος	5930
4. Άγ. Θεράπων Ζωγράφου	α' ήμισυ 20ου	6150
5. Άγ. Τριάδα Αμπελοκήπων	α' ήμισυ 20ου	3965
6. Άγ. Τριάδα Χολαργού	β' ήμισυ 20ου	4645
7. Άγ. Σοφία Νέου Ψυχικού	β' ήμισυ 20ου	5345
8. Άγ. Ειρήνη Γαλατσίου	β' ήμισυ 20ου	7445
9. Εισόδια της Θεοτόκου	-	3150
10. Άγ. Ελευθέριος Γκύζη	α' ήμισυ 20ου	6458
11. Άγ. Άννα Χαλανδρίου	-	4558
12. Άγ. Δημήτριος Αμπελοκήπων	β' ήμισυ 20ου	5510

Πίνακας 1. Βασικά στοιχεία των ναών



Σύγκριση μεταξύ των ναών των διαφόρων περιόδων αναδεικνύει τα εξής. Ως ήτο αναμενόμενο οι χρόνοι αντήχησης των ναών αυξάνουν γραμμικά με τον όγκο των, αλλά με διαφορετική γραμμική τάση. Έτσι παρόλο που η ομάδα ναών του 19<sup>ου</sup> και του α΄ ημίσεως του 20<sup>ου</sup> αιώνα έχει όγκους συγκρίσιμους με τους ναούς του β΄ ημίσεως του 20<sup>ου</sup> αιώνα, εν τούτοις οι χρόνοι αντήχησης της πρώτης (αρχαιότερης) ομάδας ναών είναι σχετικά χαμηλότεροι, και οριακά κοντά στις επιθυμητές τιμές. Αυτό, όπως γράφει η Καρποντίνη [7], μπορεί να αποδοθεί στην διαφορετική διάταξη του όγκου των δύο ομάδων ναών· η συγγραφέας εξηγεί δανειζόμενη τα λόγια του Τζεκάκη [2] από προγενέστερη εργασία του «...η υποδιαίρεση του όγκου σε μια σειρά μικρότερων συνδυασμένων όγκων (στις πιο κλασικές εκκλησίες) καταλήγει σε σχετικά χαμηλούς χρόνους αντήχησης χωρίς τη βοήθεια ηχοαπορροφητικών υλικών...».

Εκκλησία	Όγκος [m <sup>3</sup> ]	RT [s]		EDT [s]		Βέλτ. τιμές *
		Κύριος ναός	Γυναικωνίτης	Κύριος ναός	Γυναικωνίτης	
1. Αγ. Γεώρ. Καρ.	2500	2,15	-	2,20	2,20	2,50
2. Αγ. Βασίλειος Μπ.	4800	2,90	-	3,50	3,00	2,75
3. Χρυσοσπηλαιωτ.	5930	3,30	3,30	3,35	3,50	2,70
4. Αγ. Θεράπ. Ζωγρ.	6150	3,50	3,50	2,90	3,45	2,90
5. Αγ. Τριάδ. Αμπελ.	3965	3,40	3,45	3,75	3,75	2,60
6. Αγ. Τριάδ. Χολαρ.	4645	4,40	4,45	4,50	4,45	2,70
7. Αγ. Σοφία Ν. Ψυχ.	5345	4,85	4,60	4,95	4,90	2,75
8. Αγ.Ειρ. Γαλατσ.	7445	5,50	5,55	5,25	5,55	3,00
9. Εισ. της Θεοτόκ.	3150	3,75	3,80	3,30	3,70	2,50
10. Αγ. Ελευθέρ. Γκ.	6458	3,40	3,45	2,60	3,42	2,95
11. Αγ. Άννα Χαλαν.	4558	3,50	3,45	2,90	3,54	2,70
12. Αγ. Δημήτ. Αμπ.	5510	2,75	2,70	2,40	2,75	2,80

Πίνακας 2. Μετρήσεις ακουστικών μεγεθών χωρίς εκκλησίασμα, στις μεσαίες συχνότητες. (\*: βέλτιστες τιμές κατά Cremer [9])

Όσον αφορά στις υπόλοιπες φυσικές παραμέτρους ήτοι στο κλάσμα των πρώτων ανακλάσεων και στο λόγο των πρώτων προς τις καθυστερημένες ανακλάσεις, οι τιμές ιδιαίτερα για τις εκκλησίες του β΄ ημίσεως του 20ού αιώνα είναι εκτός επιθυμητών ορίων· ήτοι επικρατούν σχετικά λίγες πρώτες ανακλάσεις και/ή σχετικά αυξημένες καθυστερημένες ανακλάσεις. Αυτό, ερμηνεύει η Καρποντίνη [7], αποδίδεται στην έλλειψη ανακλαστικών επιφανειών εγγύς προς το εκκλησίασμα. Το φαινόμενο αυτό, είναι ακόμη πιο έντονο, όπως δείχνουν οι μετρήσεις του πίνακα 2 και 3, στον γυναικωνίτη των νεοτέρων ναών, λόγω της σχετικής απομόνωσης του όγκου των.

Τέλος, οι μετρήσεις θορύβου βάθους των σύγχρονων ναών, ανέδειξαν και το πρόβλημα της περιβαλλοντικής ηχορρύπανσης εκεί (Πίνακας 4).

Εκκλησία	50ms EEF		
	Κύριος ναός	Γυναικωνίτης	Βέλτιστες τιμές *
1. Αγ. Γεώργιος Καρύτση	0,26	0,00	0,50
2. Αγ. Βασίλειος Μπουμπουλίνας	0,24	0,05	0,50
3. Χρυσοσπηλαιώτισσα	0,23	0,05	0,50
4. Αγ. Θεράπων Ζωγράφου	0,25	0,17	0,50
5. Αγ. Τριάδα Αμπελοκήπων	0,21	0,10	0,50
6. Αγ. Τριάδα Χολαργού	0,11	0,01	0,50
7. Αγ. Σοφία νέου Ψυχικού	0,16	0,08	0,50
8. Αγ.Ειρηνη Γαλατίσιου	0,19	0,08	0,50
9. Εισόδια της Θεοτόκου	0,22	0,07	0,50
10. Αγ. Ελευθέριος Γκύζη	0,30	0,12	0,50
11. Αγ. Άννα Χαλανδρίου	0,31	0,14	0,50
12. Αγ. Δημήτριος Αμπελοκήπων	0,26	0,16	0,50

Πίνακας 3. Μετρήσεις ακουστικών μεγεθών χωρίς εκκλησίασμα, στις μεσαίες συχνότητες. (\*: για αίθουσες ομιλίας, Barron [12])

Όσον αφορά στην διερεύνηση της αντίληψης της ακουστικής ελληνορθόδοξων ναών της νεότερης περιόδου μία μελέτη που αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία [10], προέρχεται από ομάδα του Ε.Μ.Π. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει πειραματική καταγραφή της αντίληψης της ακουστικής κατά τη διάρκεια ζωντανής λειτουργίας σε σύγχρονους ναούς στην οποία συμμετείχε το εκκλησίασμα. Τα πειράματα διεξήχθησαν αφενός, με την παρουσία μεγαφώνων, δηλαδή όπως διεξάγεται σήμερα η Θεία λειτουργία στις σύγχρονες εκκλησίες, και αφετέρου χωρίς μεγάφωνα. Τα αποτελέσματα από τις δύο κατηγορίες πειραμάτων ανέδειξαν τρεις ανεξάρτητους παράγοντες της ακουστικής αντίληψης: συγκεκριμένα, την ΔΥΝΑΜΗ (ισχυρός, γεμάτος, πλούσιος), την ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ (αρμονικός-παράφωνος, ευκρινής, καθαρός) και την ΤΟΝΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ (ήρεμος, ζεστός, αρμονικός-άτονος). Ο παράγων ΤΟΝΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ βρέθηκε να έχει πρωταρχική σημασία στα πειράματα χωρίς μεγάφωνα και με αυτόν τον παράγοντα βρέθηκε να σχετίζεται η συνολική ευχαρίστηση της ακρόασης της λειτουργίας. Αντίθετα στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν μεγάφωνα, κύριος παράγοντας της αντίληψης της ακρόασης αναδείχθηκε η ΔΥΝΑΜΗ του ήχου.

Εκκλησία	80ms E-to-L			Θόρυβος βάθους [dBA]	
	Κόριος ναός	Γυναικωνίτης	Βέλτ. τιμές* <sup>1</sup>	Μέτρηση	max επιτρ. * <sup>2</sup>
1. Αγ. Γεώρ. Καρ.	-3,63	-13,60	-2 ~ 2	37,00	30,00
2. Αγ. Βασίλειος Μπ.	-3,65	-10,70	-2 ~ 2	37,00	30,00
3. Χρυσοσπηλαιώτισσα	-4,35	-16,70	-2 ~ 2	36,00	30,00
4. Αγ. Θεράπων Ζωγρ.	-3,64	4,10	-2 ~ 2	38,00	30,00
5. Αγ. Τριάδα Αμπελ.	-4,31	-6,72	-2 ~ 2	55,00	30,00
6. Αγ. Τριάδα Χολαργ.	-7,26	-11,78	-2 ~ 2	43,00	30,00
7. Αγ. Σοφία Ν. Ψυχ.	-5,88	-7,81	-2 ~ 2	46,00	30,00
8. Αγ.Ειρ. Γαλατσ.	-5,12	- 8,78	-2 ~ 2	34,00	30,00
9. Εισόδ. της Θεοτόκ.	-4,10	-4,10	-2 ~ 2	39,00	30,00
10. Αγ. Ελευθέρ. Γκ.	-2,29	-2,29	-2 ~ 2	43,00	30,00
11. Αγ. Άννα Χαλαν.	-2,10	-2,10	-2 ~ 2	42,00	30,00
12. Αγ. Δημήτρ. Αμπ.	-2,93	-2,93	-2 ~ 2	43,00	30,00

Πίνακας 4. Μετρήσεις ακουστικών μεγεθών χωρίς εκκλησίασμα, στις μεσαιές συχνότητες. \*<sup>1</sup>: για κλασική μουσική, Barron [12]. \*<sup>2</sup>: SRL [11]

Παράγων ακουστικής αντίληψης	F-στατιστικό	Επίπεδο σημαντικότητας
I. ΔΥΝΑΜΗ	45,41	0,00
II. ΤΟΝΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ	2,82	0,10
III. ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ	0,92	0,34

Πίνακας 5. Αποτελέσματα της ανάλυσης διακύμανσης μεταξύ πειραμάτων «με μεγάφωνα» και «χωρίς μεγάφωνα» στον Άγιο Θεράποντα.

## 2. Συμπεράσματα

Οι ελληνορθόδοξοι ναοί της νεωτέρας Ελλάδος είναι δυνατόν να διακριθούν σε δύο ομάδες: ήτοι, στους παλαιότερους από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα και το α' ήμισυ του 20<sup>ου</sup> αιώνα, και στους μεταγενέστερους. Το παρόν 'review' έδειξε ότι η πρώτη ομάδα ναών είναι σχετικά πλεονεκτικότερη ως προς την ακουστική των και αυτό συνδέεται με την 'κατάτμηση' του όγκου των ναών αυτής της περιόδου σε διακριτά ημχώρια, σε αντίθεση με την πρώτη ομάδα της οποίας ο όγκος / χώρος

δεν διαθέτει υποδιαίρεσεις.

Ο διαπιστωθείς αυξημένος θόρυβος βάθους σε όλες τις νεώτερες εκκλησίες που εξετάστησαν στην Αθήνα, θεωρείται συνυφασμένος με το σύστημα κλιματισμού του ναού, αλλά και με τον περιβάλλοντα αστικό θόρυβο, δεδομένου ότι ο προθάλαμος (νάρθηξ) μεταξύ ναού και εξωτερικού χώρου που διέθεταν οι αυθεντικοί βυζαντινοί ναοί, τείνει να εκλείψει στις σύγχρονες εκκλησίες.

Τέλος, τα μεγάφωνα που χρησιμοποιούνται κατά τη θεία λειτουργία σχεδόν γενικευμένα σήμερα πλέον, βρέθηκε ότι επικαλύπτουν την φυσική (τονική) ποιότητα του βυζαντινού ακροάματος.

Περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη για να αναδείξει φυσικές ακουστικές παραμέτρους υποκειμενικώς σημαντικές, και συνακόλουθες αρχές και τεχνικές σχεδιασμού για τους σύγχρονους Ελληνορθόδοξους ναούς.

### 3. Αναφορές

- [1] Lubman D. and Wetherill E.A. (eds) 'Acoustics of worship spaces'. in *106<sup>th</sup> Meeting of Acoust. Soc. Am*, San Diego, CA, USA, 7-11 Nov. Am. Inst. Physics publ., N. York (1983).
- [2] Tzekakis E. 'Data of the Acoustics of Byzantine Churches of Thessaloniki'. *Acustica*, Vol. 43, pp. 275 (1979).
- [3] Tzekakis E. 'Reverberation time of Rotunda of Thessaloniki'. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 5, pp. 1207 (1975).
- [4] Καραμπατζάκης Π. «Ακουστικές μετρήσεις σε έντεκα βυζαντινούς ναούς της Θεσσαλονίκης», in *Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Συνέδριου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008*, Ξάνθη (2009).
- [5] Καραμπατζάκης Π. «Σύγκριση των ακουστικών παραμέτρων των Μνημείων Αχειροποιήτου και του Παναγίας Χαλκίων με την χρήση μετρήσεων και μαθηματικών μοντέλων», in *Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Συνέδριου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2010*, Αθήνα (2010).
- [6] Δασκαλόπουλος Π. & Κυριακόπουλος Π. «Η Ακουστική Ελληνορθόδοξης ναοδομίας» επί διπλώματι εργασία, επίβλ.: Αν. Καθ. Α. Σωτηροπούλου Σχ. Πολ. Μηχ/κών Ε.Μ.Π. (2010).
- [7] Καρποντίνη Μ. «Ακουστικός σχεδιασμός στην ελληνορθόδοξη ναοδομία» επί διπλώματι εργασία, επίβλ.: Αν. Καθ. Α. Σωτηροπούλου Σχ. Πολ. Μηχ/κών Ε.Μ.Π.(2011).
- [8] Ρουβάς Σ. & Βελτσίστας Ι. «Ακουστικές Μετρήσεις σε σύγχρονους ελληνορθόδοξους ναούς», επί διπλώματι εργασία, επίβλ.: Καθ. Γ. Πουλάκος Σχ. Μηχ/κών Ε.Μ.Π. (2011).
- [9] Cremer L. & Müller H. *Principles and Applications of Room Acoustics volume 1*, London and New York (1982).
- [10] Αχαμνός Π. «Η αντίληψη της ακουστικής σε ελληνορθόδοξους ναούς της νεωτέρας Ελλάδος», επί διπλώματι εργασία, επίβλ.: Αν. Καθ. Α. Σωτηροπούλου Σχ. Πολ. Μηχ/κών Ε.Μ.Π. (2013).
- [11] SRL *Practical building acoustics*. Sound research laboratories limited, London (1976).
- [12] Barron M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design* E & FN SPON, London (1993).

***Παρατηρήσεις πάνω στην εξέλιξη της ακουστικής των  
χριστιανικών λατρευτικών κτισμάτων της Θεσσαλονίκης.  
Από τους Παλαιοχριστιανικούς, έως τους ναούς του 14<sup>ο</sup>  
αιώνα***

Παναγιώτης Καραμπατζάκης

Αρχιτέκτων Μηχανικός, Θεσφών 14, 56 728, Θεσσαλονίκη  
Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας, Α.Π.Θ.

[info@nestos.net](mailto:info@nestos.net)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στην Εργασία αυτή παρουσιάζονται μία σειρά νέων αποτελεσμάτων τα οποία προκύπτουν από μετρήσεις ακουστικών παραμέτρων σε Ναούς της Θεσσαλονίκη και από επεξεργασία ακουστικών μοντέλων ναών σε λογισμικό 3<sup>ων</sup> διαστάσεων.*

*Οι παράμετροι και τα μεγέθη που παρουσιάζονται στην εργασία, αποτελούν βασικά εργαλεία ανάλυσης ακουστικής, τα οποία συνδυαζόμενα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των χώρων καθώς και με την χρονική περίοδο οικοδόμησης των χώρων, δίνουν χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με την εξέλιξη της ακουστικής, ως «εφαρμοσμένη τεχνική» καθώς επίσης ξεκαθαρίζουν και κάνουν διακριτή μία συνεχή βελτιωτική εξέλιξη. Μεταξύ των παραμέτρων που παρουσιάζονται είναι: ο χρόνος αντήχησης ανά όγκο T30/V και ο συντελεστής πολυπλοκότητας V/Stot.*

***Notes on the acoustic evolution of Christian worship  
buildings of Thessaloniki.  
From Paleochristian period up to 14<sup>th</sup> century, churches***

## **ABSTRACT**

This paper presents a series of measurement results of the acoustic properties inside churches in Thessaloniki as well computer model predictions of the same spaces.

The parameters with the data presented in this paper are basic tools of acoustic analysis which, together with the geometric characteristics of the various spaces in their respective time frame, give useful results regarding the evolution of the acoustics of the spaces under investigation. It is inferred that the acoustic of the spaces was improved through an “applied technique” which leaves behind discrete

signs. Some of the parameters examined are : reverberation time per volume T30/V and complexity coefficient V/Stot.

## Εισαγωγή

Ένα εξαιρετικό παράδειγμα, πόλεως, που αναμορφώθηκε κατά την Παλαιοχριστιανική και την Βυζαντινή περίοδο, είναι η Θεσσαλονίκη.

Στην μεγαλόπρεπη πολυπλοκότητα της πόλης, που πολύ διακριτά, οφείλεται στις αρχιτεκτονικές – πολεοδομικές επεμβάσεις της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας (παλάτι Γαλέριου, Αψίδα, Μουσολείο, Εγνατία οδός, Χρυσή πύλη) αναπτύχθηκε πλήθος οικοδομημάτων και λατρευτικών χώρων, πολλές φορές αλλάζοντας χρήση, σε υφιστάμενα κτίρια (Μουσολείο Γελέριου – Ροτόντα) και άλλες φορές ανεγείροντας νέα (Αχειροποίητος, άγνωστη βασιλική στα ερείπια της Αγ. Σοφίας, Αγ. Δημήτριος κλπ).

Η περίοδος αυτή, είναι που απαιτεί, μεγάλους χώρους, εξαιτίας της αθρόας συμμετοχής πιστών, ακριβώς μετά την περίοδο χρήσης των «Ευκτήριων Οίκων» αρκετά μετά τους διωγμούς και την χρήση των κατακομβών.

Κατά την περίοδο αυτή, γίνεται και η μεταπήδηση και χρήση της έννοιας «Εκκλησία», από την Αρχαία Ελληνική έννοια της «Συνέλευσης», στην έννοια του «Οίκου του Κυρίου»

Τα μεγαλόπρεπα, λατρευτικά κτήρια της Παλαιοχριστιανικής περιόδου, αυτά των Βασιλικών, που κατά κύριο λόγο βασίστηκαν στην Ρωμαϊκή μορφολογία των Forum, αποτέλεσαν μία αυτοτελή ομάδα κτισμάτων, με πολλές παραλλαγές (πολύκλιτες, με υπερώα, με εγκάρσια κλίτη κλπ) και κυριάρχησαν, ως χώροι, διότι απάντησαν σε μία από τις σημαντικότερες διαφορές της Αρχαίας ναοδομίας με αυτή της Χριστιανικής, την «Στροφή προς τα έσω» και έτσι μπόρεσαν να προσφέρουν, πρόσφορες συνθήκες, για την «επικοινωνία» μεγάλου αριθμού πιστών, με το «Θείον».

Κατά την πορεία της εξέλιξης της νέας θρησκείας, αναδείχθηκαν πολλές και διαφορετικές ανάγκες, και προέκυψαν προβλήματα και προκλήσεις με κυριότερα από αυτά:

- Την διαχείριση του γιγαντιαίου χώρου της Βασιλικής
- Την ενσωμάτωση των πεποιθήσεων της νέας θρησκείας, που δεν είναι πια τόσο νέα, κωδικοποιημένων σε αισθητική και αρχιτεκτονική.

Μετά την επίλυση της στήριξης του Τρούλου (ημισφαίριο) πάνω σε ένα τετράγωνο, που ορίζεται από 4 κίονες ή πεσσούς στις 4 γωνίες, χρησιμοποιώντας την ευελιξία που προσφέρουν τα σφαιρικά τρίγωνα, οι βυζαντινοί πλέον αρχιμάστορες, τόλμησαν μορφές, που προέκυπταν από την παράδοση των Παλαιοχριστιανικών χρόνων, αλλά ταυτόχρονα, που απομακρύνονταν σιγά σιγά.

200 χρόνια περίπου μετά την ανέγερση των περιγραφικότερων δειγμάτων της Παλαιοχριστιανικής περιόδου, εμφανίζεται στην Θεσσαλονίκη, ένας μεταβατικός τύπος ναού, η Αγία Σοφία, που άμεσα (μέσα στα επόμενα 200 χρόνια) έδωσε τις βάσεις της εξέλιξης, στην τελευταία και επικρατέστερη μορφή, αυτή της Σταυροειδούς Ελεύθερης ή Εγγεγραμμένης Σταυροειδούς (επικράτηση μετά το 1000μ.Χ.).

Η ερώτηση που προκύπτει άμεσα, όταν κάποιος παρατηρήσει της παραπάνω εξέλιξη είναι η εξής:

Κατά της εξέλιξη της μορφολογίας, από τις Βασιλικές μεγάλων διαστάσεων, των Παλαιοχριστιανικών χρόνων, κατόπιν το ενδιάμεσο πέρασμα από τον μεταβατικό τύπο της Αγίας Σοφίας και τελικά την εδραίωση της Σταυροειδούς του 11<sup>ου</sup> αιώνα και μετά, υπήρχε κάποια διακριτή εξέλιξη στην ποιότητα της ακουστικής των χώρων;

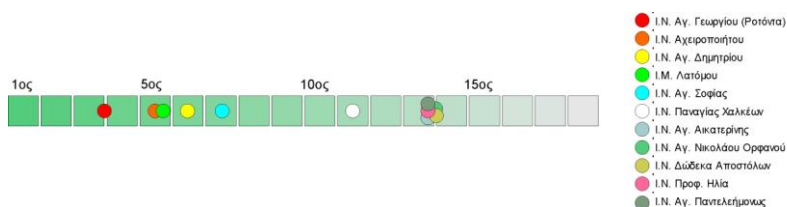
Η παρούσα εργασία, προσθέτει μερικά εργαλεία διακρίβωσης της ακουστικής των παραπάνω χώρων, τα οποία συναινούν στην απάντηση ότι υπήρξε μία ξεκάθαρη εξέλιξη και μία ποιοτική βελτίωση των παραμέτρων της ακουστικής, στην εξέλιξη της ακουστικής, της παλαιοχριστιανικής και της βυζαντινής ναοδομίας.

## 1. Τα δεδομένα

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στα μετρητικά και υπολογιστικά στοιχεία των δύο προηγούμενων εργασιών μου, που παρουσιάστηκαν στα συνέδρια, «Ακουστική 2008» και «Ακουστική 2010».

Αναλυτικά, στις εργασίες αυτές παρουσιάστηκαν οι μετρήσεις σε 11 Χριστιανικούς χώρους, από τα Παλαιοχριστιανικά χρόνια έως τον 14<sup>ο</sup> αιώνα. Από τους 11 χώρους που μετρήθηκαν, δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία 2 από αυτούς λόγω του πολύ μικρού όγκου τους, η Μονή Λατόμου (489m<sup>3</sup>) και του Αγ. Νικόλαου του Ορφανού (520m<sup>3</sup>).

Οι χρονολογίες ανέγερσης των χώρων καθώς και η ονομασία τους παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα.



Σχήμα 1.1. Ο χρόνος οικοδόμησης των υπό εξέταση χώρων.

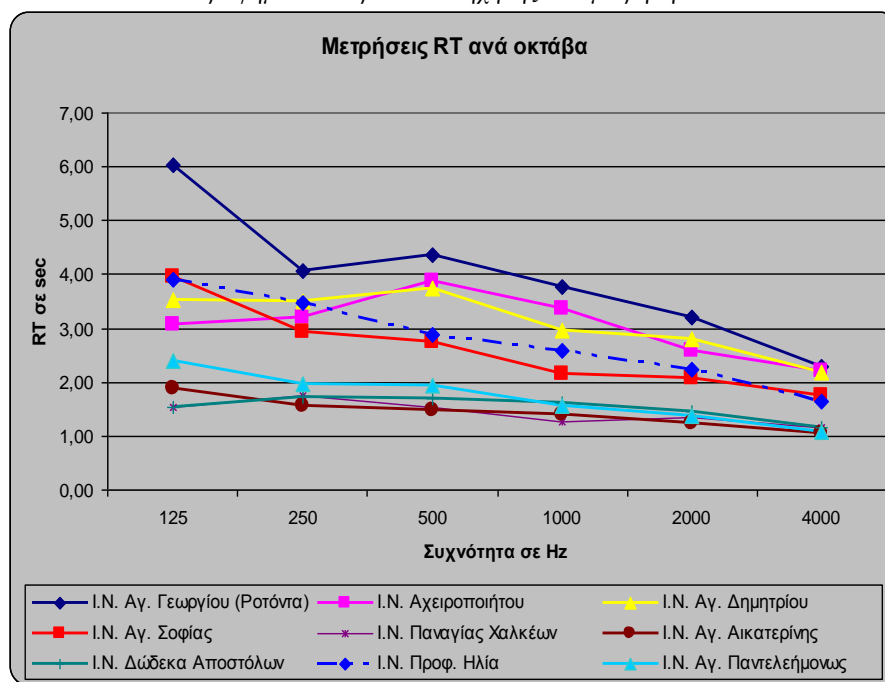
Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η ομαδοποίηση της μορφολογίας που αναφέρεται στην εισαγωγή και περιλαμβάνει, τις ξυλόστεγες δρομικές Βασιλικές των Παλαιοχριστιανικών χρόνων του 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> αιώνα, την ενδιάμεση Σταυροειδή μετά τρούλου και περίστωο, την Αγία Σοφία του 8<sup>ου</sup> αιώνα, η οποία είναι η εξέλιξη της Βασιλικής μετά τρούλου και τέλος, την τελική μορφή της εγγεγραμμένης ή ελεύθερης Σταυροειδούς, που παρουσιάζεται μέσω της Παναγίας χαλκίων τον 11<sup>ο</sup> αιώνα και συνεχίζει με μικρές παραλλαγές μέχρι τον 14<sup>ο</sup> αιώνα.

Οι χρόνοι αντήχησης που μετρήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 1.1 σε αριθμητικές τιμές και στον Πίνακα 1.2 σε γράφημα

Πίνακας 1.1 Χρόνοι Αντήχησης που μετρήθηκαν

α/α	Ονομασία χώρου	# of Measurements	125	250	500	1000	2000	4000
1	I.N. Αγ. Γεωργίου (Ροτόντα)	57	6,03	4,07	4,36	3,76	3,22	2,28
2	I.N. Αχειροποιήτου	58	3,08	3,21	3,88	3,37	2,58	2,20
3	I.N. Αγ. Δημητρίου	34	3,54	3,51	3,75	2,97	2,79	2,17
5	I.N. Αγ. Σοφίας	67	3,95	2,94	2,76	2,16	2,07	1,74
6	I.N. Παναγίας Χαλκέων	40	1,54	1,76	1,53	1,26	1,34	1,16
7	I.N. Αγ. Αικατερίνης	33	1,89	1,56	1,49	1,39	1,25	1,05
9	I.N. Δώδεκα Αποστόλων	66	1,53	1,73	1,71	1,62	1,46	1,17
10	I.N. Προφ. Ηλία	61	3,91	3,46	2,88	2,59	2,24	1,65
11	I.N. Αγ. Παντελεήμονος	40	2,41	1,98	1,94	1,55	1,37	1,09

Γράφημα 1.1 Χρόνοι Αντήχησης που μετρήθηκαν



Παρατηρώντας το Γράφημα 1.1 μπορούμε να κάνουμε έναν σημαντικό διαχωρισμό των χώρων σε δύο ομάδες.

Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τους Παλαιοχριστιανικούς ναούς Αγ. Δημητρίου και Αχειροποιήτου που αντιπροσωπεύει άλλωστε την περίοδο γύρω από τον 5<sup>ο</sup> αιώνα και η δεύτερη ένα σύνολο χώρων, μικρότερων σε διαστάσεις αλλά αρκετά πολύπλοκότερων και πλαστικότερων ως προς την τελική σύνθεση. Στην ομάδα αυτή ανήκουν αρχικά η Παναγία Χαλκέων η οποία είναι η παλαιότερη της ομάδας (11<sup>ος</sup> αιώνας) η οποία ταυτόχρονα δείχνει να έχει εξαντλήσει τις



δυνατότητες της τεχνικής και της αισθητικής της εποχής της. Στην ομάδα επίσης ανήκουν, ο Αγ. Παντελεήμονας, οι 12 απόστολοι, η Αγ. Αικατερίνη.

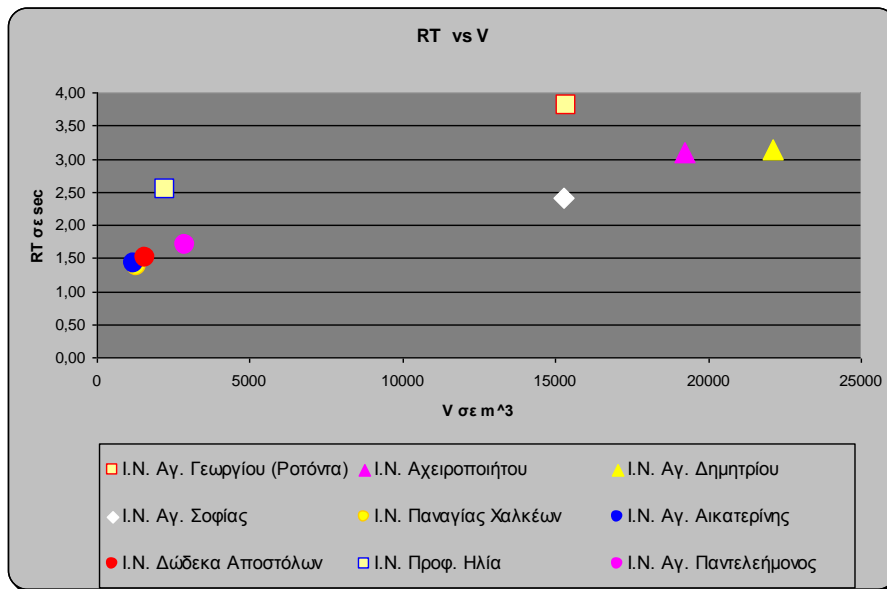
Μεταβατικό πέρασμα μεταξύ των δύο μορφών, αυτού της Βασιλικής των Παλαιοχριστιανικών χρόνων και αυτών των σταυροειδών του 11<sup>ου</sup> και μετά αιώνα, αποτελεί ο ναός της Αγ. Σοφίας, ο οποίος αποτελεί ενδιάμεσο βήμα για να προσαρμοστεί το επιβλητικό, αυστηρό, μέγα μέγεθος της βασιλικής, στον εσωστρεφή, πλαστικό, περίτεχνο και ανθρώπινης κλίμακας, σταυροειδή.

## 2. Παρατηρήσεις

### 2.1 1<sup>η</sup> Παρατήρηση του λόγου RT ανά όγκο.

Η πρώτη παρατήρηση που δείχνει μία έντονη διαφοροποίηση των δύο ακραίων ομάδων, της 1<sup>ης</sup> των Παλαιοχριστιανικών με την 2<sup>η</sup> είναι η σχέση του χρόνου αντήχησης με τον όγκο του χώρου. Στο Γράφημα 2.1 φαίνεται η σχέση των δύο μεγεθών.

Γράφημα 2.1.1 RT vs. V



Στο Γράφημα 2.1 γίνεται φανερή η διαφοροποίηση των δύο ομάδων, η σχεδόν ενδιάμεση μεταβατική φάση της Αγ. Σοφίας και η μακράν, διαφορετική συμπεριφορά δύο χώρων, που μορφολογικά κινούνται εκτός σύγκρισης, του Πρ. Ηλία και της Ροτόντας.

### 2.2 2<sup>η</sup> Παρατήρηση του λόγου V/Stot

Η Χώροι που κατασκευάστηκαν μετά τον 11<sup>ο</sup> αιώνα (αυτοί της 2<sup>ης</sup> ομάδας) παρουσιάζουν μία πολύ διακριτή πτώση του χρόνου αντήχησης γεγονός που

οφείλεται στον εξορθολογισμό του μεγέθους και στην αύξηση της συνολικής απορρόφησης μέσω της αύξησης της συνολικής επιφάνειας εξ αιτίας της πολυπλοκότητας του χώρου και σε γενικές γραμμές την διάχυση.

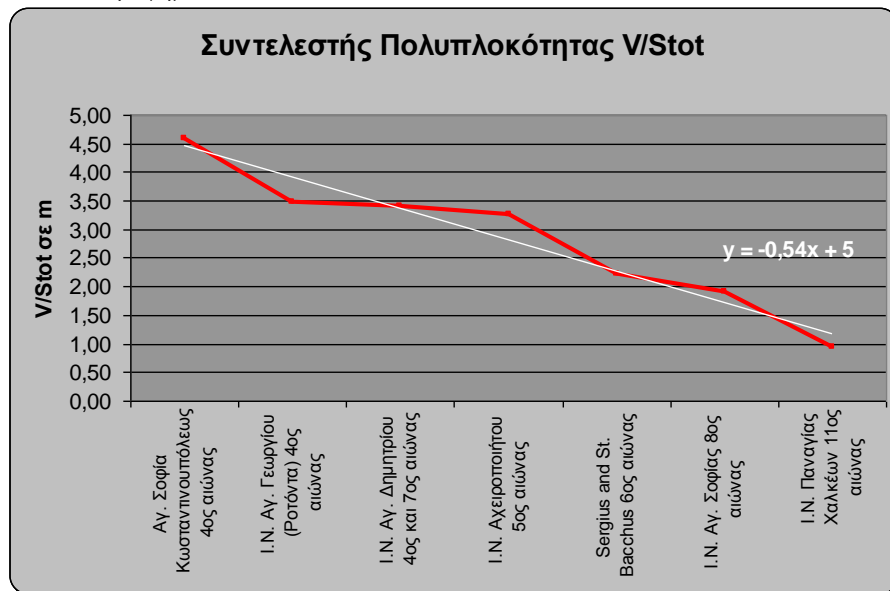
Έτσι παρατηρώντας την εξέλιξη του λόγου του όγκου των χώρων δια της συνολικής επιφάνειας αυτών, παρατηρούμε ότι αυτός μειώνετε συνεχώς

Πίνακας 2.2.1

	Αχειροποίητος	Αγ. Σοφία	Χαλκείων
<b>V/Stot</b>	2.51m	1.91m	0.94m
<b>Χρόνος Κατασκευής</b>	5 <sup>ος</sup> αιώνας	8 <sup>ος</sup> αιώνας	11 <sup>ος</sup> αιώνας

Κάνοντας μία γενικότερη προσέγγιση στο θέμα του V/Stot, στο Γράφημα 2.2.2 παρατηρούμε μία γραμμική μείωση του V/Stot όσο πλησιάζουμε στον 11<sup>ο</sup> αιώνα.

Γράφημα 2.2.2



Σημειώνετε ότι ο λόγος V/S υπό προϋποθέσεις, είναι μήκος 4 φορές μικρότερο από την MFP (Mean Free Path) και η μονάδα του είναι το m.

Ο μηχανισμός λειτουργίας του παραπάνω συλλογισμού φαίνεται αναφέρεται αναλυτικότερα στην εργασία που παρουσίασα στο «Ακουστική 2010».

### 2.3 3<sup>η</sup> Παρατήρηση, συμμόρφωση με τα πρότυπα.

Έχοντας δεδομένους τους όγκους και την χρήση των χώρων, υπολογίστηκε ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης  $RT_{(soil)}$  με βάση τις υποδείξεις του DIN 18041:2004-2005 (σελίδα 13, Figure 1, τύπος (5)) (Στην Παρούσα εργασία το  $RT_{(soil)} \equiv RT_{opt}$ )

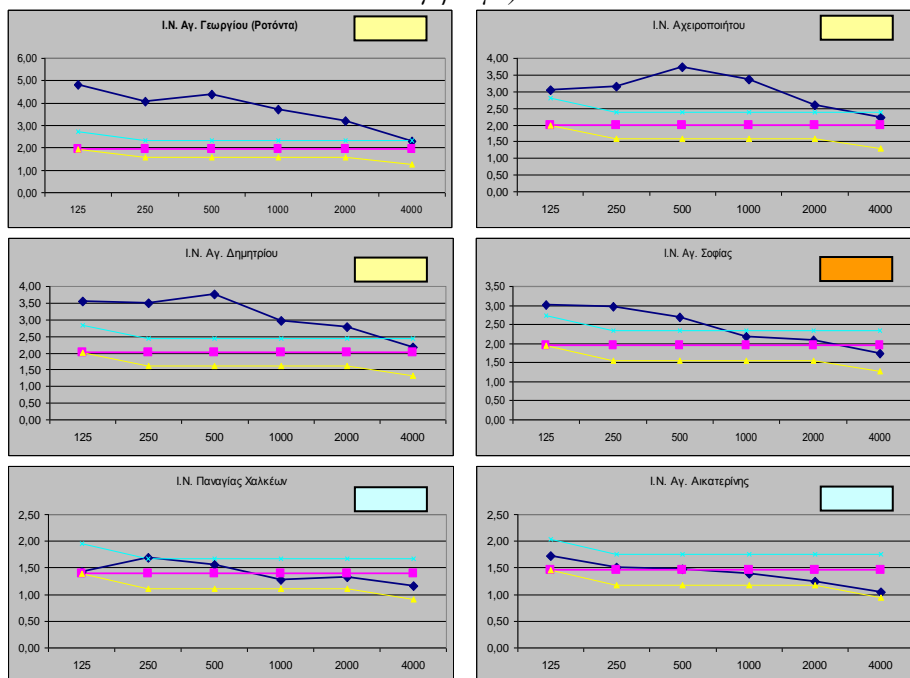
Ο ακριβής τύπος της σχέσης του όγκου με την βέλτιστη αντήχηση  $RT_{opt}$  δίδεται στην σχέση (1.1)

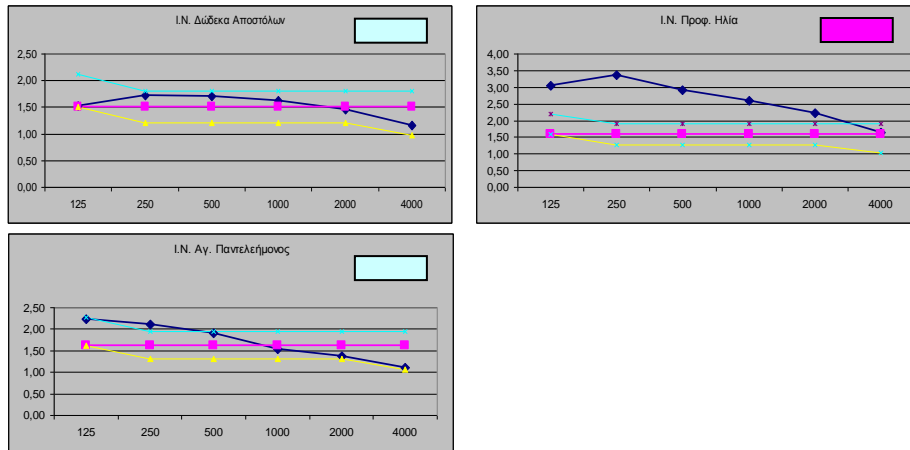
ΣΗΜ: Το εν λόγω DIN προτείνει τιμές  $RT$  για χώρους έως  $5000m^3$ , στην συγκεκριμένη εργασία έγινε κατάχρηση του όρου αυτού για κάποιους από τους ναούς (1<sup>η</sup> ομάδα), αλλά τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον

$$T_{soil} = \left( 0.45 \lg \frac{V}{m^3} + 0.07 \right) s \quad (1.1)$$

Στο Γράφημα 2.3.1 φαίνεται, για κάθε χώρο, η τιμή  $RT$  που μετρήθηκε και η γραμμή  $RT_{opt}$ , που υπολογίζεται με βάση τον όγκο του χώρου και οι μέγιστες αποκλίσεις που προτείνει η οδηγία.

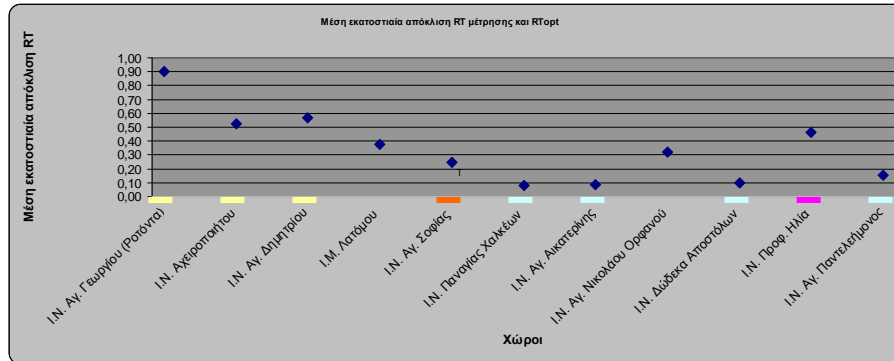
*Γράφημα 2.3.1 Τιμή  $RT$  μέτρησης (μπλε γραμμή), γραμμή  $RT_{opt}$  (μωβ), και οι μέγιστες αποκλίσεις  $RT_{opt}$ . (γαλάζια και κίτρινη γραμμή). Η περίοδος κατασκευής των χώρων περιγράφεται από το έγχρωμο παραλληλόγραμμο, Κίτρινο – Παλαιοχριστιανικά, πορτοκαλί – Μεταβατικό, γαλάζιο - >11<sup>ο</sup> αιώνα, μωβ – μη συγκρίσιμο)*





Στο Γράφημα 2.3.2 φαίνεται η εκατοστιαία απόκλιση του μέσου (250-2000Hz) του RT που μετρήθηκε και του RTort

Γράφημα 2.3.2 Εκατοστιαία απόκλιση του μέσου (250-2000Hz) του RT που μετρήθηκε και του RTort Η περίοδος κατασκευής των χώρων περιγράφεται από την έγχρωμη γραμμή με Κίτρινο – Παλαιοχριστιανικά, πορτοκαλί – Μεταβατικό, γαλάζιο - >11<sup>ο</sup> αιώνα, μωβ – μη συγκρίσιμο



Στο Γράφημα 2.3.2 παρατηρείται πολύ μικρή απόκλιση (<10%), των τιμών των χώρων της δεύτερης ομάδας (11<sup>ος</sup> – 14<sup>ος</sup>), μία σχετικά μικρή απόκλιση της Αγ. Σοφίας (~25%) και πολύ μεγαλύτερες αποκλίσεις στους άλλους χώρους (30%-90%).

### 3. Συμπεράσματα

Από την παρούσα εργασία προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα

- Υπήρξε στην μετάβαση, από τα Παλαιοχριστιανικά χρόνια στον 11<sup>ο</sup> αιώνα, μία ανάγκη εξορθολογισμού των γιγάντιων χώρων των ξυλόστεγων

Βασιλικών, ο οποίος ήταν πιθανόν να οφειλόταν και στην κακή ακουστική και μάλιστα έγιναν σχετικοί πειραματισμοί.

- Από την γραμμική μείωση του συντελεστή  $V/S$  κατά το πέρασμα των χρόνων, παρατηρείται, μία συνειδητή αύξηση της πολυπλοκότητας των κατασκευών και κατ'επέκταση της απορροφητικής ικανότητας του χώρου, αφενός και αφετέρου πρόσθεση μεγάλου βαθμού διάχυσης, σε αντίθεση με τις τεράστιες ανακλαστικές επιφάνειες και την μικρού βαθμού διάχυση των Παλαιοχριστιανικών χώρων.
- Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι τεχνίτες, κατά τους βυζαντινούς χρόνους, μπορούσαν να οικοδομήσουν κτίρια, χωρίς σχεδόν καθόλου χρήση απορροφητικών, βασιζόμενοι μόνο στην γεωμετρία του χώρου, καλύπτοντας τις απαιτήσεις του DIN18041, (Acoustic quality in small to medium-sized rooms), χίλια χρόνια πριν αυτό, συνταχθεί.

#### 4. Βιβλιογραφία

- [1] Beranek L. Acoustics, New York, ASA. (1993)
- [2] Everest, Alton F., Εγχειρίδιο Ακουστικής, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα. (1994-98)
- [3] <http://odysseus.culture.gr>, Ιστοσελίδα Υπουργείου Πολιτισμού.
- [4] Long Marshall, Architectural Acoustics, London, Elsevier Academic Press, (2006).
- [5] Cirillo E., Martellota F., Worship Acoustics and Architecture, Essex, Multi Science Publishing Co. Ltd, (2006)
- [6] Αγγελόπουλος Λ., Η Βυζαντινή μουσική, Αθήνα, Περ. Αρχαιολογία τ.14 45-54, (1984)
- [7] Μπούρας Χ., *Μαθήματα Ιστορίας της Αρχιτεκτονικής*, τόμ. Β', Αθήνα (ανατ. 1980). (1975).
- [8] Μπούρας Χ., *Ιστορία της Αρχιτεκτονικής*, τόμ. Β', Αθήνα (1999)
- [9] Μπούρας Χ., Βυζαντινή και Μεταβυζαντινή αρχιτεκτονική στην Ελλάδα, Αθήνα. (2001)
- [10] Ορλάνδος Α. Η Ξυλόστεγος Παλαιοχριστιανική Βασιλική της Μεσογειακής Λεκάνης, Αθήνα 1952
- [11] Παπαδόπουλος Γ., Ιστορική επισκόπηση της βυζαντινής εκκλησιαστικής μουσικής από των αποστολικών χρόνων μέχρι των καθ' ημάς, Κατερίνη, Εκδόσεις Τέρτιος.
- [12] Tzekakis Emm, The acoustics of the early Christian monuments of Thessaloniki, Archive of acoustics V6 p3, (1981)
- [13] Tzekakis Emm, Reverberation Time of Rotunda of Thessaloniki, Journal of ASA V57 p1207 (1975).
- [14] Tzekakis Emm, Reverberation Time of two early Christian Basilicas of Thessaloniki, Proceeding 9<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Madrid 1977, V1 p94, (1977)
- [15] DIN18041:2004-2005

Στον φίλο Πολυνίκη που δίνει σιωπηλά, την μάχη της ζωής του.

## **Εφαρμογή του προτύπου EN 12354: Λογισμικό Knauf Sound Insulation (KSI)**

Dejan Todorović<sup>1,a</sup>, Vladimir Čelebić<sup>2</sup>, Miodrag Stanojević<sup>3</sup>, Mirjana Radosavljević<sup>1</sup>  
& Yiannis Kontoulis<sup>4,b</sup>

<sup>1</sup>Dirigent Acoustics, Serbia

<sup>2</sup>Institute Mihailo Pupin, Serbia

<sup>3</sup>BIT projekt, Serbia

<sup>4</sup>Knauf Insulation, Greece

<sup>a</sup>[dejan.todorovic@dirigent-acoustics.co.rs](mailto:dejan.todorovic@dirigent-acoustics.co.rs), <sup>b</sup>[yiannis.kontoulis@knaufinsulation.com](mailto:yiannis.kontoulis@knaufinsulation.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η ακουστική άνεση έχει όλο και πιο σημαντικό ρόλο στο σημερινό θορυβώδες περιβάλλον. Η ακουστική κτιρίων έχει κύριο σκοπό να παράσχει επαρκή ακουστική άνεση είναι σε διαχωριστικούς-τοιχούς και πατώματα. Η συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων και της υποκειμενικής αξιολόγησης της ηχομόνωσης έχει αναλυθεί σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας. Αποτέλεσμα αυτής της πρωτοπόρου εργασίας, σε συνεργασία με αυθεντίες στον τομέα της ακουστικής είναι το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12354. Εκτός από το διαχωριστικό τοίχο γειτονικών δωματίων, ο ρόλος της παράπλευρης μετάδοσης λαμβάνεται προσεκτικά υπόψη στον υπολογισμό του καλά καθορισμένου αλγορίθμου. Η ηχομόνωση είναι ένα αίνιγμα για πολλούς επαγγελματίες που αναγκάζονται να κάνουν υπολογισμούς για νέα οικοδομικά έργα ή έργα ανακαίνισης. Προκειμένου να παρέχουμε ένα επαρκές εργαλείο, αναπτύξαμε λογισμικό με βάση αυτό το πρότυπο. Η πρόθεση σε αυτή την υλοποίηση, δεν ήταν μόνο η εφαρμογή του αλγορίθμου, αλλά επίσης να βοηθηθούν οι σχεδιαστές ώστε να κατανοήσουν καλύτερα την ηχομόνωση και την επίδραση ορισμένων στοιχείων στο τελικό αποτέλεσμα. Χάρη στους εταίρους αυτού του έργου, το πρόγραμμα αυτό, μια τεράστια βιβλιοθήκη από καταμετρημένες κατασκευές λαμβάνεται υπόψη στο λογισμικό. Για εκπαιδευτικούς σκοπούς, το λογισμικό είναι εξοπλισμένο με το εργαλείο ακουστικής απόδοσης (auralization), και η τελική έκθεση που παράγει, περιέχει μεγάλο αριθμό των στοιχείων που έχουν σημασία για την ηχομόνωση.*

### **An Implementation of EN 12354: Knauf Sound Insulation (KSI) Software**

#### **ABSTRACT**

*Acoustic comfort is getting to be more and more important in today's noisy environment. In the building acoustics, the main task to provide adequate acoustic*

comfort is on partitions - walls and floors. The correlation between measurements and the subjective evaluation of sound insulation has been analyzed in a study carried out at the Technical University of Denmark. Result of that pioneer work, in cooperation with a number of authorities in the field is an EN series standard 12354. Besides the partition that separates the adjacent rooms, the role of flanking transmission is carefully taken into calculation by the well-defined algorithm. Sound insulation is an enigma for many professionals that are forced to perform the calculations for the new building project or in the mitigation project. In order to provide an adequate tool, the standard based software is developed. The idea behind this project was not only to implement the algorithm, but also to help the designers to better understand the sound insulation and the effect of certain elements on the result. Thanks to the partners in this project, the huge library of measured constructions is implemented in the software. For educational purposes, the software is equipped with the auralization tool, and the final report contains the large number of details that are of importance to sound insulation.

## Introduction

In order to ensure a better acoustical comfort in dwellings and to improve the quality of acoustical projects, the new building regulations have been specified throughout Europe. To achieve that goal, regulations specify sound insulation requirements that should be fulfilled from building design, according to the EN ISO 12354 family [1]. The main of the EN 12354 series standard lies in the use of the measured acoustical performance of elements as an input for the estimation of the acoustical performance of the buildings. In Knauf Sound Insulation – KSI Software the EN 12354-1, 2 and 3 are applied. The sound power in the receiving room is due to sound radiated by the separating structural elements and the flanking structural elements in that room and the relevant direct and indirect airborne sound transmission. The total transmission factor can be divided into transmission factors, related to each element in the receiving room and the elements and systems involved in the direct and indirect airborne transmission.

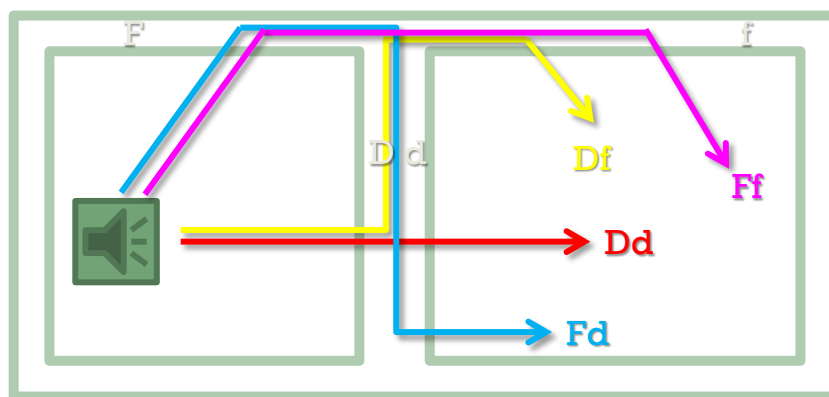


Fig. 1. Sound transmission paths between adjacent rooms

For the two adjacent rooms the total number of 13 transmission paths can be allocated. The detailed model calculates the building performance in frequency bands, based on acoustic data for the building elements in frequency bands. From these results the single number rating for the building performance can be deduced in accordance with EN ISO 717-1 for airborne sound and EN ISO 717-2 for impact sound [2]. The acoustic data on the elements involved should be taken primarily from the standardized laboratory measurements. However, they may also be deduced in other ways, using theoretical calculations, empirical estimations or measurement results from the filed situations, but these data should be taken into account with highest caution and under the surveillance of the expert in the field. As usual, the wrong input will mislead with the wrong output results.

The algorithm for the calculations of the structural reverberation time, vibration reduction index, and all the other data and variables for the calculation in each case is given in standards. The models of the sound transmission are considered in detail, so the result will take into account all the relevant data in order to achieve the maximum accuracy. The main experience in the application of similar models has been so far with buildings where the building elements are homogeneous, i.e. brick walls, gypsum blocks etc. In those situations the prediction of the single number rating by the detailed model is on average correct (no bias error) with the standard deviation of 1,5 dB to 2,5 dB (the lower value if all aspects are taken into account, the larger to complex situations when neglecting the structural reverberation time).

## **1. Building acoustics**

The process of the building acoustics design consists of the next steps:

- Terms of reference, given by the investor
- Design process with the calculations
- Harmonization of the projects
- Project revision

The next phase in the building development is the construction, but the serious supervision should be provided. In the building acoustics, this supervision is important as much as the design phase. This is because the relevance of every single detail in the development process [3], [4]. Every installation penetration, wrong junction, unpredicted holes, poorly carried electrical socket, the wrong studs shape and its poor quality and many other details may devalue the large effort and investment in the building acoustics. Finally, the sound insulation should be measured on filed. Only if the all the steps are well performed, the result will fulfil the required criteria and the building will provide the adequate acoustical comfort.

Sound insulation software is one of the essential tools in this process. We have developed the standards based tool for engineers, Knauf Sound Insulation software. This software applies all the algorithms and rules of the EN 12354 series standards. Firstly, the software is developed for the market in Serbia, Bulgaria and FYRM.

## **2. Structure of the KSI software**

The KSI software is divided into modules that appears on the main screen (Fig. 2):

- Graphic module (Fig. 3),



- Calculation module (Fig. 4),
- Library module (Fig. 6),
- Report generation and
- Auralization module (Fig. 8).

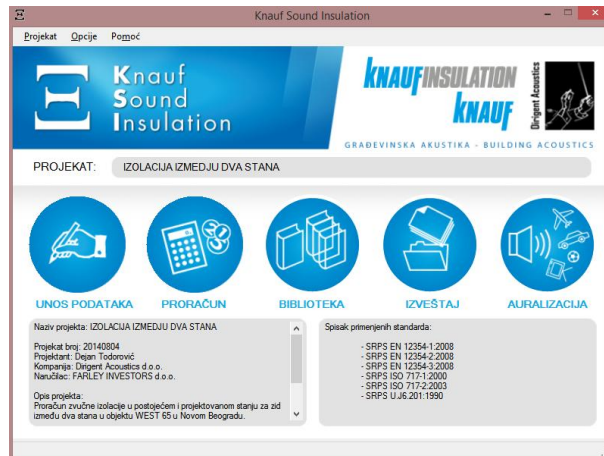


Fig. 2. The main screen of the KSI software

### 2.1 Graphics module (Fig 3)

The graphics module is the main operational part of the software. This is the place where the engineer creates the situation. To start, one chooses the adjacent rooms at the same floor or the one on the top of another. The main screen of the graphics interface is interactive, and the user can check the data (mouse over) or chose the data for the selected element from the library. When the user selects the room types, the criteria for the sound insulation is automatically introduced. In the same window, the dimensions of the rooms should be entered, as well as the relative positions of the one room to another.

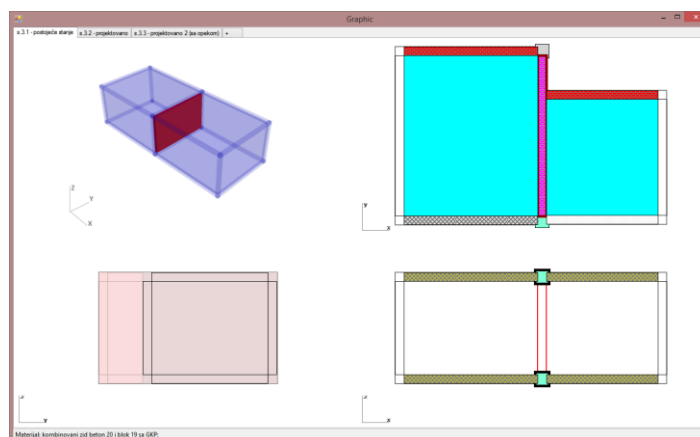


Fig. 3. The graphic module

Finally, the junction types should be selected, and the model is ready for the calculation. In the new tab, user may add the new situation or copy the selected, change the name of the situation etc.

## 2.2 Calculation module (Fig. 4)

#	Naziv konstrukcije	F	Tip	Namena	Rez. Fle	Rez. Lrw	Krit. Fle	Krit. Lrw	Fle	Lrw
1	m.1.1-FIZIKA-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	61 dB	55 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	m.1.1-FIZIKA-FIZICKO	F3	Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	D2m n.T. Aev= 76dB				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	m.1.1-FIZIKA-FIZICKO	F4	Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	D2m n.T. Aev= 48dB				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	m.1.2-MUZICKO-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	62 dB	53 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	m.1.3-LIKOVNO-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	62 dB	53 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	m.1.4-12 RAZRED-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	63 dB	53 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	m.1.5-11 RAZRED-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	63 dB	53 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	m.1.6-HEMIJA-KUHINJA		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / bučna pogonska prostorja	67 dB	49 dB	57 dB (F.7)	60 dB (F.7)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	m.1.7-POM FIZIKA-FIZICKO		Na različen etažama	druga Biciklaška prostorja / druga Biciklaška prostorja	71 dB	49 dB	50 dB (F.10)	63 dB (F.10)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	m.1.8-POM LIKOVNO-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	70 dB	49 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	m.1.9-POM HEMIJA-FIZICKO		Na različen etažama	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	71 dB	48 dB	60 dB (F.6)	63 dB (F.6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	s.0.1-FIZIKA-LIKOVNO		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / ušonica/kabinet / laboratorija	60 dB		52 dB (F.1)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	s.0.2-FIZIKA-POM FIZIKA		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / prostorja druge namene	60 dB		52 dB (F.1)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	s.0.3-MUZICKO-POM FIZIKA		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / prostorja druge namene	67 dB		52 dB (F.1)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	s.0.3-MUZICKO-12 RAZRED		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / fizičko/muzičko/ tehničko i sl.	65 dB		(F.2)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	s.0.4-FIZIKA-HODNIK		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / vilo bučna prostorja	55 dB		7>57 dB (F.5)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	s.0.4-MUZICKO-HODNIK		Na istoj etaži	fizičko/muzičko/ tehničko i sl. / bučna pogonska prostorja	65 dB		57 dB (F.4)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	s.0.5-LIKOVNO-HODNIK		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija sa vratima / hodnik sa vratima	60 dB		(F.3)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	s.0.5-12 RAZRED-HODNIK		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija sa vratima / hodnik sa vratima	60 dB		(F.3)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	s.0.6-LIKOVNO-POM LIKOVNO		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / prostorja druge namene	60 dB		52 dB (F.1)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	s.0.6-POM LIKOVNO-POM HEMIJA		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / prostorja druge namene	60 dB		52 dB (F.1)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	s.0.7-12 RAZRED-M TOALET		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / bučna pogonska prostorja	60 dB		57 dB (F.4)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21	s.0.8-12 RAZRED-Z TOALET		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / bučna pogonska prostorja	60 dB		57 dB (F.4)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	s.0.9-HEMIJA-HODNIK		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / bučna pogonska prostorja	60 dB		57 dB (F.4)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	s.0.9-MEDIJURAZRED-STEPENISTE		Na istoj etaži	ušonica/kabinet / laboratorija / bučna pogonska prostorja	58 dB		57 dB (F.4)		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 4. KSI calculation module

The calculation module contains all positions with results of the calculations and its relation to the criteria. The red mark points to position where the result that does not fulfil the criteria. User can select the position and check the calculation results (Fig. 5).

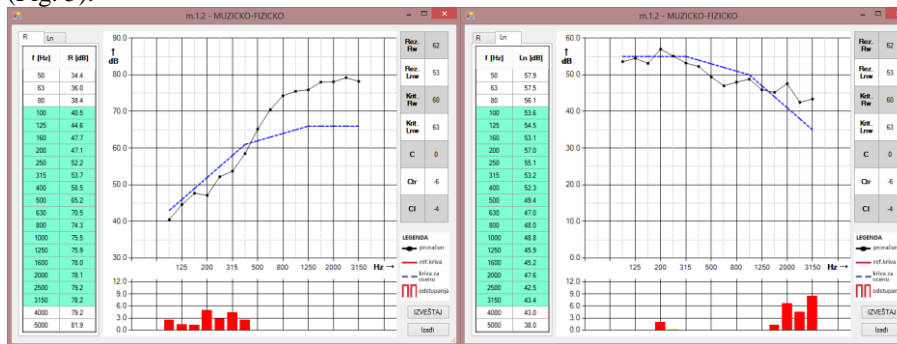


Fig. 5. Example of the calculation results

## 2.3 The library

Library is the heart of KSI software. It contains the sufficient amount of measured data to provide the option to calculate the wide range of the situations. Each country has certain amount of the frequently used materials that must be applied into the library [5]. Library is divided in sections in accordance with the position where the material will be used (facades and roofs, internal walls, slabs etc.).

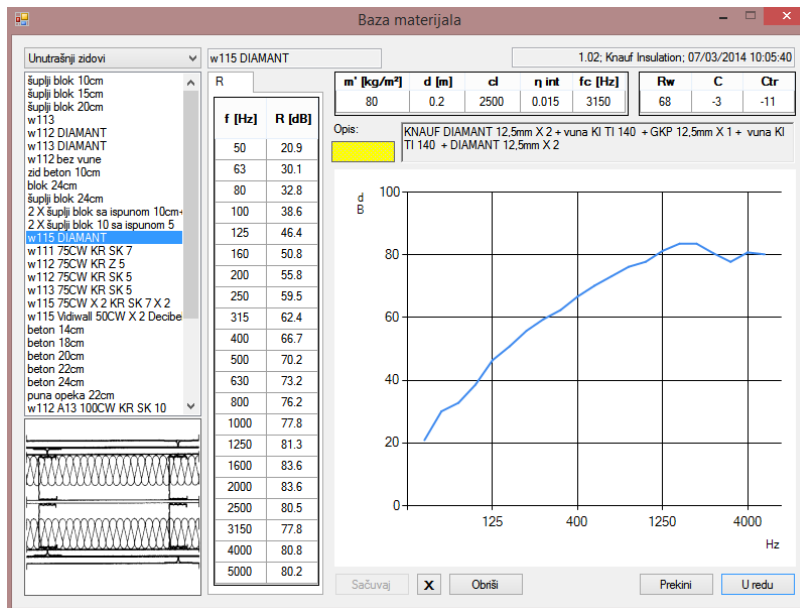


Fig. 6. The materials library

#### 2.4 Report generation and the auralization module [6]

When all calculations shows the result that suits the criteria, the report can be generated. Report contains all input data, results of the calculations and appendixes. The appendixes contains details important for the sound insulation, junctions of the wall with the ceiling or floor, electric outlet in gypsum wall, etc. Each calculation result is presented in extended frequency range, with single value sound insulation rating and its relation to the criteria. The construction details are presented (Fig. 8).

The auralization button opens the web page [7] with audio examples of sound insulation: roof, slab, façade and internal wall, with several different construction types for each example (Fig. 7). This tool helps the inexperienced user to understand the effect of the sound insulation on perceived sound.

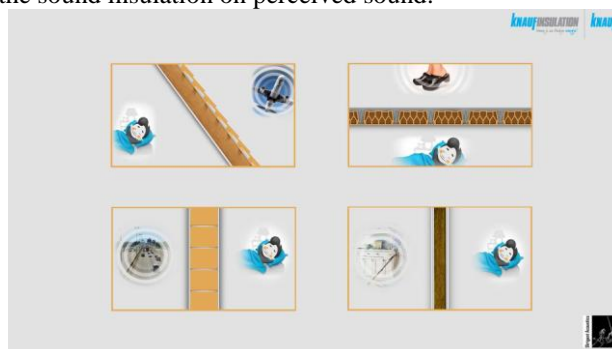
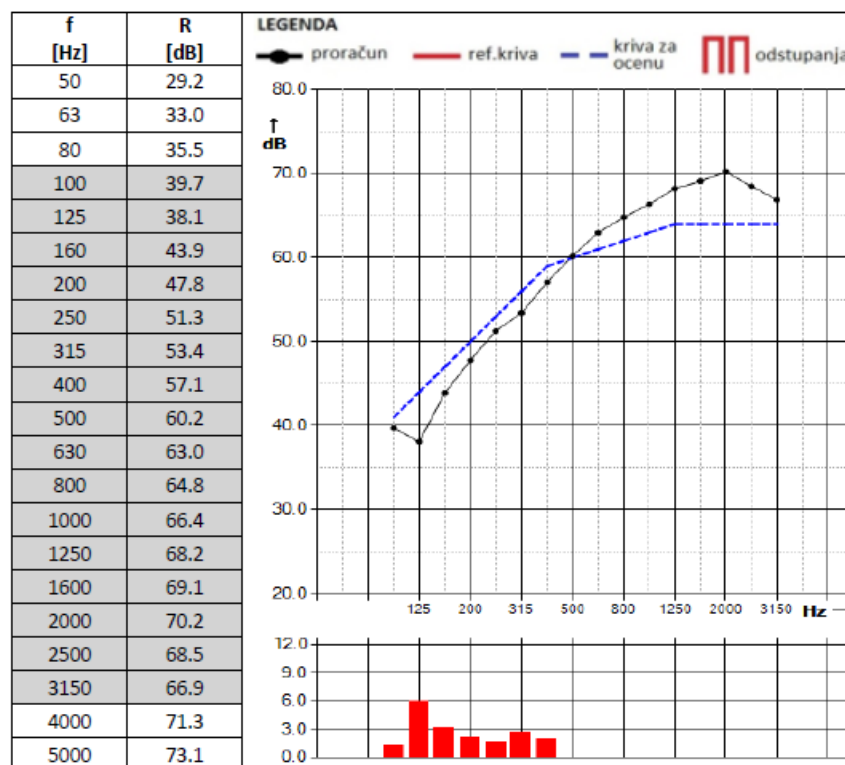


Figure 7. WEB auralization screen [7]

Situacija2: s.3.2 - projektovano (H)

Dispozicija H							
Prostorija R: zajednički zid: sklop TK5 pod: sklop TK6 plafon: sklop TK6 bočni zid': sklop TK3 bočni zid'': sklop TK1	Prostorija S: zajednički zid: sklop TK5 pod: sklop TK6 plafon: sklop TK6 bočni zid': sklop TK4 bočni zid'': sklop TK1						
Spoj: PP (T1)		Spoj: TT (T1)		Spoj: Z'Z' (T4)		Spoj: Z''Z'' (T1)	



Kriterijum prema SRPS U.J6.201: <b>Rw,min = 52 dB</b>	
Ocena prema SRPS ISO 717-2: <b>Rw(C,Ctr) = 60 (-1,-6) dB</b>	

Fig. 8. Report page example [8]

### 3. Conclusions

Knauf Sound Insulation software is developed as an engineering tool for calculation of sound insulation of buildings in accordance to latest standards. Calculation algorithms are implemented from the EN 12354 series standard, single value sound insulation ratings are calculated in accordance to EN ISO 717-1 and 2, and criteria are adopted from the local regulations (SRPS U.J6.201 for Serbian market). The graphic user interface is user friendly, easy to understand and to apply the construction details from the architecture project. Calculated values of sound insulation are easy to interpret and the representation of the results suggests user how to improve the insulation if it is necessary. For less experienced users, investors and other interested parties, the auralization tool is educationally oriented and helps them to understand the sound insulation and its effects on perceived noise from various sources. The library of the software contains a large number of measured data that will allow engineers to develop the most demanding building projects. Report on the sound insulation is rich with details about the project, used materials and constructions. The results are presented in easy readable manner and systematized in the table of results. Appendix of the report contains many important details for the construction point.

### 4. Acknowledgment

Authors wish to thank KnaufInsulation Serbia, Greece, Bulgaria and FYROM and Knauf Serbia for the support in developing this software.

### 5. References

- [1] Standard EN 12354 Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms, Part 2: Impact sound insulation between rooms, Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound
- [2] Calcul d'indices Partie 1 – Isolement aux bruits aériens – Calcul des indices avec la norme NF EN ISO 717-1, Partie 2 – Protection contre le bruit de choc – Calcul des indices avec la norme NF EN ISO 717-2
- [3] Dejan Todorović, Draško Mašović, Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, “Sound Level Difference at Source and Receiver Side of Homogenous Partition at Low Frequencies”, EURONOISE 2012, Prague, 10-13 June 2012
- [4] Draško Mašović, Dejan Todorović, Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, „Relation between the sound level inside a rectangular room and on its walls at low frequencies“, EURONOISE 2012, Prague, 10-13 June 2012
- [5] Miomir Mijić, Dragana Šumarac Pavlović, Dejan Todorović, Ana Radivojević, “Sound insulation between dwellings in existing housing stock in Serbia”, EURONOISE 2012, Prague, 10-13 June 2012
- [6] D.Todorović, M.Lekić, “Auralization of Sound Insulation”, 2nd International Acoustics and Audio Engineering Conference TAKTONS 2013, Novi Sad, Nov 13-16. 2013.
- [7] [www.dirigent-acoustics.co.rs/auralizacija.php](http://www.dirigent-acoustics.co.rs/auralizacija.php)
- [8] [www.dirigent-acoustics.com](http://www.dirigent-acoustics.com)

**Μελέτη και κατασκευή θαλάμου αναφοράς  
για ακουστικές μετρήσεις στο  
Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας**

Θεόδωρος Τιμαγένης

Αρχιτέκτων Μηχανικός – Σύμβουλος Ακουστικής, Κ. Παλαιολόγου 5, Πειραιάς

[ttimagenis@hol.gr](mailto:ttimagenis@hol.gr)

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μελέτη και η κατασκευή θαλάμου αναφοράς ακουστικών μετρήσεων που ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2014 σε χώρο του νέου κτιρίου Διάχυτης Νοημοσύνης του ΙΤΕ στο Ηράκλειο Κρήτης. Ο θάλαμος κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ITU – R.B.S. 1116-1.

Μετά το πέρας της κατασκευής, διενεργήθησαν εκτεταμένες μετρήσεις και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις προδιαγραφές της μελέτης. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ικανοποίηση των προδιαγραφών, είναι όμως δυνατή και η εξαγωγή γενικότερων συμπερασμάτων.

***Design and Construction of  
Reference Listening Room at  
Foundation for Research and Technology  
– Hellas (FORTH)***

**ABSTRACT**

*The current paper discusses the design and construction of the aforementioned room, which was completed in June 2014, located in the newly erected building of FORTH. The room fabrication has been realized under the ITU – R.B.S. 1116 – 1 standards.*

*After its practical completion, various extensive measurements were undertaken and cross – referenced with the design specifications. The results demonstrated a successful satisfaction of the design parameters, yet allowing the extraction of several other conclusions.*

## 1. Εισαγωγή

Το ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ) ξεκίνησε την λειτουργία του το 1983 και είναι ένα από τα μεγαλύτερα και πιο άρτια οργανωμένα, εξοπλισμένα και στελεχωμένα ερευνητικά κέντρα της χώρας.

Το ΙΤΕ έχει την έδρα του στο Ηράκλειο Κρήτης και αποτελείται από έξι ερευνητικά Ινστιτούτα. Ένα εξ' αυτών είναι το Ινστιτούτο Πληροφορικής (ΙΠ).

Το ΙΤΕ, έχει επιδείξει άριστες επιστημονικές επιδόσεις καθώς και σημαντική οικονομική προσφορά, σε επίπεδο που το καθιστούν ένα από τα κορυφαία ερευνητικά κέντρα διεθνώς [1].

Τον Ιούλιο του 2014, ολοκληρώθηκε στο υπόγειο του νέου κτιρίου Διάχυτης Νοημοσύνης του ΙΤΕ, η κατασκευή «Θαλάμου Αναφοράς Ακουστικών Μετρήσεων». Για τη μελέτη και κατασκευή τέτοιων θαλάμων υπάρχουν διάφορα πρότυπα.[2] Ο θάλαμος μελετήθηκε (2010) και κατασκευάστηκε (2014) σύμφωνα με τις προδιαγραφές ITU-R.B.S.1116-1 [3] όπως ζητήθηκε από το ΙΠ-ΙΤΕ.

Ο θάλαμος θα αποτελέσει ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη της έρευνας στους τομείς της ηλεκτροακουστικής, της ψυχοακουστικής κ.ά.

## 2. Συνθήκες ακρόασης

Με βάση τον ορισμό που περιλαμβάνεται στο ITU-BS1116-1 [2] ο όρος «Συνθήκες Ακρόασης» (Listening conditions) περιγράφει τις σύνθετες ακουστικές απαιτήσεις που αφορούν στο ακουστικό πεδίο αναφοράς που επηρεάζει έναν ακροατή μέσα σε ένα θάλαμο ακρόασης (listening room) ευρισκόμενο στο σημείο ακρόασης αναφοράς (listening reference point) για ήχο παραγόμενο από μεγάφωνα.

Στη διαμόρφωση των συνθηκών ακρόασης συμμετέχουν:

- α- Τα ακουστικά χαρακτηριστικά του θαλάμου
- β- Η διάταξη των μεγάλων
- γ- Η θέση του σημείου ακρόασης αναφοράς

Από τα ανωτέρω, αντικείμενο της μελέτης καθώς και της παρούσας εργασίας είναι το (α).

## 3. Περιγραφή θαλάμου

Το κτήριο Διάχυτης Νοημοσύνης, μέσα στο οποίο κατασκευάστηκε ο θάλαμος ακρόασης, είναι κτήριο με μεταλλικό σκελετό και σύμμεικτες πλάκες. Όπως είναι γνωστό, τέτοια κτίρια παρέχουν ηχομόνωση αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με κτίρια που είναι κατασκευασμένα με συμβατικό Φ.Ο. (σκυρόδεμα).

Κατά το χρόνο ανάθεσης της μελέτης η κατασκευή του μεταλλικού Φ.Ο. ευρίσκετο σε προχωρημένο στάδιο. Ως καταλληλότερο επίπεδο για την κατασκευή του θαλάμου, επελέγει το υπόγειο, ώστε ο θάλαμος να εδράζεται σε άκαμπτο πάτωμα. Στο υπόγειο επίσης ήταν δυνατόν να εξασφαλισθεί μεγαλύτερο ύψος για τον θάλαμο, αν ο θάλαμος ετοποθετείτο μεταξύ των συνδετήριων δοκών της θεμελίωσης αφού προηγουμένως απομακρύνονταν οι επιχώσεις μεταξύ των δοκών.

Ο θάλαμος κατασκευάστηκε με το σύστημα «δωμάτιο μέσα σε δωμάτιο» (σχ.1). Το φέρον δάπεδο του θαλάμου είναι πλάκα Ο.Σ., η οποία εδράζεται επάνω σε ελαστικά εφέδρανα, διαστάσεων της τάξεως των 200x200x75mm (ΜxΠxΥ).

Οι τοίχοι και η οροφή κατασκευάστηκαν από μεταλλικό φέροντα οργανισμό επάνω στον οποίο στερεώθηκαν γυψοσανίδες με ενδιάμεσο φύλλο μολύβδου. (12,5-3-12,5mm).

Ο χρόνος αντήχησης του θαλάμου με χρήση ειδικών ηχοαπορροφητικών πανών [4], ρυθμίστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές και στο χαμηλότερο όριο αυτών, ώστε ο θάλαμος να μπορεί να χρησιμοποιείται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο φάσμα ερευνών (ο θάλαμος δηλ. έχει ιδιότητες ανάλογες με αυτές ενός ημιανηχοϊκού θαλάμου).

Το δάπεδο του θαλάμου κατασκευάστηκε υπερυψωμένο και είναι επισκέψιμο σε κάθε σημείο, διότι κάτω από αυτό έχουν εγκατασταθεί ποικίλα μηχανολογικά δίκτυα (ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, κλιματισμού). Η τελική επιφάνεια του δαπέδου είναι ξύλινη.

Ο κλιματισμός του θαλάμου εξασφαλίζεται με την εγκατάσταση (έξω απ' αυτόν) δύο κλιματιστικών μονάδων οροφής. Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης χαμηλής στάθμης θορύβου, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά γωνιακά στόμια και εύκαμπτοι ηχοαπορροφητικοί αγωγοί.

## 4. Έλεγχος θαλάμου – Ηχομετρήσεις

### 4.1 Γενικά

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών εκτελέστηκαν εκτεταμένες ηχομετρήσεις<sup>(1)</sup> προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι ο θάλαμος ικανοποιεί τις απαιτήσεις των προδιαγραφών. Χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωτικό ηχόμετρο τύπου SIP95, με το οποίο μπορούν να γίνουν αξιόπιστες μετρήσεις από 15 dB(A) και άνω, στις μέσες και χαμηλές συχνότητες. Στις υψηλές συχνότητες το ηχόμετρο είναι αξιόπιστο από ~20 dB(A) και άνω (λόγω του παραγόμενου εσωτερικού ηλεκτρικού θορύβου).

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα του ελέγχου του θαλάμου.

### 4.2 Πρώιμες ανακλάσεις (early reflections) παραγρ. 8.3.3.1 προτύπου ITU-RBS. 1116-1

Με βάση την προδιαγραφή της ανωτέρω παραγράφου, κάθε ανάκλαση ήχου, προερχόμενη από τις περατωτικές επιφάνειες του θαλάμου, η οποία φθάνει στον αποδέκτη (ακροατή) σε διάστημα < 15 ms μετά τον απ' ευθείας ήχο θα πρέπει να αποδυναμώνεται στην ζώνη από 1 kHz – 8 kHz, κατά τουλάχιστον 10 dB, σε σχέση με τον απ' ευθείας ήχο.

Η ανωτέρω απαίτηση, ικανοποιείται στον υπό εξέταση θάλαμο, καθ' όσον όλες οι κατακόρυφες επιφάνειες και η οροφή, είναι καλυμμένες με ηχοαπορροφητικές

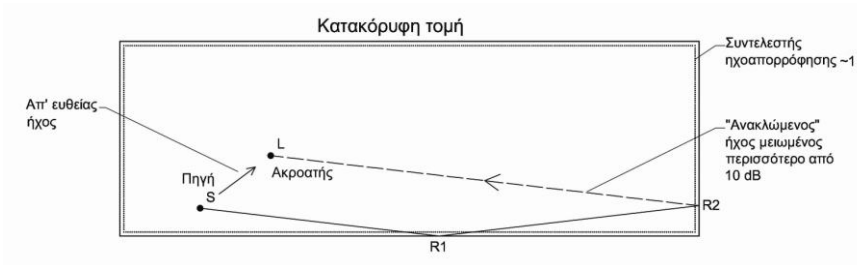
---

<sup>(1)</sup> Κατά τη διενέργεια των ηχομετρήσεων (7/52014), δεν είχε ολοκληρωθεί η σφράγιση των θυρών του θαλάμου καθώς και των οπών διέλευσης των αγωγών κλιματισμού που διαπερνούν τον τοίχο που χωρίζει το θάλαμο του παρακείμενου χώρου που χρησιμοποιείται ως μηχανοστάσιο και στον οποίο τοποθετήθηκε, επίσης, η μια κλιματιστική μονάδα. Ακόμη, δεν είχαν τοποθετηθεί οι διαχυτές στις τέσσερις γωνίες του θαλάμου.



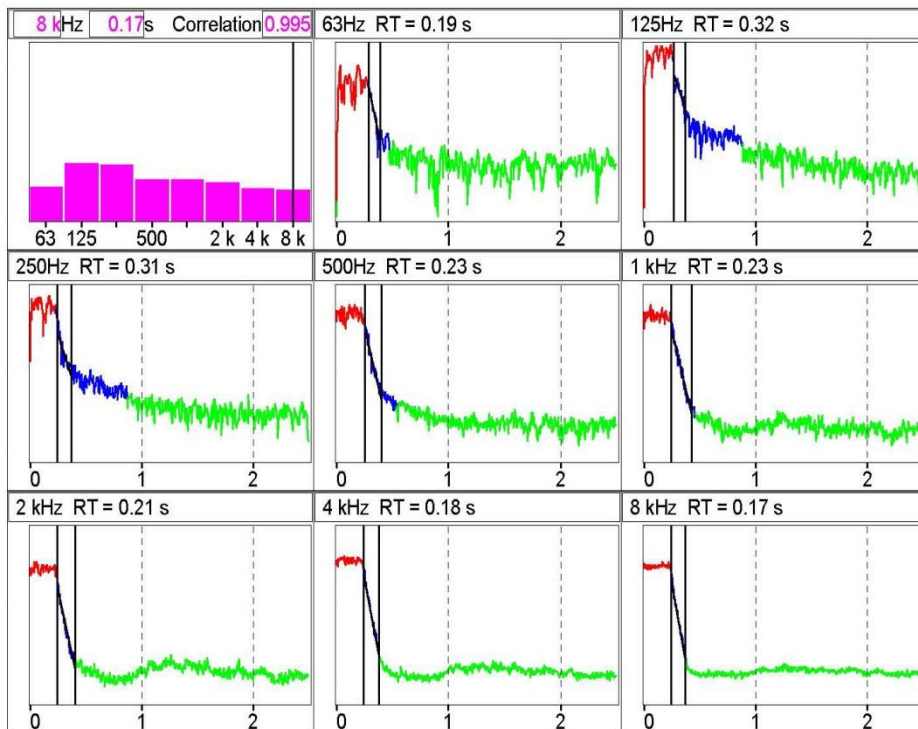
επενδύσεις, οι οποίες έχουν συντελεστή ηχοαπορρόφησης  $\sim 1$  (100%) για όλες τις συχνότητες μεταξύ 1 kHz – 8 kHz.

Το δάπεδο του θαλάμου, αν και είναι ανακλαστικό, δεν δημιουργεί πρόβλημα διότι ο ήχος μετά την ανάκλασή του σε αυτό προσπίπτει στις ηχοαπορροφητικές επενδύσεις των τοίχων ή/και της οροφής και ως εκ τούτου απορροφάται (βλ. κατωτέρω επεξηγηματικό σκαρίφημα).



Τέλος εκ των μετρήσεων του χρόνου αντίχησης ( $TR$ ), δεν διαπιστώθηκαν πρώιμες ανακλάσεις μεταξύ 1 kHz και 8 kHz. (βλ. ενδεικτικό διάγραμμα 1)

Επομένως η ζητούμενη από την παραγρ. 8.3.3.1 συνθήκη ικανοποιείται ήδη από τον αρχικό σχεδιασμό του θαλάμου.



Διάγραμμα 1

4.3 Ύστερη ενέργεια (Late energy) παραγρ. 8.3.3.2 του προτύπου ITU-R.B.S. 1116-1

Στην ανωτέρω παράγραφο διατυπώνεται η απαίτηση ότι είναι απαραίτητο να αποφεύγονται σημαντικές ανωμαλίες στο ηχητικό πεδίο, όπως π.χ. πολλαπλή ηχώ (flutter echoes) τονικοί χρωματισμοί (tonal colorations) κλπ.

Από τις επί τόπου χωρικές μετρήσεις αλλά και από την εξέταση των διαγραμμάτων του (TR) (μετρήσεις 7/5/2014, ενδεικτικά διάγραμμα 1) δεν διαπιστώνονται ανωμαλίες του ηχητικού πεδίου.

Ως εκ τούτου ικανοποιείται η απαίτηση της παραγράφου 8.3.3.2.

4.4 Αναλογίες δωματίου (Room Proportions) παραγρ. 8.3.3.2 του προτύπου ITU-R.B.S. 1116-1

Απαιτήσεις προδιαγραφών :

$$1.1w/h \leq l/s \leq 4.5w/h - 4 \quad (1)$$

Όπου :  $w$  = πλάτος (m),  $h$  = ύψος (m),  $l$  = μήκος (m)

Επίσης, πρέπει να ισχύουν οι συνθήκες :

$$l/h < 3 \quad \text{και} \quad w/h < 3$$

Οι διαστάσεις και αναλογίες του θαλάμου ΑΜΙ όπως κατασκευάστηκε είναι οι εξής :

$$w = 4.75 \text{ m}, \quad h = 2.90 \text{ m}, \quad l = 8.65 \text{ m}$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα του θαλάμου στην σχέση (1) προκύπτουν τα ακόλουθα :

$$\left( \frac{1.1 \times 4.75}{2.90} \right); \left( \frac{8.65}{2.90} \right); \left( \frac{4.5 \times 4.75}{2.90} - 4 \right) \rightarrow$$

**1.80 < 2.98 < 3.37**

Επίσης :

$$\frac{l}{h} = \frac{8.65}{2.90} = 2.98 < 3 \quad \text{και} \quad \frac{w}{h} = \frac{4.75}{2.90} = 1.63 < 3$$

Επομένως οι αναλογίες του θαλάμου, ικανοποιούν τις προδιαγραφές του προτύπου ITU – R.B.S. 1116 – 1

4.5 Μέσος χρόνος Αντήρησης  $T_m$  (sec) παραγρ. 8.3.3.2 του προτύπου ITU-R.B.S. 1116-1

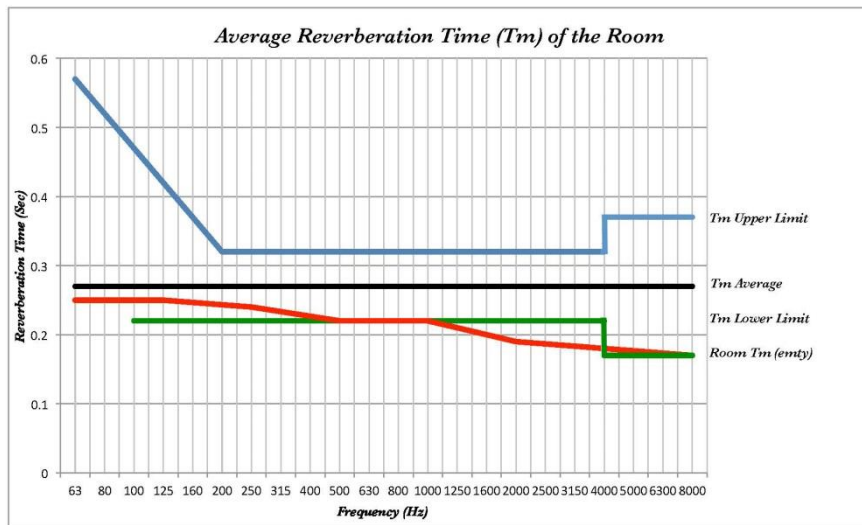
Ο μέσος Χρόνος Αντήρησης σύμφωνα με τις προδιαγραφές δίδεται από την σχέση :

$$T_m = 0.25 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Όπου :  $V$  = ο όγκος του θαλάμου =  $119 \text{ m}^3$ ,  $V_0$  = ο όγκος αναφοράς =  $100 \text{ m}^3$   
 Επομένως ο χρόνος αντήχησης του θαλάμου (κενού) πρέπει να είναι :

$$T_m = 0,25 \left( \frac{119}{100} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.265 \sim \mathbf{0.27 \text{ sec}}$$

Στο διάγραμμα 2 φαίνεται η καμπύλη του μέσου χρόνου αντήχησης ( $T_m$  sec) σε σχέση με τα όρια – τιμές ανοχής (Tolerance limits) που καθορίζονται από τις προδιαγραφές.



Διάγραμμα 2

Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης έγινε ανά οκτάβα. Εκ του διαγράμματος προκύπτει ότι ο επιτευχθείς μέσος χρόνος αντήχησης (χωρίς να έχουν τοποθετηθεί ακόμη έπιπλα κλπ. , τα οποία βελτιώνουν την διάχυση) ευρίσκεται εντός των ορίων των προδιαγραφών με μικρή απόκλιση  $0,03 \text{ sec}$  προς τα κάτω στη ζώνη των  $2000 \text{ Hz}$  (δηλ.  $0,19 \text{ sec}$  αντί  $0,22 \text{ sec}$ ).

Η ανωτέρω μικρή απόκλιση θα πρέπει να θεωρείται άνευ σημασίας για τους σκοπούς του θαλάμου.

#### 4.6. Ηχομόνωση ως προς αερόφερτους και κτυπογενείς ήχους

##### 4.6.1. Αερόφερτοι ήχοι από τον διάδρομο

Θέση εκπομπής (πηγής):

Στον κεντρικό διάδρομο του υπογείου δίπλα από τον θάλαμο, σε απόσταση  $1,5 \text{ m}$  από τον διαχωριστικό τοίχο.(σχ.1)

Θέση λήψης (μικροφώνου):

Στο εσωτερικό του θαλάμου σε ύψος  $1,2$  από το δάπεδο σε έξι θέσεις (σε απόσταση  $> 1,0 \text{ m}$  από τους τοίχους του θαλάμου)

A- ηχοστάθμη στον διάδρομο (εκπομπή) : 103,7 ~ 104 dB (A)  
A- χωρική μέση ηχοστάθμη στο εσωτερικό του θαλάμου (λήψη) : 28,5 ~ 28 dB (A)  
Διαφορά ηχοστάθμης – ηχοαπομόνωση : **D<sub>n</sub> ~ 75 dB**

#### 4.6.2. Κτυπογενείς ήχοι από τον διάδρομο

Θέση κτυπογενήτριας: Στον κεντρικό διάδρομο του υπογείου σε 1,0 m απόσταση από τον διαχωριστικό τοίχο θαλάμου-διαδρόμου (σχ.1)

Θέση ηχομέτρου: Όπως στο 6.1

Στάθμη κτυπογενούς ήχου μέσα στον θάλαμο : 18,8~ **19 dB (A)**

#### 4.6.3. Κτυπογενείς ήχοι από τον διάδρομο του 1<sup>ου</sup> ορόφου

Θέση κτυπογενήτριας: Στον κεντρικό διάδρομο του ισογείου επάνω από το θάλαμο σε απόσταση 1,0 m από τον διαχωριστικό τοίχο με τα γραφεία που βρίσκονται επάνω από τον θάλαμο. (θέση αντίστοιχη με αυτήν του υπογείου)

Θέση ηχομέτρου: Όπως στο 4.5.1

Στάθμη κτυπογενούς ήχου μέσα στον θάλαμο: 17,9 ~ **18 dB (A)** <sup>(2)</sup>

*Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι με βάση σχετικές μελέτες η στάθμη θορύβου των βημάτων είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την στάθμη που παράγεται από την πρότυπη κτυπογενήτρια. Εκ των ανωτέρω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η ηχομόνωση μεταξύ θαλάμου και παρακειμένων ή υπερκειμένων χώρων είναι ιδιαίτερα υψηλή, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του θαλάμου, παράλληλα με την λειτουργία του υπολοίπου κτιρίου, ακόμη και στην περίπτωση που οι παραγόμενοι θόρυβοι στους υπόλοιπους χώρους είναι πολύ υψηλοί.*

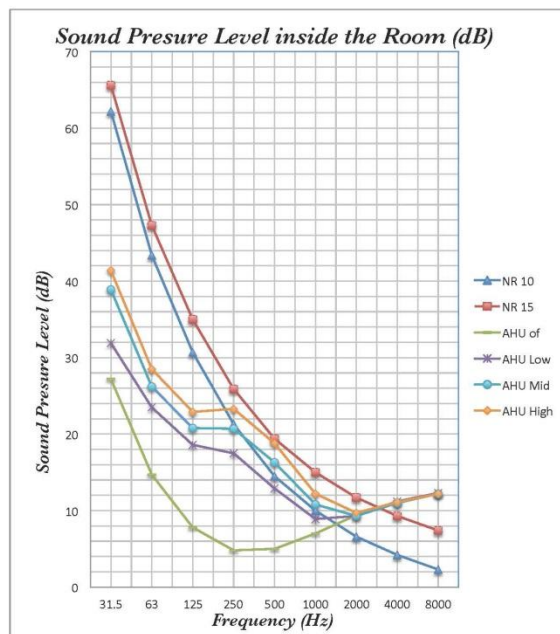
#### 4.6.4. Στάθμη ηχητικής πίεσης θορύβου SPL (dB) περιβάλλοντος (B.G. Noise)

Απαιτήσεις προδιαγραφών : NR 10 (επιθυμητή)  
NR 15 (μέγιστη)

Στο διάγραμμα 3 φαίνονται οι καμπύλες NR 10 (επιθυμητή) και NR 15 (μέγιστη) καθώς και οι καμπύλες θορύβου στο εσωτερικό του θαλάμου όπως προέκυψαν από τις επιτόπιες μετρήσεις.

---

<sup>(2)</sup> Η κατώτερη στάθμη θορύβου που μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια με το ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι 20dB



Διάγραμμα 3

Από τις μετρήσεις εκτιμάται ότι η αυστηρή προδιαγραφή (NR 10) καλύπτεται πλήρως όταν ο κλιματισμός είναι κλειστός καθώς και όταν λειτουργεί στην χαμηλή ταχύτητα.

Εν τούτοις, λόγω της πολύ χαμηλής στάθμης θορύβου που επικρατούσε μέσα στον θάλαμο, οι μετρήσεις δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες, κυρίως στις υψηλότερες συχνотικές ζώνες. (Ο χαμηλός θόρυβος που εμφανίζεται στις υψηλές συχνότητες θα πρέπει να θεωρείται ως εσωτερικός ηλεκτρικός θόρυβος του ηχομέτρου).

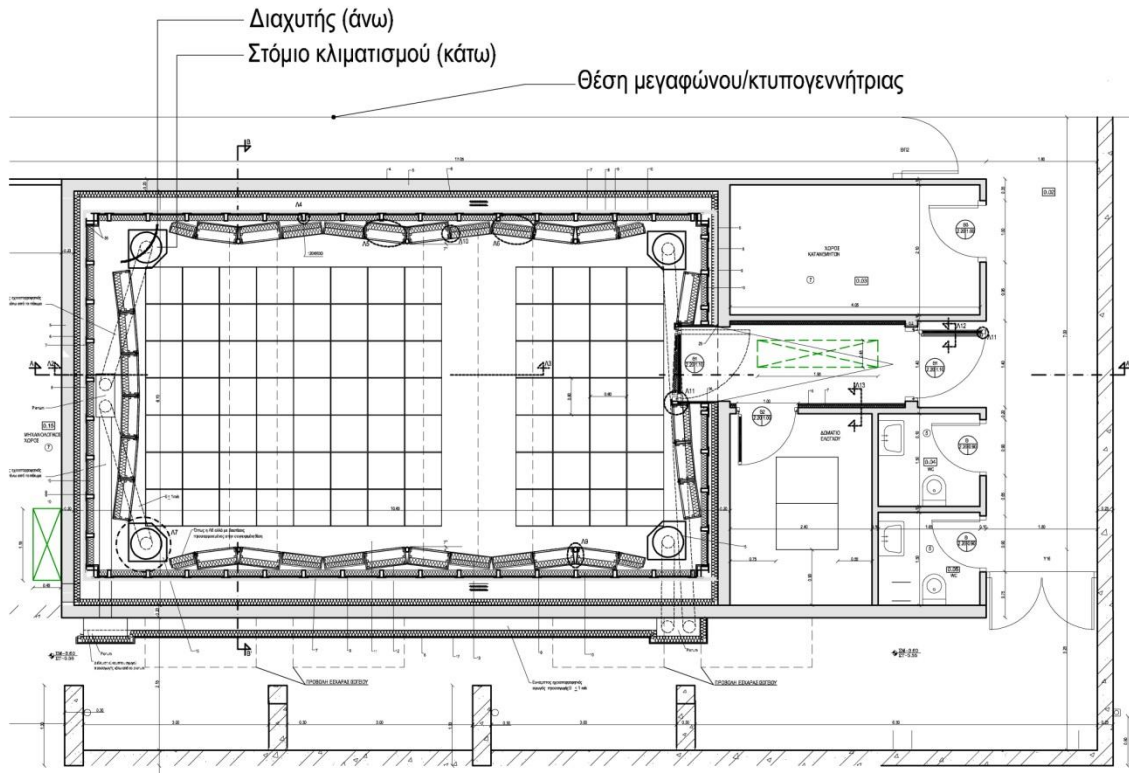
Ως εκ τούτου η ανωτέρω μέτρηση πρέπει να επαναληφθεί με καταλληλότερο ηχόμετρο και αφού ολοκληρωθούν οι σφραγίσεις των θυρών και των οπών διέλευσης των αγωγών κλιματισμού.

Τέλος, ο θόρυβος που παράγεται κατά την λειτουργία του κλιματισμού στην μέση και υψηλή ταχύτητα ικανοποιεί την προδιαγραφή NR 15.

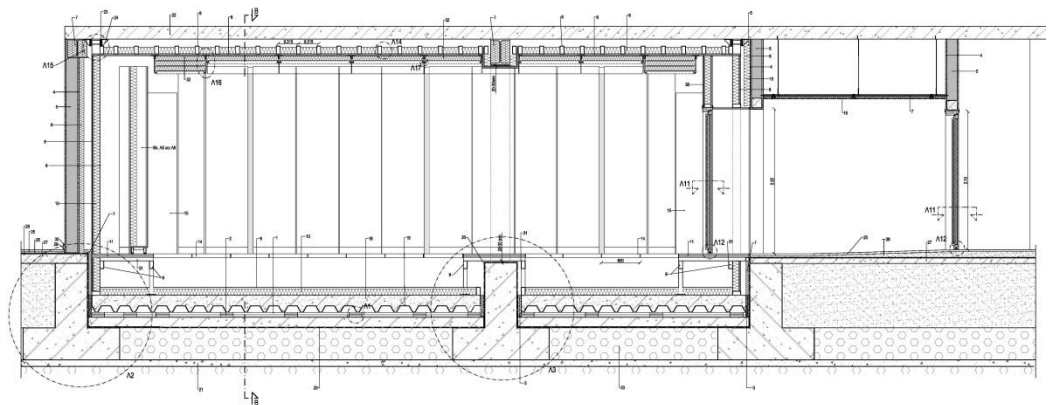
## 5. Συμπεράσματα

Εκ των ηχομετρήσεων διαπιστώθηκε ότι ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της παραγρ. 8.3.3.2 του προτύπου ITU-R.B.S. 1116-1.

Κατά την ημέρα των ηχομετρήσεων, διαπιστώθηκε ότι δεν είχαν ολοκληρωθεί οι εργασίες πλήρους σφράγισης των θυρών καθώς και των οπών διέλευσης από τα τοιχώματα του θαλάμου των εύκαμπτων αγωγών κλιματισμού. Ως εκ τούτου, προτείνεται η επανάληψη των ηχομετρήσεων στάθμης θορύβου βόθου (B.G noise) και θορύβου που παράγεται κατά την λειτουργία των εγκαταστάσεων κλιματισμού. Κατά τις νέες ηχομετρήσεις θα χρησιμοποιηθεί ηχόμετρο υψηλότερης ευαισθησίας από αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρούσα φάση.



Σχήμα 1 κάτωψη



Σχήμα 1. Κατά μήκος τομή



*Ο θάλαμος κατά την κατασκευή*



*Ο θάλαμος κατά τις ηχομετρήσεις*

## **6. Ευχαριστίες**

Ευχαριστίες εκφράζονται προς τους καθηγ. κ. Κων. Στεφανίδη Δ/τη του Ι.Π. του ΙΤΕ, ε. καθηγ.Επιστήμης Υπολογιστών Αθ. Μουχτάρη, την Τεχν.Υπηρ. του ΙΤΕ, (κ. Ε. Χαρκουτσάκης, Μ-Η, κ. Ν. Καλαϊτζάκης Α-Μ, κ. Ν. Καλοχριστιανάκης Π-Μ ) καθώς και προς την κ<sup>α</sup> Θ. Μπίτζου Α-Μ από το Γραφ. Δημοσιότητας, για την πολύτιμη συνεργασία και βοήθεια κατά την μελέτη και κατασκευή του παρόντος έργου.

## **7. Αναφορές**

- [1] [www.forth.gr/index\\_main.php?c=1&l=g](http://www.forth.gr/index_main.php?c=1&l=g) (30/8/2014)
- [2] A.Jarvinen, L.Savioja, H. Moller, V. Ikonen and A.Ruusuvuori “ Design of a Reference Listening Room – a Case Study” AES 103<sup>rd</sup> Convention 26-29/9/1997 N.Y.
- [3] ITU-RBS.1116-1 “Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems” (question ITU-R 85/10)
- [4] P.H. Parkin, H.R. Humphreys and J.R. Cowell, Acoustic, Noise and Buildings Faber and Faber, 4<sup>th</sup> edition.
- [5] Jean Pujolle, “La Pratique del’isolation acoustique des batiments” – Moniteur 1978

# **Μοντέλο αξιολόγησης αντιθορυβικών μέτρων**

Βασίλης Βασιλειάδης

Εργαστήριο Αρχιτεκτονικής Τεχνολογίας, Τμήμα Αρχιτεκτόνων, Α.Π.Θ.

[vvasil@arch.auth.gr](mailto:vvasil@arch.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Σήμερα ο περιβαλλοντικός θόρυβος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης της ποιότητας ζωής τόσο στην Ελλάδα όσο και σε όλη την Ευρώπη. Οι επιπτώσεις του περιβαλλοντικού θορύβου στον άνθρωπο είναι σημαντικές. Εξαρτώνται τόσο από την ένταση όσο και από τη διάρκεια έκθεσης του ανθρώπου στον θόρυβο.*

*Η αντιμετώπιση λοιπόν του περιβαλλοντικού θορύβου πρέπει να αποτελεί έναν από τους πρωταρχικούς στόχους κάθε πολιτισμένου κράτους που σέβεται τους πολίτες του. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο το γεγονός ότι ένας από τους σημαντικότερους δείκτες αξιολόγησης του πολιτισμικού επιπέδου μιας χώρας είναι τα επίπεδα θορύβου που παράγουν οι πολίτες του.*

*Ωστόσο η αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού θορύβου αποδεικνύεται ως μια δύσκολη και σύνθετη υπόθεση.*

*Σήμερα όταν μιλάμε για περιβαλλοντικό θόρυβο αναφερόμαστε κυρίως στον κυκλοφοριακό θόρυβο καθώς αυτός αποτελεί την κύρια και βασική πηγή θορύβου τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες. Τα ποσοστά πληθυσμού των αστικών κέντρων που νιώθουν πλέον έντονη ενόχληση από τις στάθμες του περιβαλλοντικού θορύβου είναι ιδιαίτερα αυξημένα όπως έδειξε και πρόσφατη σχετική έρευνα για την πόλη της Θεσσαλονίκης.*

*Το συμπέρασμα αυτής της διαπίστωσης είναι η σημαντική ανάγκη ανάληψης δράσεων για την αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού θορύβου. Ωστόσο σε μια δύσκολη οικονομικά εποχή πρέπει να εκτιμηθεί το κόστος αυτών των δράσεων σε συνάρτηση με τα οφέλη που προκύπτουν από αυτές. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο με τη βοήθεια χρήσιμων εργαλείων αξιολόγησης των αντιθορυβικών μέτρων όπως ενός μοντέλου κόστους οφέλους.*

*Η ανάπτυξη ενός μοντέλου κόστους οφέλους για έργα αντιμετώπισης θορύβου αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για κάθε μελετητή και αρμόδιο φορέα. Με το εργαλείο αυτό η αρμόδια αρχή θα μπορεί να αξιολογήσει το προτεινόμενο έργο αντιμετώπισης θορύβου και να προχωρήσει στην υλοποίηση ή στην απόρριψη του.*

*Ο θόρυβος λοιπόν ο οποίος γίνεται αντιληπτός σαν μια σοβαρή ενόχληση έχει σημαντικές συνέπειες τόσο σε ατομικό επίπεδο όσο και στο κοινωνικό σύνολο. Αυτές οι συνέπειες δημιουργούν επίσης ένα οικονομικό κόστος. Η αποτίμηση - ποσοτικοποίηση αυτού του οικονομικού κόστους έχει σημαντικά οφέλη. Έτσι για παράδειγμα σε μια μελέτη κόστους οφέλους σχετική με μέτρα αντιμετώπισης θορύβου είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οικονομικές επιπτώσεις της ενόχλησης και των επιδράσεων στην υγεία πριν και μετά την εφαρμογή των μέτρων.*



## ***Economic Acceptability of Noise Abatement Measures***

### **ABSTRACT**

*In the middle of the greatest Economic Crisis in the European Zone and especially in Greece, the noise problems are considered by most as luxury problems. But this point of view may be wrong. A large number of Monetization studies show us that high Noise levels costs a lot of money.*

*With a very low budget for environmental issues however it is very important to know the economic acceptability of every noise abatement measure ore project, as early as possible. For this purpose we started to address the complex task to create a model which will help estimate the economic acceptability and appropriateness of noise abatement measures.*

*The noise and annoyance data used for modeling the economic acceptability of noise abatement measures have been accumulated during the realization of noise abatement projects and studies on noise exposure and noise annoyance in Thessaloniki, Greece.*

### **1. Βασικές αρχές μοντέλου κόστους οφέλους για επεμβάσεις αντιμετώπισης θορύβου**

Ένα μοντέλο Κόστους-Οφέλους είναι ένα εργαλείο οικονομικής εκτίμησης που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αναμενόμενων οφελών από προτεινόμενα Έργα. Όσο περισσότερο τα οφέλη υπερβαίνουν το κόστος, τόσο περισσότερο θα ωφεληθούν οι τελικοί χρήστες (η κοινωνία) από τη δραστηριότητα του Έργου ή από τη σχετική απόφαση πολιτικής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όπου αυτό είναι δυνατόν, η Ανάλυση Κόστους-Οφέλους θα πρέπει να πραγματοποιείται από εθνική σκοπιά και όχι από κρατική ή υπηρεσιακή σκοπιά.

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V της Οδηγίας 2002/49/EK περί Στοιχειωδών Απαιτήσεων για τα Σχέδια Δράσης αναφέρεται πως τα Σχέδια Δράσης πρέπει να περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τα ακόλουθα στοιχεία:

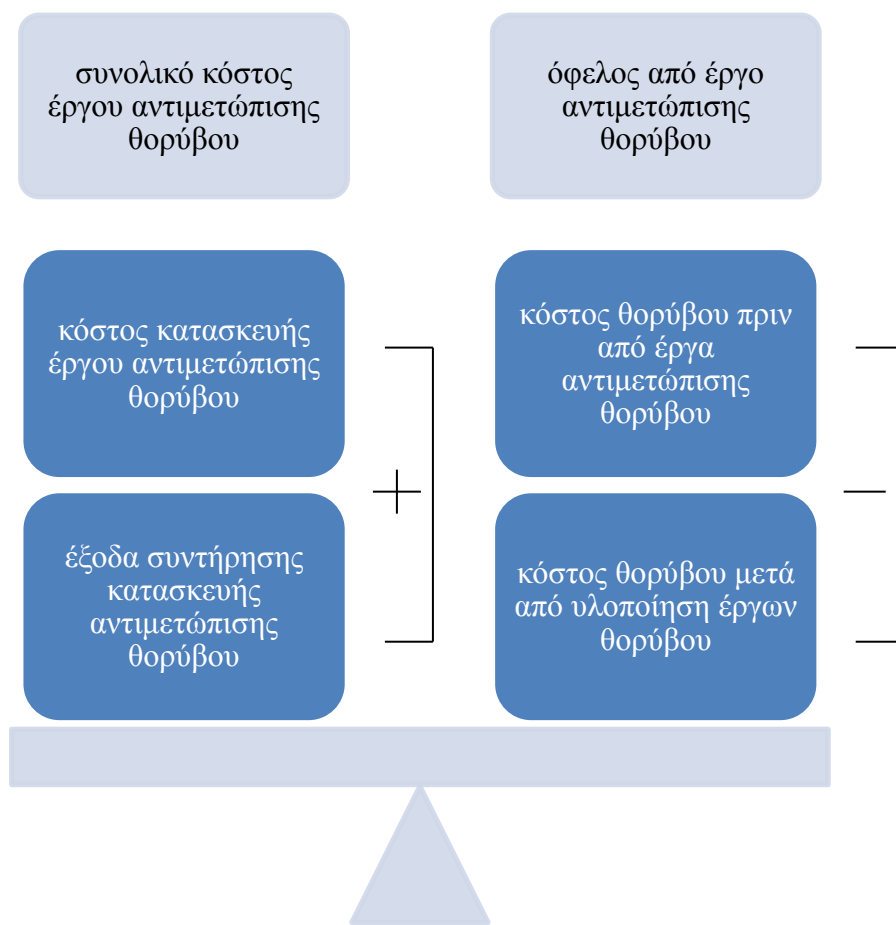
— χρηματοοικονομικές πληροφορίες (εφόσον υπάρχουν): προϋπολογισμοί, αξιολόγηση κόστους/απόδοσης, αξιολόγηση κόστους/ωφελείας,

Ωστόσο και πέρα από τη σύσταση της Οδηγίας είναι προφανές πως ένα μοντέλο κόστους οφέλους για έργα αντιμετώπισης θορύβου θα αποτελούσε ένα χρήσιμο εργαλείο για κάθε μελετητή και αρμόδιο φορέα. Με το εργαλείο αυτό θα είναι σε θέση ο μελετητής να αξιολογήσει το προτεινόμενο έργο αντιμετώπισης θορύβου να το συγκρίνει με άλλα αντίστοιχα έργα και να αποφασίσει αν τελικά θα πρέπει να υλοποιηθεί το συγκεκριμένο έργο.

Οι παράγοντες που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου είναι οι παρακάτω:

- κόστος του έργου αντιμετώπισης θορύβου
- έξοδα συντήρησης της εγκατάστασης αντιμετώπισης θορύβου (αν απαιτείται)
- κόστος που προκαλεί ο θόρυβος στον εκτιθέμενο πληθυσμό πριν από τα έργα αντιμετώπισης θορύβου
- χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης πριν από τα έργα αντιμετώπισης θορύβου (DALYs)

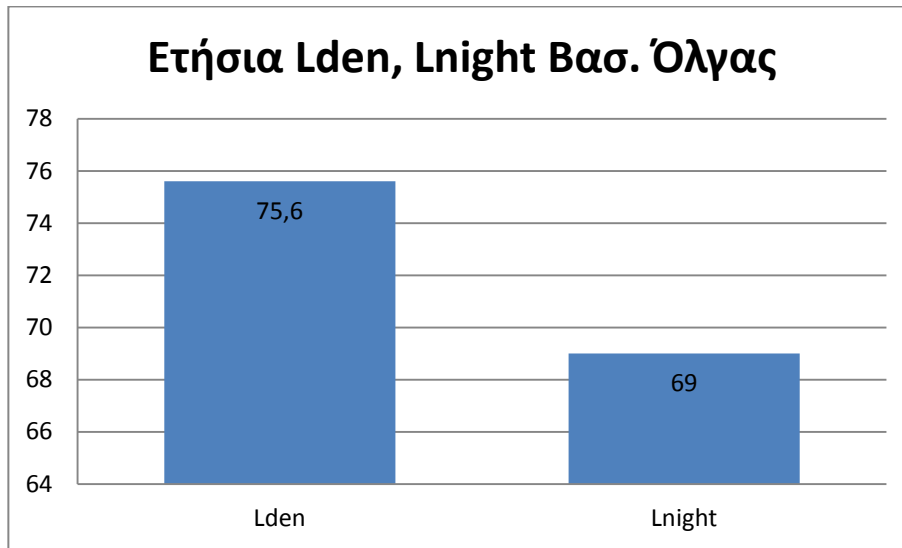
- εκτιθέμενος πληθυσμός σε ζώνες θορύβου πριν από τα έργα αντιμετώπισης θορύβου
- κόστος που προκαλεί ο θόρυβος στον εκτιθέμενο πληθυσμό μετά την υλοποίηση των έργων αντιμετώπισης θορύβου
- χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης μετά από την υλοποίηση των έργων αντιμετώπισης θορύβου (DALYs)
- εκτιθέμενος πληθυσμός σε ζώνες θορύβου μετά από την υλοποίηση των έργων αντιμετώπισης θορύβου



Σχήμα 1 Μοντέλο κόστους οφέλους για επεμβάσεις αντιμετώπισης θορύβου

## 2. Εφαρμογή μοντέλου κόστους οφέλους για την αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού θορύβου στη Θεσσαλονίκη

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μακροχρόνιας παρακολούθησης θορύβου στη Θεσσαλονίκη η περιοχή της Βασ. Όλγας είναι μακράν η περισσότερο επιβαρυνόμενη περιοχή από τον κυκλοφοριακό θόρυβο.



Σχήμα 2. Ετήσια Lden, Lnight περιοχής Βασ. Όλγας

Είναι σημαντικά πάνω από τα όρια που θέτουν οι περισσότεροι μελετητές οι οποίοι έχουν συνδέσει την έκθεση στο περιβαλλοντικό θόρυβο με τις επιπτώσεις στην υγεία προτείνοντας τις παρακάτω οριακές τιμές για αποφυγή όλων των επικίνδυνων επιδράσεων

πίνακας 1 όρια δεικτών Lden Lnight για αποφυγή επιδράσεων στην υγεία

	Lden	Lnight
Για αποφυγή όλων των επικινδύνων επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία	65dB(A)	55dB(A)

### 2.1. Κόστος εφαρμογής ηχομειωτικού ασφαλοτάπητα LOA5D στη Βασ. Όλγας

Το τμήμα που επιλέγει για την εφαρμογή είναι από το ύψος της Εθνικής Αντιστάσεως όπου γίνεται μονόδρομος και εισέρχεται σε πυκνή δόμηση μέχρι το σημείο της Λεωφόρου Βασιλέως Γεωργίου όπου φτάνει την κάθετη οδό Καντατζόγλου και πλησιάζει την πλατεία ΧΑΝΘ .

Το τμήμα που περιγράφεται παραπάνω έχει μήκος 4,5 km.

Ο μέσος χρόνος ζωής του ασφαλοτάπητα στην Λεωφόρο Βασιλίσσης Όλγας σύμφωνα με την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Θεσσαλονίκης είναι 5 χρόνια. Την

ίδια διάρκεια ζωής, ίσως και λίγο παραπάνω, παρουσιάζει και ο ακουστικά βελτιστοποιημένος ασφαλτοτάπητας LOA5D. (ακουστικά βελτιστοποιημένες ασφαλικές επιστρώσεις μεγάλης πυκνότητας - εφαρμόζονται σε αστικές περιοχές όπου έχουμε χαμηλές ταχύτητες οχημάτων)

Το κόστος του συμβατικού ασφαλτοτάπητα για το επιλεγμένο τμήμα ανέρχεται στο ποσό των 2.340.000€. Ο ακουστικά βελτιστοποιημένος ασφαλτοτάπητας LOA5D κοστίζει στη Γερμανία 10% παραπάνω από το συμβατικό. Λόγω της σχετικής απειρίας των ντόπιων εργολάβων πάνω στη κατασκευή του ειδικού αυτού ασφαλτοτάπητα και της απαραίτητης μεταφοράς της σχετικής τεχνογνωσίας η προσαύξηση που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο θα είναι της τάξης του 20%.

Δηλ. το επιπλέον κόστος λόγω τοποθέτησης του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλτοτάπητα LOA 5 D αντί του συμβατικού ανέρχεται στο ποσό των 468.000€.

Με μια αναγωγή για κόστος ανά έτος έχουμε **93.600€/έτος**

## 2.2. Όφελος από την εφαρμογή ασφαλτοτάπητα LOA 5 D με εφαρμογή μεθοδολογίας DALYs

Το όφελος θα υπολογιστεί με τη μέθοδο της απώλειας υγιών χρόνων διαβίωσης. Δηλ. θα υπολογιστούν πρώτα τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης (DALYs) με την υπάρχουσα κατάσταση (συμβατικός ασφαλτοτάπητας) και στη συνέχεια θα υπολογιστούν τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης στην περίπτωση εφαρμογής του ασφαλτοτάπητα LOA 5 D. Η διαφορά που θα προκύψει θα είναι το όφελος από την εφαρμογή του βελτιστοποιημένου ακουστικά ασφαλτοτάπητα.

Η προσέγγιση είναι όσο το δυνατό πιο συντηρητική έτσι ώστε να υπολογιστεί μόνο το ελάχιστο όφελος το οποίο θα προέκυπτε με το σενάριο εφαρμογής του ασφαλτοτάπητα LOA5D.

Σύμφωνα με υπολογισμούς ο πληθυσμός επί του τμήματος της οδικής αρτηρίας όπου θα εφαρμοστεί ο ασφαλτοτάπητας LOA5D ανέρχεται στις 12.000 .

Στη πόλη του Düsseldorf τοποθετήθηκε ο ασφαλτοτάπητας LOA5D στις περισσότερες οδικές αρτηρίες της πόλης με εντυπωσιακά αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν τα παρακάτω

- μείωση του παραγόμενου θορύβου από το ρολάρισμα του ελαστικού η οποία κυμαίνεται σύμφωνα με τις μετρήσεις Close-Proximity Methode (CPX-Methode) μεταξύ 3-9dB(A) ανάλογα με τον τύπο οχήματος και κυρίως τον τύπο ελαστικού για τα αυτοκίνητα ΙΧ.
- αντίστοιχη μείωση για τα ελαστικά βαρέων οχημάτων (φορτηγά λεωφορεία) μεταξύ 1-2dB(A).
- μείωση του οδικού κυκλοφοριακού θορύβου σε αρτηρίες με χαμηλά ποσοστά βαρέων οχημάτων (5%) κατά 4,5 - 5,5dB(A).
- η απόδοση του ασφαλτοτάπητα σε ότι αφορά την ηχομείωση σύμφωνα με μετρήσεις δεν μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου

Για λόγους ασφαλείας καθώς πρόκειται για πιλοτική εφαρμογή στη χώρα μας και ενδέχεται η τοποθέτηση να μην είναι η βέλτιστη δυνατή, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα του ηχομειωτικού ασφαλτοτάπητα στο μοντέλο μας θα κάνουμε τους υπολογισμούς για μείωση του κυκλοφοριακού θορύβου κατά 3dB(A) μόνο.

Πίνακας 2. Υπολογισμός DALYs λόγω ενόχλησης από κυκλοφοριακό θόρυβο

$L_{den}$ dB(A)	πληθυσμός εκτεθειμένος	ποσοστό ιδιαίτερα ενοχλημένων (highly annoyed)	αριθμός περιπτώσεων	DALYs lost DW = 0.02
75	12.000	37	4440	89
72	12.000	29	3480	70
διαφορά				19

Στο παραπάνω πίνακα υπολογίζουμε τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης πριν και μετά την εφαρμογή του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλοτάπητα LOA5D λόγω της γενικής ενόχλησης από τον κυκλοφοριακό θόρυβο σύμφωνα με τη μεθοδολογία της WHO. Η διαφορά που προκύπτει είναι ουσιαστικά το όφελος που έχουμε από την αντιθορυβική εφαρμογή μας. Στη περίπτωση λοιπόν της γενικής ενόχλησης από τον κυκλοφοριακό θόρυβο αυτό το όφελος είναι 19 έτη υγιούς διαβίωσης τα οποία παύουν να χάνονται κάθε χρόνο.

Πίνακας 3. Υπολογισμός DALYs λόγω διαταραχής ύπνου από κυκλοφοριακό θόρυβο

$L_{night}$ dB(A)	πληθυσμός εκτεθειμένος	highly sleep disturbed	αριθμός περιπτώσεων	DALYs lost DW = 0.07
69	12.000	19	2280	160
66	12.000	16	1920	134
διαφορά				26

Στο παραπάνω πίνακα υπολογίζουμε τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης πριν και μετά την εφαρμογή του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλοτάπητα LOA5D λόγω της διαταραχής ύπνου από τον κυκλοφοριακό θόρυβο σύμφωνα με τη μεθοδολογία της WHO. Η διαφορά που προκύπτει είναι ουσιαστικά το όφελος που έχουμε από την αντιθορυβική εφαρμογή μας. Στη περίπτωση λοιπόν της διαταραχής ύπνου από τον κυκλοφοριακό θόρυβο αυτό το όφελος είναι 26 έτη υγιούς διαβίωσης τα οποία παύουν να χάνονται κάθε χρόνο.

Πίνακας 4. Υπολογισμός DALYs λόγω γνωστικής ανεπάρκειας σε μαθητές από κυκλοφοριακό θόρυβο

$L_{den}$ dB(A)	μαθητικός πληθυσμός εκτεθειμένος	ποσοστό μαθητών που θα εμφανίσουν NICI	πλήθος μαθητών με NICI	DALYs lost for NICI
75	1.800	75%	1350	8
72	1.800	50%	900	5
διαφορά				3

Στο παραπάνω πίνακα υπολογίζουμε τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης πριν και μετά την εφαρμογή του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλοτάπητα LOA5D λόγω της γνωστικής ανεπάρκειας των μαθητών από τον κυκλοφοριακό θόρυβο σύμφωνα με τη μεθοδολογία της WHO. Η διαφορά που προκύπτει είναι ουσιαστικά το όφελος που έχουμε από την αντιθρομβική εφαρμογή μας. Στη περίπτωση λοιπόν της γνωστικής ανεπάρκειας των μαθητών από τον κυκλοφοριακό θόρυβο αυτό το όφελος είναι 3 έτη υγιούς διαβίωσης τα οποία παύουν να χάνονται κάθε χρόνο.

Πίνακας 5. Υπολογισμός DALYs λόγω καρδιοαγγειακών νοσημάτων από κυκλοφοριακό θόρυβο

$L_{den}$ dB(A)	πληθυσμός εκτεθειμένος	relative risk of myocardial infarction (source : Babish)	DALYs
75	12.000	1,302	43
72	12.000	1,161	28
διαφορά			15

Τα χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης λόγω εμφράγματος του μυοκαρδίου που προκλήθηκε από την έκθεση σε κυκλοφοριακό θόρυβο είναι 43 για τους κατοίκους της υπό διερεύνηση περιοχής επί της οδικής αρτηρίας ανά έτος πριν την αντιθρομβική εφαρμογή και 28 μετά την εφαρμογή.

Πίνακας 6. Συνολικά χαμένα έτη υγιούς διαβίωσης (DALYs) που κερδίζονται

$L_{den}$ dB(A)	DALYs λόγω γενικής ενόχλησης	DALYs λόγω διαταραχής ύπνου	DALYs λόγω γνωστικής ανεπάρκειας	DALYs λόγω εμφραγμάτων μυοκαρδίου	total
75	89	160	8	43	300
72	70	134	5	28	237
διαφορά	19	26	3	15	63

Από τον παρακάτω πίνακα προκύπτει πως το όφελος από την εφαρμογή του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλοτάπητα LOA5D σύμφωνα με τη μεθοδολογία DALYs για την περιοχή του οδικού άξονα Εθνικής Αντιστάσεως - Λεωφόρος Βασιλίσσης Όλγας - Λεωφόρος Βασιλέως Γεωργίου θα είναι 63 έτη υγιούς διαβίωσης ανά χρόνο τα οποία δεν θα χάνονται πλέον ή πιο απλά θα κερδηθούν.

Το όφελος από την εφαρμογή του ακουστικά βελτιστοποιημένου ασφαλοτάπητα LOA5D σύμφωνα με τη μεθοδολογία DALYs είναι 63 έτη απώλειας υγιούς διαβίωσης λόγω ύπαρξης σοβαρού προβλήματος υγείας ή απώλειας ζωής λόγω πρόωρου θανάτου τα οποία εκλείπουν ανά έτος.

Σε ότι αφορά την κοστολόγηση ενός DALY τα αποτελέσματα των ερευνών διαφοροποιούνται σημαντικά. Έτσι ο Schmid κοστολογεί ένα DALY με 96.000€, ο Bickel στο Unite Project με 80.000€ ενώ ο Brent μόνο με 10.000€. Όπως αναφέρθηκε ήδη η προσέγγιση που επιχειρείται είναι η πιο συντηρητική έτσι ώστε σε καμία περίπτωση να μην υπερεκτιμηθεί το όφελος που θα προκύψει. Για τον λόγο αυτό επιλέγουμε την χαμηλότερη τιμή των 10.000€ ανά DALY.

Άρα το όφελος σε € είναι  $63 \times 10.000 = 630.000\text{€} / \text{έτος}$

Η σχέση κόστους οφέλους μας δείχνει πως το όφελος είναι πολλαπλάσιο (6 φορές) του κόστους καθιστώντας τη συγκεκριμένη αντιθρομβική εφαρμογή αποδοτική και συμφέρουσα.

αποδοτικότητα =  $\text{όφελος εφαρμογής ανά έτος} / \text{κόστος εφαρμογής ανά έτος}$

### 3. Αναφορές

- [1] Bundesamt fuer Umwelt Wald und Landschaft BUWAL, Wirtschaftliche Tragbarkeit und Verhaeltnismaessigkeit von Laermschutzmassnahmen, Schweiz 1998
- [2] M Vainio, G Paque, Highlights of the workshop on the State of the art in noise valuation, Brussels, July 2002
- [3] Stale Navrud, The State of the Art on Economic Valuation of Noise, Final Report to Euro-pean Commission DG Environment April 2002
- [4] Mueller Wenk, Attribution to road traffic of the impact of noise on health, Swiss Agency for Environment, 2002
- [5] Bateman I., The valuation of Transport related Noise in Birmingham (2004)
- [6] Sommer H., Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz, Berne, Switzerland, 2008
- [7] WHO, Burden of disease from environmental noise, Quantification of healthy life years lost in Europe, 2011
- [8] Vasilis Vasiliadis and Emmanuel Tzekakis “Modelling the financial Aspects of Transportation Noise”, Proceedings of the 18th International Congress on Sound and Vibration, Rio de Janeiro, (2011).

# ***Ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων για την κατασκευή E-Soundmaps: Η επίδραση της συμπίεσης στην πολυπλοκότητα του ηχητικού σήματος***

Στέλιος Ποτηράκης<sup>1,a</sup>, Νικ.-Αλεξ. Τάτλας<sup>1,b</sup>, Στέλιος Μυτιληναίος<sup>1,c</sup> & Μαρία Ραγκούση<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Ηλεκτρονικών Μηχ. ΤΕ, ΤΕΙ Πειραιά, Θηβών 250, Αιγάλεω

<sup>a</sup> [spoti@teipir.gr](mailto:spoti@teipir.gr), <sup>b</sup> [ntatlas@teipir.gr](mailto:ntatlas@teipir.gr), <sup>c</sup> [smitil@teipir.gr](mailto:smitil@teipir.gr), <sup>d</sup> [maria@teipir.gr](mailto:maria@teipir.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Με δεδομένο ότι, λόγω του μεγάλου όγκου διακινούμενων δεδομένων, σε ένα ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων είναι αναγκαία κάποιας μορφής συμπίεση του ήχου στο επίπεδο του ασύρματου κόμβου-αισθητήρα, η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με την επίδραση της συμπίεσης στην πολυπλοκότητα του ηχητικού σήματος, μιας και η πολυπλοκότητα είναι ένα από τα χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική ταξινόμησή του. Διάφορα μέτρα εντροπίας / πληροφορίας υπολογίζονται τόσο επί του αρχικού ηχητικού σήματος, όσο και επί του ηχητικού σήματος που πρώτα είχε υποστεί ένα κύκλο συμπίεσης-αποσυμπίεσης με τη χρήση τεσσάρων ευρέως χρησιμοποιούμενων αλγόριθμων συμπίεσης ήχου, οδηγώντας σε μια συγκριτική μελέτη της επίδρασης της συμπίεσης στην πολυπλοκότητα του ηχητικού σήματος.*

## ***Wireless acoustic sensor network for the construction of E-Soundmaps: The effect of compression on the complexity of the sound signal***

### **ABSTRACT**

*Due to the large volume of transmitted data, some kind of compression is necessary at node-sensor level in a wireless acoustic sensors network; therefore the specific work deals with the effect of the compression on the complexity characteristics of the audio signal, since complexity is one of the characteristics of the audio signal that can be used for its efficient classification. A number of measures of entropy / information are calculated both on the original audio signal, and on the audio signal that had first undergone a cycle of compression-decompression employing four widely audio compression algorithms, leading to a comparative study of the effect of compression on the complexity of the audio signal.*



## Εισαγωγή

Το ερευνητικό έργο E-Soundmaps αφορά την ανάπτυξη ενός καταναμημένου μικροηλεκτρονικού συστήματος περιβαλλοντικής επίβλεψης με έμφαση στην ηχητική χαρτογράφηση. Οι δραστηριότητες που περιλαμβάνονται στο συγκεκριμένο έργο εκτείνονται από τη σχεδίαση του υλικού και του ενσωματωμένου λογισμικού που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου ακουστικών αισθητήρων, μέχρι την ιεραρχική ταξινόμηση των ανιχνευόμενων ήχων και την αντίστοιχη περιοδική αποτύπωση της ηχητικής κατάστασης του περιβάλλοντος σε ηλεκτρονικούς χάρτες [1-4].

Σε ένα ασύρματο δίκτυο ακουστικών αισθητήρων, όσο αυξάνεται ο αριθμός των αισθητήρων-κόμβων και ο αριθμός των ηχητικών γεγονότων, τόσο αυξάνεται και το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων στον κεντρικό εξυπηρετητή επεξεργασίας [3,4]. Στο πλαίσιο του έργου E-Soundmaps, μια, βασισμένη σε προσομοίωση, μελέτη επί της ευστάθειας ενός τέτοιου δικτύου σε σχέση με τον ενεργό χρόνο ηχογράφησης και το φόρτο εισόδου ανά κόμβο για διαφορετικούς πιθανούς λόγους συμπίεσης αποκάλυψε ότι κάποιου είδους συμπίεση των ήχων πρέπει να προηγείται της εκπομπής των δεδομένων από τον κόμβο προκειμένου ένα ρεαλιστικό τέτοιο δίκτυο να είναι ευσταθές [3,4]. Μιας και το τελικό αποτέλεσμα του E-Soundmaps θα είναι η ταξινόμηση των ηχογραφημένων ήχων και η δημιουργία περιοδικά ανανεωνόμενων ηχοχαρτών [1], η επίδραση της συμπίεσης σε χαρακτηριστικά του σήματος που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά το βήμα της ταξινόμησης θα έπρεπε να διερευνηθεί. Με κίνητρο αυτή την ανάγκη, η παρούσα εργασία εστιάζει στα χαρακτηριστικά πολυπλοκότητας του ήχου, μιας και η πολυπλοκότητα είναι ένα από τα χαρακτηριστικά του ηχητικού σήματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική ταξινόμησή του.

Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση της συμπίεσης δεδομένων ήχου επί της ακρίβειας του εντροπικού / πληροφορικού περιεχομένου του ήχου όπως αυτό προσδιορίζεται ποσοτικά με τη βοήθεια διαφορετικών μέτρων πολυπλοκότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η χρήση συμπίεσης στο επίπεδο κόμβου-αισθητήρα χωρίς ουσιαστική αλλοίωση της ποσοτικής έκφρασης της πολυπλοκότητας του σήματος, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος αλγόριθμος συμπίεσης και το κατάλληλο μέτρο πολυπλοκότητας.

### 1. Υλικό και Μέθοδοι

Αρχικά επιλέχθηκαν 24 διαφορετικοί ήχοι, που καλύπτουν και τις τρεις βασικές κατηγορίες ενδιαφέροντος (ανθρωπογενείς, βιοφυσικοί, γεωφυσικοί), από τη βάση δεδομένων ήχων “505 Digital Sound Effects” με κριτήριο να καλύπτουν τη μέγιστη δυνατή κλίμακα πολυπλοκότητας με όρους του θεμελιώδους μέτρου της εντροπίας Shannon εντροπίας [5]. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν δημοφιλείς αλγόριθμοι συμπίεσης ηχητικών σημάτων, με κριτήριο τη συμβατότητα με το υλικό του ασύρματου κόμβου-αισθητήρα του δικτύου του E-Soundmaps, με δεδομένο ότι όποιος από αυτούς επιλεγεί τελικά θα πρέπει να υλοποιηθεί με τη μορφή ενσωματωμένου λογισμικού πραγματικού χρόνου. Συγκεκριμένα, οι ITU-T G.711 [6] A-law και μ-law, καθώς και οι MPEG-1 LIII (mp3) [7] υλοποιήσεις ανοικτού κώδικα [8] στα 128kbps και 64kbps. Τέλος, εκτελέστηκαν μια σειρά από

αριθμητικές αναλύσεις, για τον υπολογισμό μιας σειράς διαφορετικών μέτρων πολυπλοκότητας (εντροπία Shannon, εντροπία Tsallis, πληροφορία Fisher και εντροπία ενέργειας κυματιδίων [5]) τόσο επί του αρχικού ηχητικού σήματος, όσο και επί του ηχητικού σήματος που πρώτα είχε υποστεί ένα κύκλο συμπίεσης-αποσυμπίεσης με διαφορετικούς αλγόριθμους συμπίεσης.

## 2. Αποτελέσματα

Μετά την εφαρμογή τεσσάρων διαφορετικών μέτρων εντροπικών / πληροφορικών μέτρων πολυπλοκότητας / οργάνωσης επί των αρχικών, ασυμπίεστων, ήχων υπό μελέτη και συγκεκριμένα των εντροπία Shannon, εντροπία Tsallis, πληροφορία Fisher και εντροπία ενέργειας κυματιδίων (wavelet energy entropy) (βοηθητικό υλικό της αναφοράς [5]), εφαρμόσαμε τα ίδια μέτρα και σε 4 διαφορετικές συμπίεσμένες εκδόσεις καθενός από τους ήχους (8ksps/8-bit A-law,  $\mu$ -law, mp3 128kbps, and mp3 64kbps). Σημειώνεται ότι (α) οι συμπίεσμένοι ήχοι αποσυμπίεστηκαν πριν την εφαρμογή των μέτρων που ποσοτικά μελετούν τη μεταβολή της πολυπλοκότητας του αρχικού σήματος λόγω της διαδικασίας συμπίεσης/ αποσυμπίεσης, και (β) σε όλες τις περιπτώσεις για τη μη-εκτατική εντροπία Tsallis χρησιμοποιήθηκε μια τιμή εντροπικού δείκτη  $q=1.8$ , τιμή που επιλέχθηκε τυχαία.

Εστιάζουμε τη μελέτη μας στην επίδραση διαφορετικών σχημάτων συμπίεσης στις τιμές των εντροπικών / πληροφορικών μέτρων. Αυτή η επίδραση μπορεί να μετρηθεί ως η ποσοστιαία μεταβολή από την τιμή του αντίστοιχου μέτρου για την ασυμπίεστη μορφή, έτσι τα αποτελέσματα είναι ευθέως συγκρίσιμα, ανεξάρτητα από τις συγκεκριμένες απόλυτες τιμές που δίνει το κάθε μέτρο πολυπλοκότητας για κάθε ήχο. Σημειώνεται ότι οι απόλυτες αυτές τιμές δεν ενδιαφέρουν γιατί εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά πολυπλοκότητας του κάθε ήχου όσο και από τον τρόπο υπολογισμού και τις ιδιότητες του κάθε μέτρου πολυπλοκότητας.

Τα διαγράμματα διασποράς που προέκυψαν δίνονται στα Σχήματα 2.1 έως 2.4, για την εντροπία Shannon, την εντροπία Tsallis, την πληροφορία Fisher information, και την εντροπία ενέργειας κυματιδίων, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τη μέση τιμή,  $M_i$ ,  $i=1,2,3,4$ , όπου 1=A-Law, 2= $\mu$ -Law, 3=mp3 128, 4= mp3 64, των ποσοστιαίων διαφορών μεταξύ των τιμών του εντροπικού / πληροφορικού μέτρου δια τις διαφορετικές συμπίεσμένες και την ασυμπίεστη εκδοχή των 24 μελετώμενων ήχων:

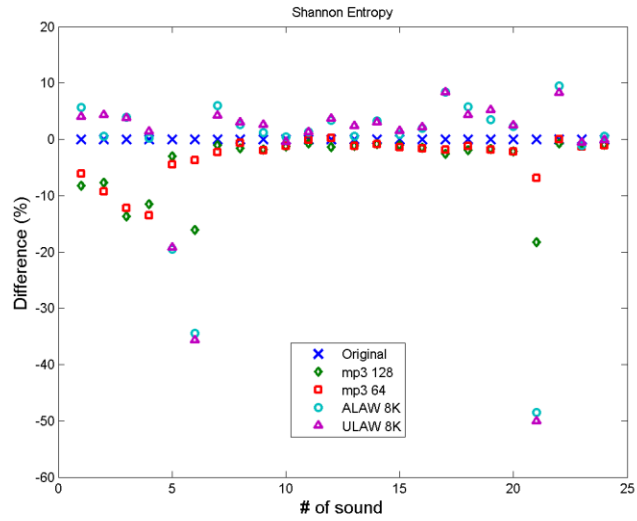
$$M_i = \left[ \sum_{j=1}^{24} \% \text{difference}(i, j) \right] / 24, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.1)$$

Πίνακας 2.1. Μέση τιμή των ποσοστιαίων διαφορών μεταξύ των τιμών του εντροπικού / πληροφορικού μέτρου δια τις διαφορετικές συμπίεσμένες και την ασυμπιεστη εκδοχή των μελετώμενων ήχων

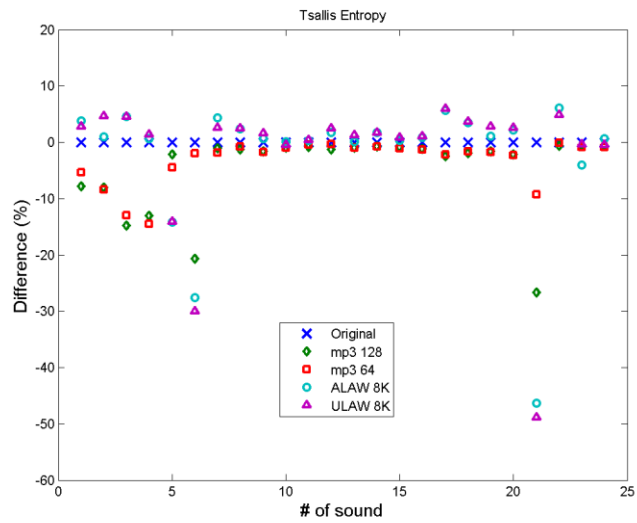
Μέτρο / συμπίεση	A-Law	μ -Law	mp3 128	mp3 64
Εντροπία Shannon	6.9	7.2	4.3	3.2
Εντροπία Tsallis	5.6	5.9	4.8	3.2
Πληροφορία Fisher	22.6	19.3	31.6	15.0
Εντροπία κυματιδίων	26.2	26.0	1.3	1.3

Από τον Πίνακα 2.1 μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι, εξαιρώντας την πληροφορία Fisher, όλα τα μέτρα επηρεάζονται λιγότερο από <10% για τις συμπίεσεις mp3. Συγκρίσιμες, μολονότι υψηλότερες, διαφορές παρατηρούνται για τις συμπίεσεις A-, μ- Law με τη χρήση των εντροπιών Shannon, και Tsallis. Τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για την περίπτωση της εντροπίας ενέργειας κυματιδίων και τις συμπίεσεις mp3 ( $M_3 = M_4 = 1.3\%$ ).

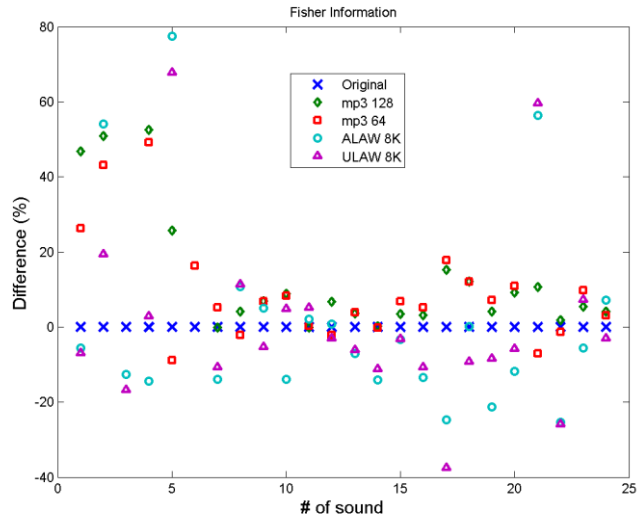
Εξετάζοντας λεπτομερώς τα αποτελέσματα: (α) Στις περιπτώσεις των εντροπιών Shannon και Tsallis τα αποτελέσματα εμφανίζουν έντονη ομοιότητα και δείχνουν ότι οι τιμές εντροπίας των πρώτων 4 ήχων επηρεάζονται λιγότερο στις περιπτώσεις των συμπίεσεων A-, μ -Law, ενώ οι υπόλοιποι 20 ήχοι επηρεάζονται λιγότερο στις περιπτώσεις των mp3 συμπίεσεων. (β) Η πληροφορία Fisher εμφανίζει γενικά υψηλές διαφορές, ωστόσο αυτό θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα της υψηλότερης ευαισθησίας αυτού του είδους μέτρου πολυπλοκότητας στις μεταβολές του σχήματος της κατανομής πιθανότητας των τιμών της χρονοσειράς. (γ) Η εντροπία ενέργειας κυματιδίων παρουσιάζει ταυτιζόμενες διαφορές μεταξύ των συμπίεσεων A-, μ -Law και μεταξύ των δυο συμπίεσεων mp3. Παρόλα αυτά οι συμπίεσεις A-, μ -Law οδηγούν σε εξαιρετικά υψηλές διαφορές, ενώ αντίθετα οι συμπίεσεις mp3 σε εξαιρετικά χαμηλές τιμές.



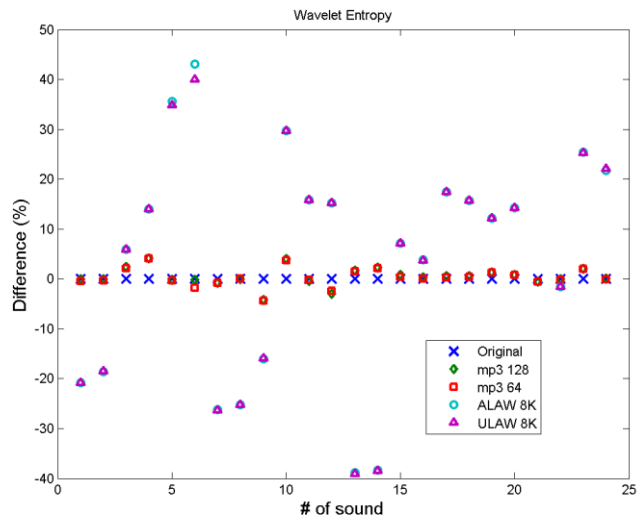
Σχήμα 2.1. Εντροπία Shannon: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν για καθεμιά από τις 4 συμπίεσεις και την τιμή της αντίστοιχης ασυμπίεστης εκδοχής των 24 μελετώμενων ήχων.



Σχήμα 2.2. Εντροπία Tsallis: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν για καθεμιά από τις 4 συμπίεσεις και την τιμή της αντίστοιχης ασυμπίεστης εκδοχής των 24 μελετώμενων ήχων.



Σχήμα 2.3. Πληροφορία Fisher: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν για καθεμιά από τις 4 συμπίεσεις και την τιμή της αντίστοιχης ασυμπίεστης εκδοχής των 24 μελετώμενων ήχων.



Σχήμα 2.4. Εντροπία ενέργειας κυματιδίων: Ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν για καθεμιά από τις 4 συμπίεσεις και την τιμή της αντίστοιχης ασυμπίεστης εκδοχής των 24 μελετώμενων ήχων.

### 3. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία διερεύνησε την επίδραση της συμπίεσης δεδομένων ήχου επί της ακρίβειας του εντροπικού / πληροφορικού περιεχομένου του. Η επίδραση αυτή μετρήθηκε ως η ποσοστιαία μεταβολή της τιμής του κάθε φορά θεωρούμενου μέτρου πολυπλοκότητας μεταξύ της συμπίεσμένης και της ασυμπίεστης περίπτωσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν πιο πάνω: (α) Από τα σχήματα συμπίεσης που μελετήθηκαν, οι συμπίεσεις mp3 οδηγούν σε μικρότερη επίδραση στις τιμές των μέτρων πολυπλοκότητας που χρησιμοποιήθηκαν και συνεπώς είναι προτιμότερες. (β) στην περίπτωση της πληροφορίας Fisher βρέθηκε ότι η ακρίβεια του συγκεκριμένου μέτρου δε διατηρείται για τους συμπίεσμένους ήχους. (γ) Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις εντροπίες Shannon και Tsallis φαίνεται να επηρεάζονται από τη συμπίεση με παρόμοιο τρόπο, ωστόσο αυτή η επίδραση εξαρτάται από το είδος της συμπίεσης και το ηχητικό δείγμα. (δ) Η ακρίβεια της εντροπίας ενέργειας κυματιδίων φαίνεται να παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστη από τις συμπίεσεις mp3 ανεξάρτητα από το ηχητικό δείγμα. Αυτό το αποτέλεσμα καθιστά τους συγκεκριμένους συνδυασμούς «μέτρου πολυπλοκότητας – αλγόριθμου συμπίεσης» ιδιαίτερος κατάλληλους για την εφαρμογή μας, για την τοπική δηλαδή συμπίεση των ηχητικών δεδομένων στο επίπεδο του κόμβου-αισθητήρα πριν τη μετάδοση στο δίκτυο και στη συνέχεια την εξαγωγή της εντροπίας ενέργειας κυματιδίων σαν χαρακτηριστικό της πολυπλοκότητας του ήχου το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κατά το στάδιο της ταξινόμησης.

### 4. Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «Αρχιμήδης III – Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στο ΤΕΙ Πειραιά», η οποία υλοποιείται μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» με τη συγχρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και εθνικών πόρων.



### 5. Αναφορές

- [1] I. Paraskevas, S. M. Potirakis, I. Liaperdos, M. Rangoussi, «Development of automatically updated soundmaps for the preservation of natural environment», *Journal of Environmental Protection* **2**, pp. 1388-1391 (2011), doi:10.4236/jep.2011.210161
- [2] M. Rangoussi, S. M. Potirakis, I. Paraskevas, N.-A. Tatlas, «On the development and use of sound maps for environmental monitoring», *Proc. of*

- the 128th Audio Engineering Society Convention*, May 22-25, 2010, London, UK, paper No. 8113 (2010), <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15410>.
- [3] S. M. Potirakis, B. Nefzi, N.-A. Tatlas, G. Tuna, M. Rangoussi, «A Wireless Network of Acoustic Sensors for Environmental Monitoring», *Key Engineering Materials* **605**, pp. 43-46 (2014), doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.605.43
  - [4] S. M. Potirakis, B. Nefzi, N.-A. Tatlas, G. Tuna, M. Rangoussi, «Design Considerations for an Environmental Monitoring Wireless Acoustic Sensor Network», *Sensor Letters*, 2014, (in press).
  - [5] N.-A. Tatlas, S. M. Potirakis, S. A. Mitilneos, M. Rangoussi, «On the effect of compression on the complexity characteristics of wireless acoustic sensor network signals», *Signal Processing*, 2014, doi: 10.1016/j.sigpro.2014.08.012.
  - [6] General aspects of digital transmission systems, Terminal Equipments. Pulse Code Modulation (PCM) of voice frequencies; ITU-T Recommendation G.711 (11/1988).
  - [7] ISO/IEC 11172-3:1993. Information technology -- Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s -- Part 3: Audio.
  - [8] Lame project, <http://lame.sourceforge.net/> (τελευταία πρόσβαση: 18/09/2014).

# Δυναμική ανάλυση πλωτής πλάκας τραμ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Σπυρίδων Μουζακίτης<sup>a</sup>, Γεώργιος Χαραλαμπίδης<sup>b</sup>, Ιωάννης Κουκούλης<sup>c</sup> & Γεώργιος Μπαμπάνης<sup>d</sup>

Group Science, Δ. Γούναρη 48, 15124 Μαρούσι

<sup>a</sup> [smouzak@groupscience.gr](mailto:smouzak@groupscience.gr), <sup>b</sup> [charal@groupscience.gr](mailto:charal@groupscience.gr), <sup>c</sup> [inkoukoulis@gmail.com](mailto:inkoukoulis@gmail.com), <sup>d</sup> [babanis@groupscience.gr](mailto:babanis@groupscience.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει μια πλωτή πλάκα εγκιβωτισμού τροχιάς Τραμ ως προς τη στατική και δυναμική συμπεριφορά της. Η πλωτή πλάκα χρησιμοποιείται για τη μείωση των δονήσεων που προκαλούνται από τους συρμούς στις τροχιές προς τις παρακείμενες ιδιοκτησίες και κυρίως προς τις κατοικίες. Η ανάλυση της «βύθισης» της τροχιάς από τη στατική και τη δυναμική φόρτιση του συρμού, καθώς και η δυναμική ανάλυση του συστήματος συρμού – τροχιάς – πλωτής πλάκας πραγματοποιείται συχνά με απλές μονοδιάστατες μεθόδους αναλυτικού υπολογισμού, που όμως στερούνται ακρίβειας και παρουσιάζουν αισιόδοξα αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται υπολογιστική ανάλυση της παραμόρφωσης της τροχιάς Τραμ, καθώς και δυναμική ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων του συζευγμένου συστήματος της πλωτής πλάκας. Πραγματοποιείται σχολιασμός της μοντελοποίησης και των παραδοχών που λαμβάνονται για τις αναλύσεις, ενώ παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή της ανάλυσης στην περίπτωση της επέκτασης του Τραμ της Αθήνας στον Πειραιά.

## 1. Εισαγωγή

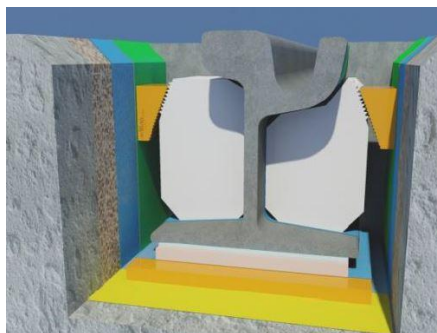
Η παρούσα εργασία εξετάζει το συζευγμένο σύστημα πλωτής πλάκας Τραμ ως προς τη στατική και δυναμική συμπεριφορά της και βρίσκει εφαρμογή στο έργο επέκτασης της τροχιάς από την Αθήνα στον Πειραιά. Η πλωτή πλάκα είναι ένα συζευγμένο δυναμικό σύστημα αποτελούμενο από μικρότερα υποσυστήματα απορρόφησης ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για την μείωση των κραδασμών που προκαλούνται από τους διερχόμενους συρμούς προς τη γύρω περιοχή. Το ζήτημα της μετάδοσης του εδαφομεταφερόμενου θορύβου του Τραμ είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις μεγαλουπόλεις και η μελέτη του βαρύνεται ακόμη περισσότερο στις πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Η ορθή μελέτη ενός τέτοιου πολυδιάστατου προβλήματος απαιτεί μία μέθοδο προσέγγισης η οποία θα εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων και παράλληλα θα λαμβάνει υπ' όψιν τον ταυτόχρονο συνδυασμό διαφορετικών παραμέτρων, όπως τα χαρακτηριστικά διαφορετικών υλικών και γεωμετριών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αναπτύχθηκε 3D και 2D μοντέλο πλωτής πλάκας εφαρμόζοντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements Method - FEM). Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ελεγχόμενη παραμετροποίηση των ιδιοτήτων των υλικών σε τρισδιάστατη γεωμετρία και η ακριβής συμπεριφορά του συζευγμένου συστήματος ως προς τις εξεταζόμενες μεταβλητές, συνδυάζοντας παράλληλα ικανοποιητικής τάξης ακρίβεια<sup>[10]</sup>. Ανάλογη μελέτη πραγματοποιήθηκε και με τις συμβατικές αλγεβρικές μεθόδους μονοδιάστατης ανάλυσης<sup>[2],[3],[4],[5],[6],[7]</sup>, των οποίων τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της μοντελοποίησης και των παραδοχών που τέθηκαν, παρουσίαση των αποτελεσμάτων και σύγκριση της εφαρμογής των δύο διαφορετικών μεθόδων.

## 2. Τεχνική περιγραφή του εξεταζόμενου προβλήματος

Η πλάκα Τραμ είναι ένα σύνολο υποσυστημάτων που εξασφαλίζουν την ασφαλή μεταφορά της αμαξοστοιχίας και ταυτόχρονα μειώνουν αποτελεσματικά την δυναμική απόκριση της κάθε ράγας από το διερχόμενο συρμό. Η δομή του εξεταζόμενου συστήματος (επέκταση Τραμ στον Πειραιά)<sup>[1]</sup> ξεκινάει από τη ράγα η οποία είναι εγκιβωτισμένη συνήθως σε σκυρόδεμα. Το κενό ανάμεσα στην ράγα και τον οδηγό/σκυρόδεμα, περιλαμβάνει περίβλημα από πολυμέρες συγκεκριμένης ελαστοδυναμικής συμπεριφοράς, από ένα αδιάβροχο επίπεδο στρώμα και ασφαλοδόμηση πλήρωσης κενού.





Σχήμα 1. Εγκιβωτισμός ράγας σε αντικραδασμικό οδηγό

Επιπλέον, όταν απαιτείται σημαντική μείωση εδαφομεταφερόμενου θορύβου το συνολικό σύστημα (δύο ράγες εντός σκυροδέματος) διαχωρίζεται από το έδαφος μέσω πρόσθετου αντικραδασμικού υποθέματος δημιουργώντας αυτό που ονομάζεται «Πλωτή Πλάκα». Τα ελαστικά μέρη του συστήματος της πλάκας επιτυγχάνουν την απόσβεση των δονητικών διεγέρσεων τόσο στους δύο κάθετους άξονες όσο και στον άξονα περιστροφής της.

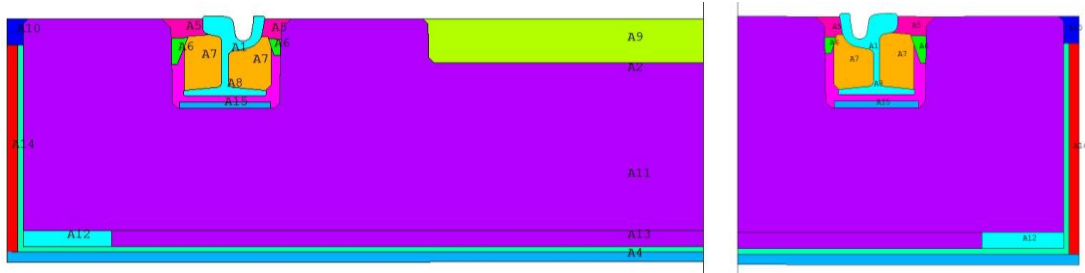
Τα ζητήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος αφορούν τόσο στην απόδοσή του, αναφορικά με τους παρακείμενους δέκτες θορύβου, όσο και στην ασφάλεια λόγω της παραμόρφωσης της τροχιάς. Το θέμα της απόδοσης εξετάζεται πρακτικά από τη δυναμική ανάλυση του συστήματος και συγκεκριμένα από τις ιδιοσυχνότητές του, που πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλότερες από τις συχνότητες δυναμικής διέγερσης ώστε να επιτυγχάνεται μείωση δόνησης (δυναμικό πρόβλημα). Το ζήτημα της ασφάλειας προκύπτει λόγω της αναπόφευκτης τοπικής παραμόρφωσης της τροχιάς λόγω του βάρους του συρμού, δεδομένου ότι η πλάκα είναι πλωτή επί αντικραδασμικού υλικού, και όχι επί σκληρού εδάφους. Για την εξέταση αυτού του φαινομένου υπολογίζεται η μέγιστη βύθιση (παραμόρφωση) της τροχιάς, η οποία παρατηρείται κάτω από ακίνητο συρμό (στατικό πρόβλημα, worst-case scenario έναντι της βύθισης κάτω από κινούμενο συρμό).

### 3. Ανάπτυξη μοντέλων και μέθοδοι υπολογισμού

Οι δύο μέθοδοι επίλυσης του μοντέλου πλωτής πλάκας που αναπτύχθηκαν αφορούν, την μονοδιάσταση αλγεβρική επίλυση του μοντέλου, και την 2D/3D αριθμητική ανάλυση αυτής. Δυναμική και στατική ανάλυση του μοντέλου της πλάκας πραγματοποιήθηκε και με τους δύο μεθοδολογίες.

Η πρώτη προσομοίωση (αλγεβρικό μοντέλο) αναλύει ένα μηχανικό μοντέλο τεσσάρων συγκεντρωμένων μαζών χωρισμένων με τέσσερα στοιχεία ελαστικότητας. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού ακολουθεί το πρότυπο μείωσης δονήσεων DIN V 45673-4<sup>[2]</sup>. Η τέσσερις συγκεντρωμένες μάζες είναι α) η μη αναρτώμενη μάζα της αμαξοστοιχίας προσδεμένη πάνω στη ράγα, β) η μάζα της στήριξης της ράγας, γ) η μάζα της πλάκας και της πλήρωσης της κορυφής και δ) η μάζα ελαστομερούς της βάσης. Τα ελαστικά στοιχεία μεταξύ των συγκεντρωμένων μαζών είναι α) η ελαστικότητα της ράγας, β) η ελαστικότητα της βάσης της πλάκας υπολογισμένα σύμφωνα με το πρότυπο EN 13146-9<sup>[3]</sup>, γ) η ελαστικότητα του αντικραδασμικού υποθέματος της πλωτής πλάκας σύμφωνα με το πρότυπο DIN 45673-7<sup>[4]</sup> και δ) η ελαστικότητα του εδάφους (ο συντελεστής διάτμησης G κατά DIN 45672-1<sup>[5]</sup> και το μέτρο ελαστικότητας [bedding modulus] κατά DIN 18134<sup>[6]</sup> αφορούν ισοδύναμο τμήμα). Για τη δε στατική ανάλυση, ακολουθήθηκε η μέθοδος Zimmermann<sup>[7][14]</sup> όπου η ράγα και η πλάκα θεωρήθηκαν στοιχεία συνεχούς μέσου.

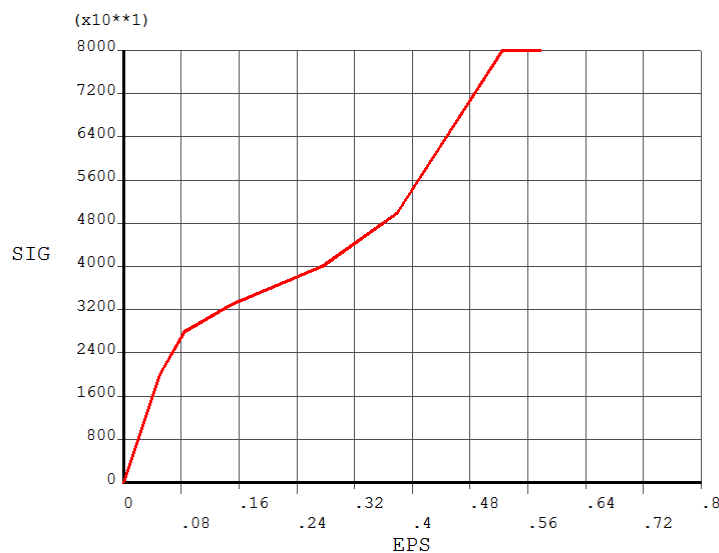
Η δεύτερη μέθοδος αφορά την αριθμητική επίλυση 2D και 3D μοντέλου, που έγινε σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων<sup>[8]</sup>, κάνοντας χρήση τετραπλεύρων και τετραέδρων στοιχείων αντίστοιχα<sup>[9]</sup>. Ομοίως και με αυτή τη μέθοδο έγινε στατική και δυναμική ανάλυση του μοντέλου. Η επιλογή της μεθόδου έγινε δεδομένης της τεκμηριωμένης ακρίβειάς της στη βιβλιογραφία αλλά και της ευκολίας μοντελοποίησης<sup>[10]</sup>. Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει αξονοσυμμετρική διατομή του συστήματος πλωτής πλάκας και με διαφορετικό χρωματισμό και αριθμηση από A1 έως A14 διακρίνονται τα διαφορετικά υλικά μοντελοποίησης.



Σχήμα 2. Εγκάρσια διατομής πλωτής πλάκας

Για τη στατική και δυναμική ανάλυση (μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων) έγιναν παραδοχές που βοήθησαν να αντιμετωπιστεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος:

Σχετικά με το στατικό πρόβλημα, εξετάζεται 3D τμήμα της πλάκας – τροχιάς υπό στατική φόρτιση (βάρος συρμού) για μήκος που αντιστοιχεί στο πρώτο ήμισυ ενός τυπικού συρμού (επαναληπτική συμμετρία στο υπόλοιπο μήκος). Οι συνοριακοί κόμβοι στην διεπιφάνεια που συνδέει το πολυμερές αντικραδασμικό υλικό με το έδαφος (χώμα) μοντελοποιούνται ως πακτώσεις αποτρέποντας σχετική κίνηση ή στροφή. Η συμπεριφορά του ελαστοδυναμικού, αντικραδασμικού υλικού είναι μη γραμμική<sup>[1]</sup>, όμως για την απλούστευση του προβλήματος, περιγράφηκε με τμήματα ευθείας τα οποία προσδίδουν στο μοντέλο μεγάλη ακρίβεια.



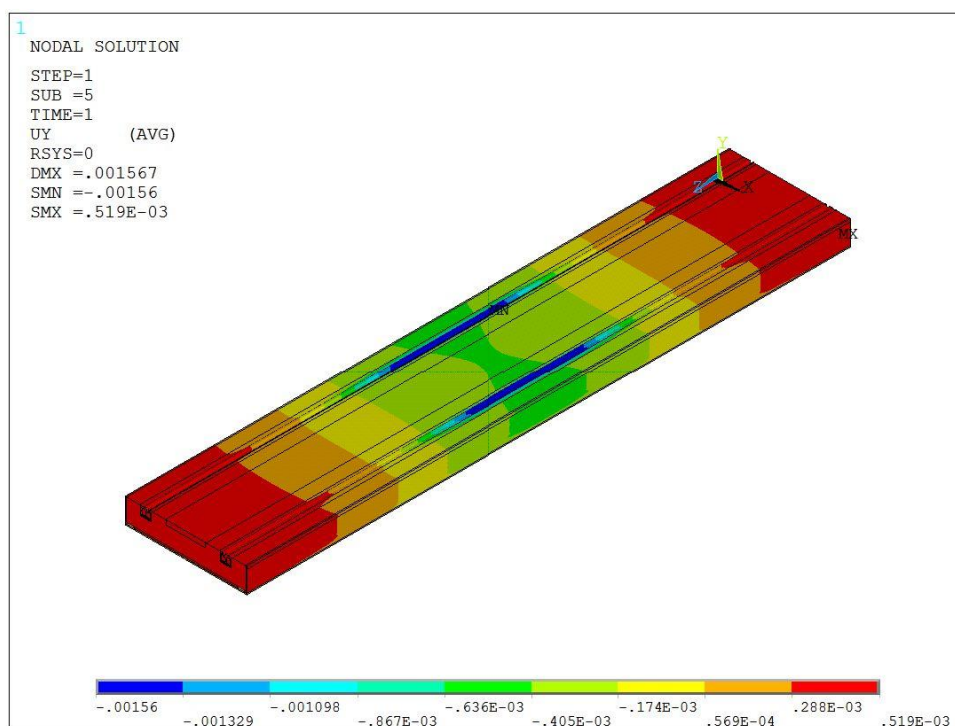
Σχήμα 3. Γραμμικοποιημένη ελαστική συνάρτηση Τάσεων – Παραμορφώσεων

Στο δυναμικό πρόβλημα (modal analysis) οι κόμβοι στην επιφάνεια διεπαφής ελαστομερούς - εδάφους μοντελοποιούνται ως κυλίσεις κατά x και z (οριζόντιοι άξονες). Ενώ στην πραγματικότητα ένα μέρος του εδάφους ταλαντώνεται ως συζευγμένο σύστημα μαζί με την πλάκα και τη διερχόμενη αμαξοστοιχία, μεταβάλλοντας έτσι τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, η ανάλυση του συστήματος μείωσης δονήσεων (για σκοπούς σύγκρισης ή αξιολόγησης) πρέπει να είναι ανεξάρτητη από το έδαφος που διαφέρει στο μήκος της τροχιάς και για το λόγο αυτό το έδαφος θεωρείται άκαμπτο στο μοντέλο. Δυναμικά μελετήθηκε αποκλειστικά η εγκάρσια διατομή της πλωτής πλάκας, καθώς το μήκος της δεν έχει κάποια σχετική αξία ως προ το δεδομένο αντικείμενο μελέτης. Οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο περιγράφουν επίπεδη παραμόρφωση (plane strain) στο επίπεδο xy, χάρη της απλούστευσης ότι το μήκος της τροχιάς είναι πολύ μεγαλύτερης διάστασης από τις άλλες δύο. Η κατασκευή της πλωτής πλάκας (ελαστοδυναμικά μέρη), μελετήθηκε υπό τη φόρτιση (μέγιστο βάρος) της διερχόμενης αμαξοστοιχίας. Τέλος, το μοντέλο εμπεριέχει τη μη αναρτώμενη μάζα της αμαξοστοιχίας, η οποία ισοδυναμεί με 0.661Mgr σε κάθε τροχό και έχει μοντελοποιηθεί με συγκεντρωμένες μάζες.

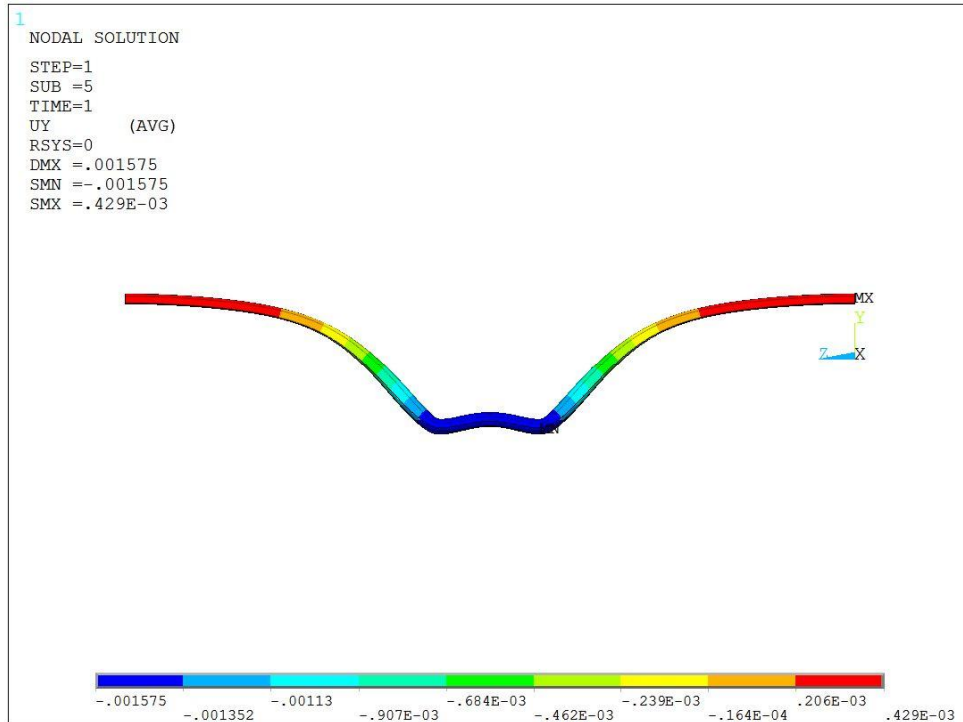
#### 4. Περιγραφή αναλύσεων και αποτελεσμάτων

##### 4.1. Στατικό πρόβλημα

Στο στατικό πρόβλημα μελετήθηκε η παραμόρφωση της πλωτής πλάκας φορτισμένη με το βάρος δεδομένης αμαξοστοιχίας και έχοντας ως σημεία εφαρμογής δυνάμεων τους μεσαίους τροχούς διπλών αξόνων της. Στη περίπτωση αυτή, αναπτύχθηκε τρισδιάστατο μοντέλο πλωτής πλάκας με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, αξονοσυμμετρικό ως προς τους δύο μεσαίους άξονες και επεκταμένο μέχρι και το μέσο των δύο ακριανών (έσχατη περίπτωση). Γι αυτή τη μοντελοποίηση έγινε χρήση τετραέδρου στοιχείου<sup>[11]</sup>. Η απόσταση των αξόνων της αμαξοστοιχίας είναι 1.7m, το συνολικό μήκος της 11.1m και το επιτρεπόμενο φορτίο ανά άξονα 120kN. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης παρατίθενται παρακάτω:

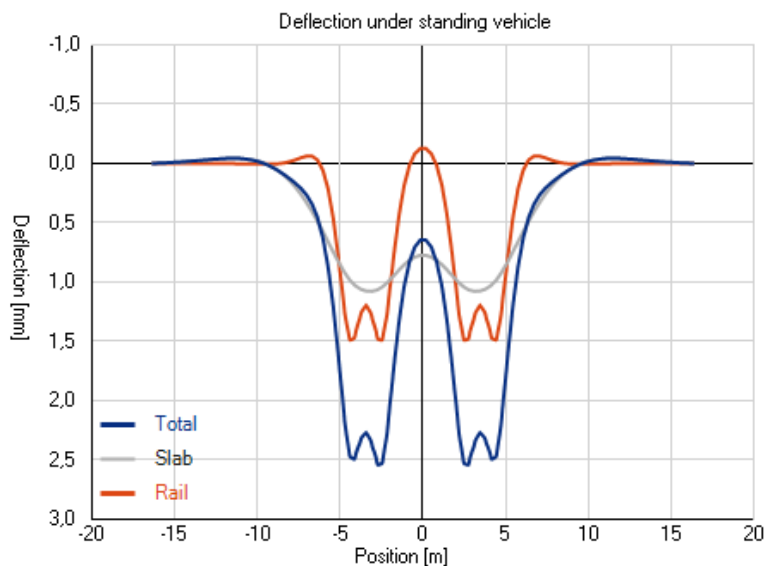


Σχήμα 4. Στατική Παραμόρφωση πλάκας



Σχήμα 5. Μεγέθυνση ( $\times 1000$ ) της παραμορφωσιακής κατάστασης της μεμονωμένης ράγας σε πλάγια όψη

Παρατηρούμε, πως η μέγιστη παραμόρφωση της πλωτής πλάκας φτάνει περίπου τα 1.6 mm. Αναλύοντας την παραμορφωσιακή κατάσταση της ράγας με την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο Zimmermann της βιβλιογραφίας προέκυψαν λίγο διαφορετικά αποτελέσματα. Στο σχήμα 6 παρατίθεται το διάγραμμα παραμόρφωσης της φορτισμένης ράγας, αλλά και των λοιπών φορέων, υπό το βάρος της αμαξοστοιχίας συναρτήσει του μήκους της (συμμετρικό μοντέλο ως προς τη κέντρο της αμαξοστοιχίας).



Σχήμα 6. Στατική παραμορφωσιακή κατάσταση της ράγας (rail)

Συγκεντρωτικά, η μέγιστη παραμόρφωση και των δύο μεθόδων είναι:

Μέγιστη παραμόρφωση ράγας	[mm]
Πεπερασμένα στοιχεία (3D)	1.6
Αλγεβρική ανάλυση (1D)	1.5

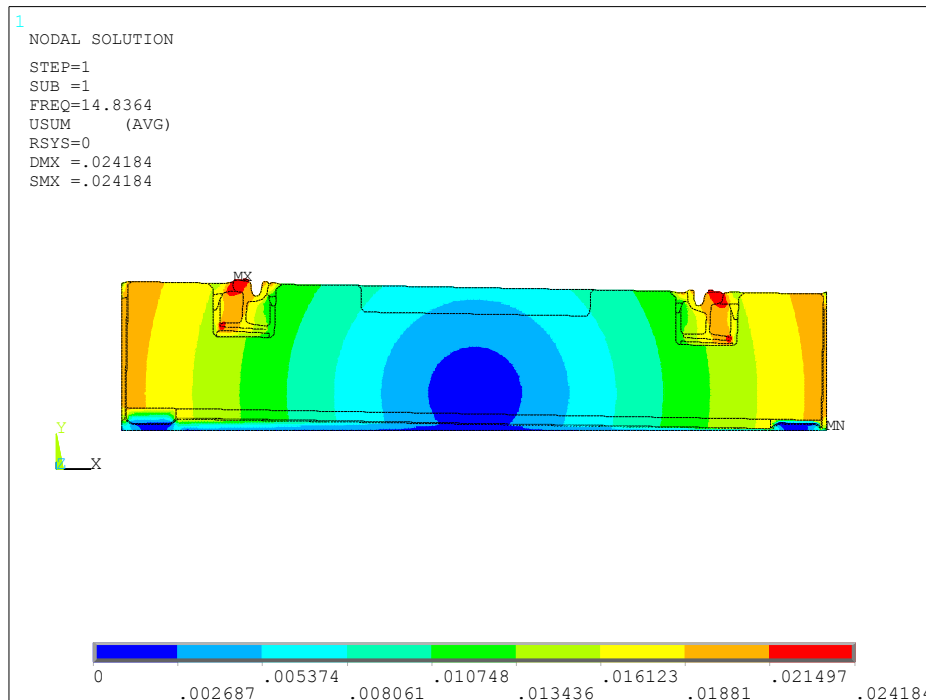
Η διαφοροποίηση των μεθόδων είναι οριακά αποδεκτή (περίπου 7%) για τη μελέτη ενός μηχανικού. Στη φάση του σχεδιασμού του έργου ωστόσο αυτή η διαφορά πιθανά θα μπορούσε να έχει μεγάλη σημασία τόσο για το ζήτημα της ασφάλειας όσο και του κόστους.

#### 4.2. Δυναμικό πρόβλημα

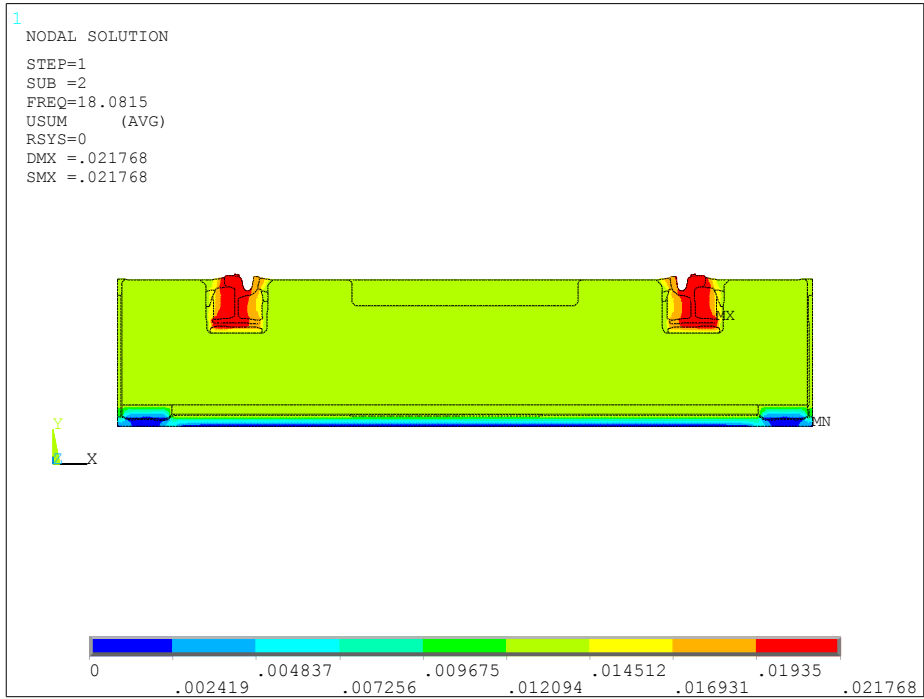
Σχετικά με το δυναμικό πρόβλημα και την ανάλυση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων (modal analysis) με FEM, μοντελοποιήθηκε η πλωτή πλάκα στις δύο διαστάσεις (βλ. σχήμα 2) χρησιμοποιώντας τετραπλευρικά στοιχεία<sup>[12],[13]</sup>. Οι πέντε πρώτες ιδιομορφές της πλάκας παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα.

Πίνακας 1. Πρώτες ιδιοσυχνότητες

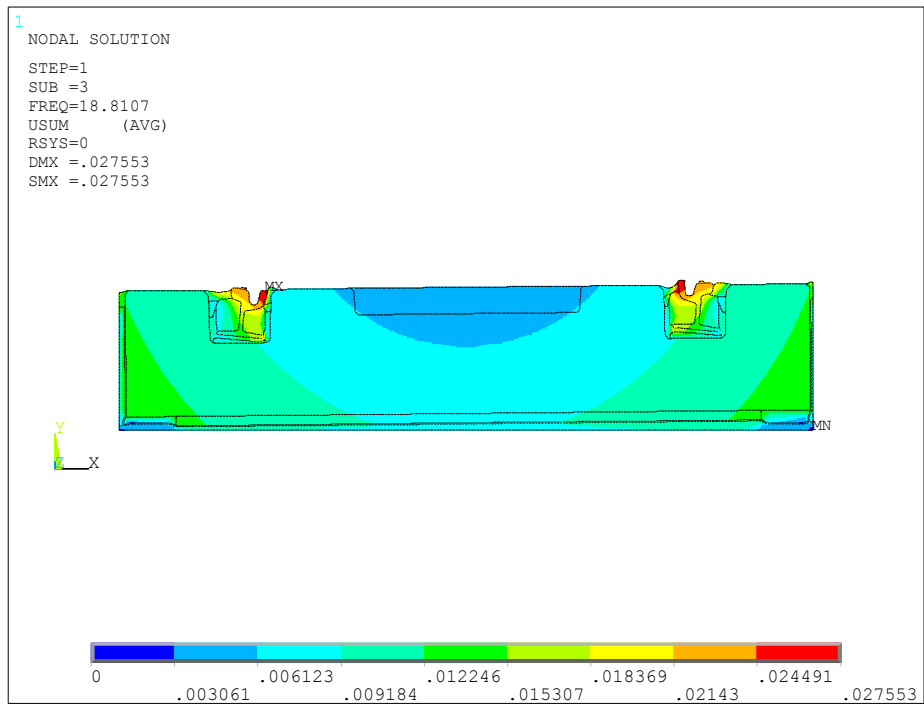
Natural frequency order	Natural frequency (Hz)
1	14.8
2	18.1
3	18.8
4	20.7
5	38.4



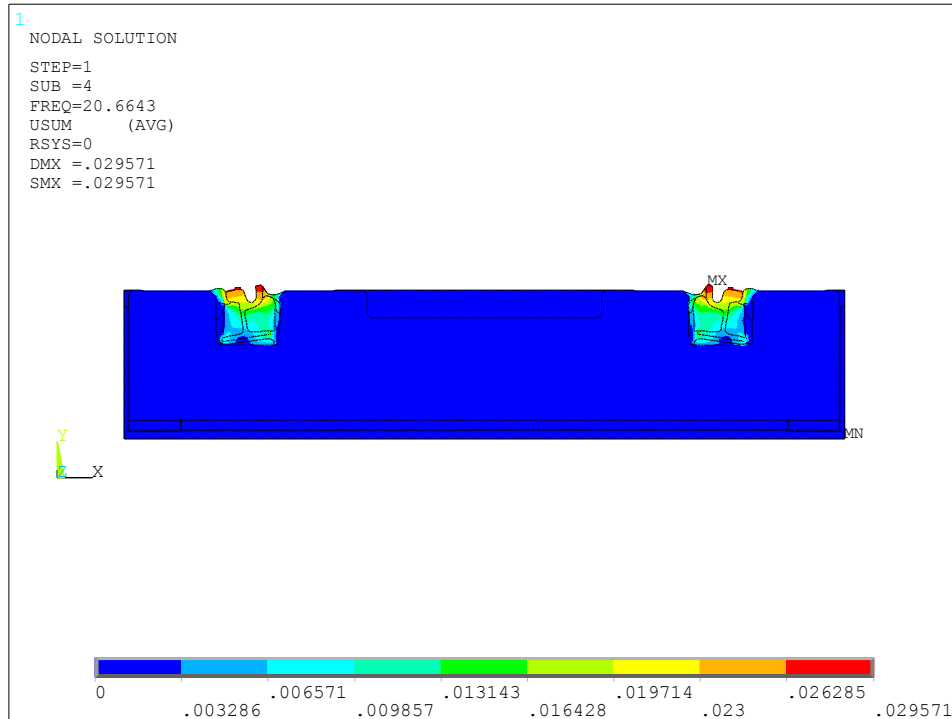
Σχήμα 7. 1<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα και ιδιομορφή



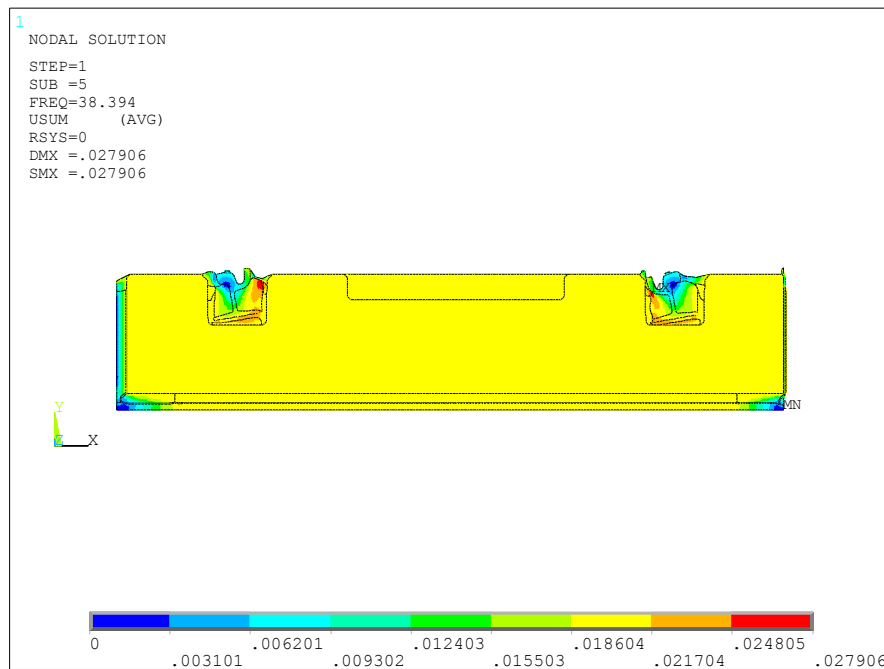
Σχήμα 8. 2<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα και ιδιομορφή



Σχήμα 9. 3<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα και ιδιομορφή



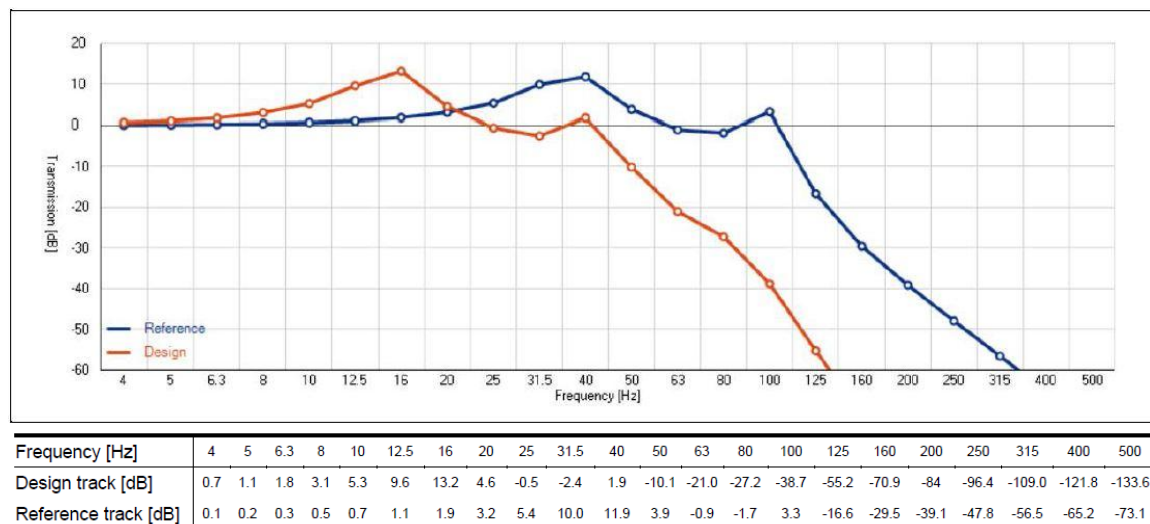
Σχήμα 10. 4<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα και ιδιομορφή



Σχήμα 11. 5<sup>η</sup> ιδιοσυχνότητα και ιδιομορφή

Η μέθοδος modal analysis που ακολουθήθηκε στα 2D πεπερασμένα στοιχεία δίνει πληροφορίες τόσο για τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής όσο και για τις ιδιομορφές της. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή σχετίζεται με την στροφική ταλάντωση της κατασκευής, η 2<sup>η</sup> με την κάθετη ταλάντωση της κατασκευής, η 3<sup>η</sup> με την έκκεντρη ταλάντωση της κατασκευής, η 4<sup>η</sup> με την ταλάντωση των υποσυστημάτων των ραγών εντός της κατασκευής και η 5<sup>η</sup> με την οριζόντια σχετική ταλάντωση μεταξύ της πλάκας και των υποσυστημάτων των ραγών.

Μελετώντας τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής κατά DIN V 45673-4, υπολογίστηκε η σχέση μετάδοσης δονήσεων συναρτήσει του συχνοτικού πεδίου. Το διάγραμμα μετάδοσης που ακολουθεί, δείχνει την απόκριση δύο συστημάτων, του μοντελοποιημένου συστήματος της πλωτής πλάκας στην επέκταση στον Πειραιά και ενός συστήματος αναφοράς<sup>[1]</sup>. Διακρίνονται οι δύο πρώτες ιδιοσυχνότητες (peaks) του μοντελοποιημένου συστήματος, οι οποίες είναι στα 16 και στα 40 Hz.



Σχήμα 12. Διάγραμμα μετάδοσης δονήσεων

Εν γένει, η μονοδιάστατη ανάλυση εξετάζει μόνο τον κατακόρυφο βαθμό ελευθερίας, ενώ στην πράξη γίνεται φανερό ότι οι λοιποί βαθμοί ελευθερίας βρίσκονται στην ίδια συχνοτική περιοχή. Μάλιστα, η πρώτη (χαμηλότερη) ιδιοσυχνότητα – ιδιομορφή δεν αφορά κατακόρυφη ταλάντωση, αλλά περιστροφή. Η διαφορά 6% στον ακριβή προσδιορισμό της κατακόρυφης ιδιοσυχνότητας μεταξύ των δύο μεθόδων είναι αποδεκτή στη μελέτη ενός μηχανικού, αλλά πιθανά όχι στον οικονομοτεχνικό σχεδιασμό ενός μεγάλου έργου.

## 5. Συμπεράσματα

Ένα σύστημα πλωτής πλάκας Τραμ μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλούς εγκατάστασης και εφαρμογής καθώς η μέγιστη παραμόρφωσή της είναι σαφώς μικρή, συμπεριλαμβάνοντας ταυτόχρονα και το συντελεστή σφάλματος. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνει επαρκώς χαμηλές ιδιοσυχνότητες εξασφαλίζοντας ικανοποιητική μείωση του εδαφομεταφερόμενου θορύβου. Οι αλγεβρικές μέθοδοι και η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των ανωτέρω παραμέτρων παρουσίασαν διαφορές που στο επίπεδο της μελέτης ενός μηχανικού πιθανά γίνονται οριακά αποδεκτές, αλλά στον οικονομοτεχνικό σχεδιασμό ενός μεγάλου έργου έχουν πολλαπλασιαστική μεγάλης βαρύτητας και δεν μπορούν να αγνοηθούν. Το σημαντικότερο εύρημα της σύγκρισής του αναφορικά με τη δυναμική ανάλυση της πλωτής πλάκας είναι ότι η χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα της εξεταζόμενης κατασκευής (επέκταση τροχιάς Τραμ στον Πειραιά) δεν αφορά στην κατακόρυφη ταλάντωση, αλλά στην περιστροφή της πλάκας εντός του ελαστομερούς που την περιβάλλει. Πρόσθετο σημαντικό και σχετικό έργο, που όμως εκφεύγει από το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων για τον υπολογισμό της μετάδοσης δόνησης από την τροχιά προς του παρακείμενους δέκτες, δεδομένης της δυσκολίας μοντελοποίησης μη-πεπερασμένου μέσου (έδαφος).

## Βιβλιογραφία - Αναφορές

- [1] Edilon Sedra, <http://www.edilonsedra.com/>
- [2] DIN V 45673-4, <http://www.beuth.de/en/technical-rule/din-spec-45673-3/201196676>
- [3] EN 13146-9, <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-13146-9/145935107>
- [4] DIN 45673-7, <http://www.beuth.de/en/standard/din-45673-7/132140083>
- [5] DIN 45672-1, <http://www.beuth.de/de/norm/din-45672-1/121781864>
- [6] DIN 18134, <http://www.beuth.de/de/norm/din-18134/149668370>



- [7] D. C. Zimmerman and T. Simmermacher, "Model correlation using multiple static load and vibration tests", *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 11 (1995), pp. 2182-2188.
- [8] Ansys, <http://www.ansys.com/>
- [9] Bathe KJ, *Finite Elements Procedures*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458
- [10] <http://www.quora.com/What-are-the-advantages-disadvantages-of-Finite-Element-methods-over-Finite-difference-methods-for-solving-singular-perturbation-problems-like-reaction-diffusion-systems>
- [11] Solid92, [http://mostreal.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-92.htm](http://mostreal.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-92.htm)
- [12] Plane42, [http://mostreal.sk/html/elem\\_55/chapter4/ES4-42.htm](http://mostreal.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-42.htm)
- [13] Clough, R W, Penzien, J, *Dynamics on structures*
- [14] K. Zimmermann, I. Zeidis, J. Steigenberger, and M. Pivovarov (2004). An approach to wormlike motion. In: 21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. Abstracts Book, Warsaw, Poland, August 15-21, 2004, p.371

# **Χρήση θεμελιωδών λύσεων για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες**

Πηνελόπη Μενούνου & Χρήστος Κλάγκος

Πανεπιστήμιο Πατρών

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πρόβλημα του υπολογισμού του ακουστικού πεδίου γύρω από πολύπλοκη γεωμετρία. Στην τριγωνοποιημένη επιφάνεια ενός στερεού σώματος δημιουργούνται ανακλάσεις από τις επίπεδες επιφάνειες των τριγώνων και περιθλάσεις από τις ακμές μεταξύ δύο γειτονικών μη συνεπίπεδων τριγώνων. Στην παρούσα εργασία προτείνεται: (i) ο συγκερασμός γνωστών λύσεων για την περιγραφή της συνεισφοράς κάθε τμήματος της τρισδιάστατης επιφάνειας στο ακουστικό πεδίο ( μέθοδος των ειδώλων για τον υπολογισμό των ανακλάσεων, μοντέλο των κατευθυντικών πηγών για τον υπολογισμό των περιθλάσεων) και (ii) ένας αλγόριθμος για τους υπολογισμούς που να μπορεί να εφαρμοστεί σε γεωμετρίες με μεγάλο αριθμό τριγώνων.

## ***Use of elementary solutions for the prediction of the sound field around complex geometries***

### **ABSTRACT**

*The prediction of the sound field around a complex geometry is investigated. On the triangulated surface of a solid object sound is reflected from the planar surfaces of the triangles and is also diffracted by edges of two adjacent triangles that are not co-planar. The present study proposes (i) the use of existing solutions to describe the contribution of each part of the geometry (the image method for the prediction of reflections and the directive line source model for the prediction of diffractions) and (ii) an algorithm to perform the computations suited for complex geometries with large number of triangles.*

### **Εισαγωγή**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πρόβλημα του υπολογισμού του ακουστικού πεδίου γύρω από πολύπλοκη γεωμετρία (π.χ. το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης του θορύβου των μηχανών του αεροσκάφους με την άτρακτό του). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση μεθόδων υπολογιστικής

αεροακουστικής ή (λιγότερο συχνά) με τη μέθοδο των ηχητικών ακτίνων. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται η μέθοδος των ακουστικών αναλόγων των Lighthill, Ffowcs Williams-Hawkings (π.χ. [1]), η μέθοδος Kirchhoff ή άλλες μέθοδοι συνοριακών στοιχείων (π.χ. [2]), και τέλος μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής (π.χ. [3]) και υβριδικές μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής/υπολογιστικής αεροακουστικής (π.χ. [4]). Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών έχει υπάρξει εκτενής και επιτυχής. Το μειονέκτημα τους έγκειται στο μεγάλο υπολογιστικό κόστος, το οποίο γίνεται σχεδόν απαγορευτικό για πρόλεξη ακουστικού πεδίου σε μεγάλη απόσταση από την πηγή ή/και το στερεό εμπόδιο καθώς και σε υψηλές συχνότητες. Για την αποφυγή των παραπάνω έχουν γίνει προσπάθειες εφαρμογής της μεθόδου των ηχητικών ακτίνων (π.χ. [5] σε ελικόπτερα και [6] σε αεροπλάνα). Οι μέθοδοι των ηχητικών ακτίνων όμως είτε αγνοούν το φαινόμενο της περίθλασης από ακμές εντελώς, είτε το συνυπολογίζουν χρησιμοποιώντας για κάθε ακμή (ανεξάρτητα από το μήκος της) τη λύση για ακμή απείρου μήκους. Η ανακρίβεια που εισάγεται είναι σημαντική στις ζώνες σκιάς, δηλαδή στις περιοχές που δεν «φωτίζονται» από τις ακουστικές πηγές. Στην παρούσα εργασία συνδιάζουμε τη μέθοδο των ακτίνων με θεμελιώδεις λύσεις τόσο για το απ'ευθείας, το ανακλώμενο όσο και για το περιθλώμενο πεδίο από πεπερασμένη ακμή. Προτείνεται δε ένας αλγόριθμος για τους υπολογισμούς που να μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύπλοκες γεωμετρίες.

## 1. Χρήση Θεμελιωδών Λύσεων

Για την απεικόνιση της γεωμετρίας θεωρούμε τη μορφή STL (StereoLithography), όπου περιγράφεται η επιφάνεια του τρισδιάστατου σώματος τριγωνοποιημένη. Για την περιγραφή των τριγώνων παρέχεται το κάθετο μονιδιαίο διάνυσμα και οι συντεταγμένες των τριών κορυφών του τριγώνου. Στην επιφάνεια ενός τυχαίου σώματος προκύπτουν επίπεδα (επιφάνειες τριγώνων που προκαλούν ανάκλαση), ακμές μεταξύ δύο γειτονικών μη συνεπίπεδων τριγώνων (που προκαλούν περίθλαση) και κορυφές (κοινές κορυφές δύο ή παραπάνω μη συνεπίπεδων τριγώνων που επίσης προκαλούν περίθλαση). Για τον υπολογισμό των ανακλάσεων από τις επιφάνειες τριγώνων χρησιμοποιείται η μέθοδος των ειδώλων και για τον υπολογισμό των περιθλάσεων από ακμές το διευρυνόμενο μοντέλο των κατευθυντικών πηγών. Η περίθλαση από κορυφές αγνοείται στην παρούσα εργασία καθώς και οι περιθλάσεις δεύτερης τάξης. Η ακουστική πηγή θεωρείται σημειακή και παντοκατευθυντική  $P(R) = e^{ikr_{inc}} / r_{inc}$ , όπου  $r_{inc}$  η απόσταση μεταξύ πηγής (S) και δέκτη (R) και  $k$  ο κυματαριθμός

### 1.1 Ανάκλαση από την επιφάνεια τριγώνου

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ειδώλων το πεδίο ανάκλασης που προκαλείται όταν ήχος από μια σημειακή παντοκατευθυντική πηγή (S) προσπίπτει πάνω σε επίπεδη ακουστικά σκληρή επιφάνεια είναι ίδιο με το πεδίο που θα δημιουργούσε η ίδια πηγή τοποθετημένη κατοπτρικά ως προς το επίπεδο χωρίς την παρουσία του επιπέδου, μια πηγή-είδωλο (imS). Επειδή η έκταση του τριγώνων που μας αφορούν δεν είναι άπειρη, η πηγή-είδωλο δεν είναι παντοκατευθυντική. Θα θεωρήσουμε ότι η επίδρασή της περιορίζεται μέσα στην πυραμίδα (πυραμίδα επιρροής), όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1(α). Για θέση δέκτη εκτός πυραμίδας δεν υπάρχει συνεισφορά

από την imS, ενώ για δέκτη μέσα στην πυραμίδα επιρροής η συνεισφορά της imS (δηλαδή το πεδίο ανάκλασης από την επιφάνεια του τριγώνου) είναι

$$P_{ref}(R) = e^{ikr_{ref}} / r_{ref} \cdot \quad (1.1)$$

όπου  $r_{ref}$  η απόσταση μεταξύ imS και δέκτη (R).

### 1.2 Περίθλαση από ακμή μεταξύ δύο γειτονικών μη συνεπίπεδων τριγώνων

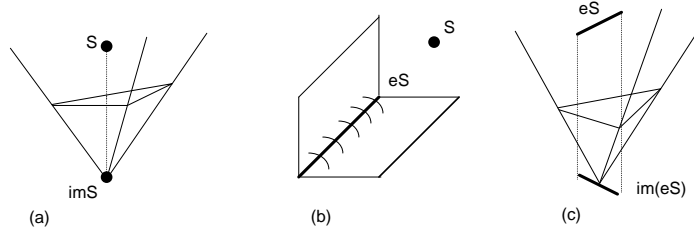
Σύμφωνα με το διευρυμένο μοντέλο των κατευθυντικών πηγών το πεδίο περίθλασης που προκαλείται όταν ήχος από μία σημειακή παντοκατευθυντική πηγή (S) προσπίπτει πάνω στην ακμή μιας σφήνας (ή αλλιώς δύο μη συνεπίπεδων γειτονικών τριγώνων) είναι ίδιο με το πεδίο ακτινοβολίας από στοιχειώδεις σημειακές κατευθυντικές πηγές ομοιόμορφα κατανεμημένες πάνω στην ακμή, δηλαδή από μια πηγή-ακμή (eS). Το πεδίο ακτινοβολίας της eS περιορίζεται στο εξωτερικό του σώματος ανάμεσα στα δύο τρίγωνα που ορίζουν την ακμή (σφήνα επιρροής) [βλ. Σχ. 1.1(b)]. Για δέκτη στην εξωτερική γωνία της σφήνας η συνεισφορά της eS (δηλαδή το πεδίο περίθλασης) είναι:

$$P_{diff}(vR) = -\frac{A_f}{4\pi} \int_{edge} \frac{e^{ik\sqrt{\rho^2+l^2}}}{\sqrt{\rho^2+l^2}} D_{glob}^w dl \ ,$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται πάνω στη ακμή, ενώ όλες οι μεταβλητές που εμφανίζονται στην εξίσωση παρουσιάζονται και εξηγούνται στην ανακοίνωση των παρόντων πρακτικών με τίτλο «Αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από σφήνα». Ο υπολογισμός δεν γίνεται στη θέση του πραγματικού δέκτη R, αλλά στη θέση ενός εικονικού δέκτη (vR), οι συντεταγμένες του οποίου ορίζονται έτσι ώστε οι αποστάσεις πηγής(S)-άκρων ακμής-δέκτη(R) να είναι ίσες με τις αποστάσεις άκρων ακμής-εικονικού δέκτη (vR).

### 1.3 Ανάκλαση περιθλώμενου πεδίου από επίπεδο τρίγωνο

Μία πηγή-είδωλο (imS) μπορεί να προκαλέσει ανακλάσεις πάνω σε επιφάνειες τριγώνων ή/και περιθλάσεις πάνω σε ακμές σφηνών. Η ανάκλαση ή/και η περίθλαση από την πηγή-είδωλο υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω για την αρχική πηγή (S). Ομοίως, ήχος από μια πηγή-ακμή (eS) μπορεί να προκαλέσει ανακλάσεις πάνω σε επιφάνειες τριγώνων ή/και περιθλάσεις πάνω σε ακμές σφηνών. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί περίθλαση δεύτερης, έχει πολύ μικρή συνεισφορά και αγνοείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η ανάκλαση μιας (eS) αντιμετωπίζεται παρόμοια με την ανάκλαση της αρχικής πηγής [βλ. Σχ1.1(c)].



Σχήμα 1.1. Εξεταζόμενες περιπτώσεις ανάκλασης και περίθλασης

## 2. Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος αναπτύσσεται στα εξής διαδοχικά στάδια:

- i. Προσπίπτουσα ακτινοβολία ( $v=0$ ): στον δέκτη (R) φτάνουν προσπίπτοντα ακουστικά κύματα κατευθείαν από την πηγή (S) (εφόσον ο δέκτης είναι ορατός από την πηγή).
- ii. Πρώτο στάδιο ( $v=1$ ):
  - a. Με βάση τα τρίγωνα που φωτίζονται από την πηγή σχηματίζονται πηγές-είδωλα ( $imS$ ).
  - b. Οι ακμές που φωτίζονται από την πηγή θεωρούνται πηγές-ακμές ( $eS$ ) σύμφωνα με το μοντέλο των κατευθυντικών πηγών.
  - c. Οι συνεισφορές όλων αυτών των εικονικών πηγών ( $imS$  και  $eS$ ) αθροίζονται στη θέση του δέκτη, εφόσον ο δέκτης βλέπει, χωρίς να εμποδίζεται από τμήμα της γεωμετρίας, τις εικονικές πηγές και όταν η ακτίνα δέκτη εικονικής πηγής βρίσκεται μέσα στο πεδίο ακτινοβολίας της εικονικής πηγής (πυραμίδα επιρροής ή σφήνα επιρροής).
- iii. Δεύτερο στάδιο ( $v=2$ ): Για κάθε μία από τις εικονικές πηγές που ορίστηκαν στον προηγούμενο στάδιο επαναλαμβάνεται η διαδικασία που περιγράφηκε, λαμβάνοντας υπ' όψιν τμήματα της γεωμετρίας που βρίσκονται στις αντίστοιχες πυραμίδες ή σφήνες επιρροής.

Η διαδικασία σταματάει όταν δεν μπορούν να οριστούν νέες εικονικές πηγές ή όταν η τιμή  $v$  πάρει μια μέγιστη τιμή που ορίζει ο χρήστης.

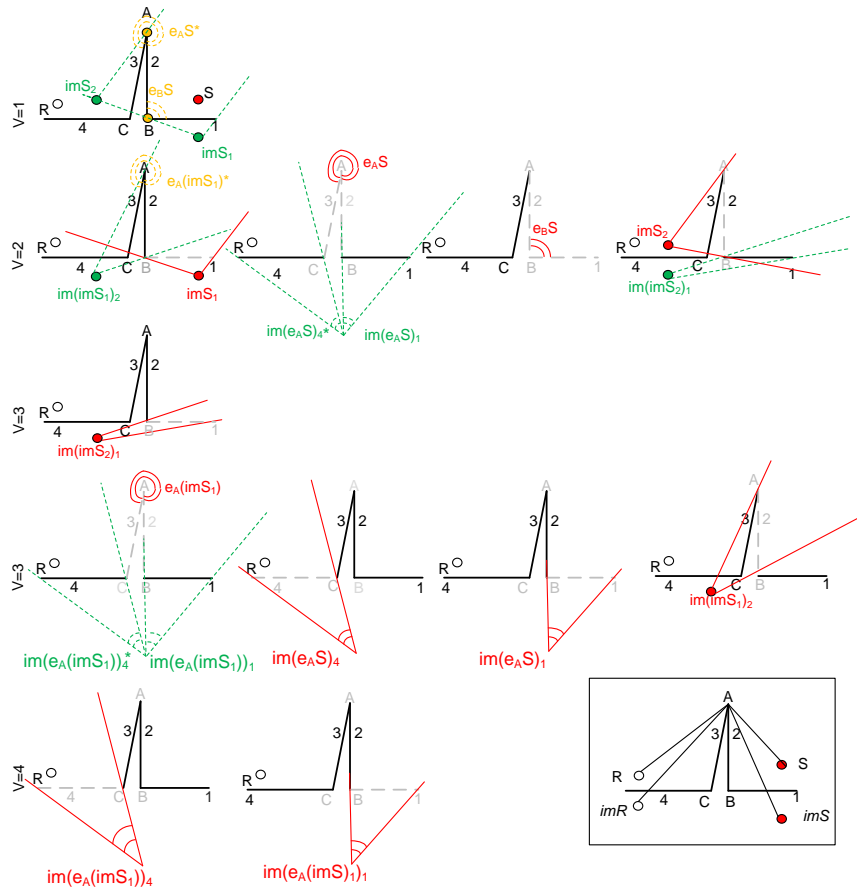
## 3. Αποτελέσματα

Στο Σχ. 3.1 φαίνονται οι ακουστικές τροχιές που ανιχνεύονται από τον κώδικα στην περίπτωση μιας σφήνας εδρασμένης πάνω σε έδαφος. Η περίπτωση αυτή έχει μελετηθεί αναλυτικά και γνωρίζουμε ότι για θέση δέκτη R στη ζώνη σκιάς, οι μοναδικές συνεισφορές στην ακουστική πίεση έρχονται από τις εξής 4 τροχιές περίθλασης:  $S-e_A-R$ ,  $imS-e_A-R$ ,  $S-e_A-imR$ ,  $imS-e_A-imR$ , όπου S η πηγή,  $e_A$  η άνω ακμή, R ο δέκτης,  $imS$  το είδωλο της πηγής ως προς το έδαφος, και  $imR$  το είδωλο του δέκτη ως προς το έδαφος (βλ. ένθετο στο Σχήμα 3.1).

Στο Σχ. 3.1 παρουσιάζονται οι ανιχνευόμενες τροχιές για κάθε στάδιο του αλγορίθμου. Σε κάθε περίπτωση η εξεταζόμενη πηγή έχει κόκκινο χρώμα και οι περιοχές επιρροής της συμβολίζονται με πλήρεις γραμμές, ενώ οι νέες πηγές που

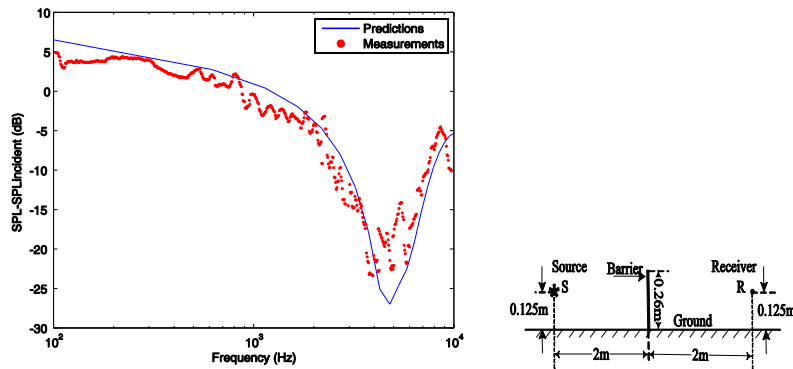
προκύπτουν από αυτήν συμβολίζονται με πορτοκαλί για πηγές-ακμές ( $eS$ ), ή πράσινο για πηγές-είδωλα ( $imS$ ), ενώ οι αντίστοιχες περιοχές επιρροής με διακεκομμένες γραμμές. Τα στοιχεία της γεωμετρίας που απεικονίζονται είναι τα επίπεδα 1,2,3,4 (το κάθε ένα συμπεριλαμβάνει περισσότερα από ένα τρίγωνα), και οι ακμές A,B,C (η κάθε μια αποτελούμενη από διαφορετικό αριθμό μικρότερου μήκους ακμών). Για λόγους σαφήνειας τα αποτελέσματα δίνονται συνολικά για όλα τα τρίγωνα που ανήκουν σε κάθε επιφάνεια και για όλες τις μικρότερες ακμές που αποτελούν μια από τις απείρου μήκους ακμές A,B,C. Τα απεικονιζόμενα με γκρι τμήματα της γεωμετρίας αντιστοιχούν σε τμήματα της γεωμετρίας που δεν λαμβάνονται υπ'όψιν στο συγκεκριμένο στάδιο, είτε γιατί έχουν ελεγχθεί ως προς την εξεταζόμενη πηγή είτε γιατί αγνοούνται ως προκαλούντα δεύτερης τάξης περίθλαση. Τέλος σημειώνεται ότι οι δείκτες στα ονόματα των πηγών αντιστοιχούν στα τμήματα της γεωμετρίας από τα οποία προκύπτουν, ενώ τα ίδια τα ονόματα των πηγών είναι ενδεικτικά της αντίστοιχης ηχητικής τροχιάς. Π.χ. η πηγή  $im(e_A S)_4$  αντιπροσωπεύει την ανάκλαση ως προς το επίπεδο 4 από το κύμα περίθλασης που ενεργοποιήθηκε από την ακμή  $e_A$  όταν φωτίστηκε από την πηγή S.

Παρατηρούμε ότι από όλες τις ανιχνευόμενες πηγές που παρουσιάζονται στη Σχ. 3.1, μόνο τέσσερις από αυτές (των όνομα των οποίων ακολουθείται από το σύμβολο '\*') συνεισφέρουν στο ακουστικό πεδίο στη θέση του δέκτη. Αυτές είναι οι  $e_A S$ ,  $e_A(imS_1)$ ,  $im(e_A S)_4$ ,  $im(e_A(imS_1))_4$  και αντιστοιχούν στις τροχιές που γνωρίζουμε από την αναλυτική μελέτη ( $e_A S \rightarrow S-e_A-R$ ,  $e_A(imS_1) \rightarrow imS-e_A-R$ ,  $im(e_A S)_4 \rightarrow S-e_A-imR$ ,  $im(e_A(imS_1))_4 \rightarrow imS-e_A-imR$ ).



Σχήμα 3.1 Εικονικές πηγές και ακουστικές τροχιές που ανιχνεύονται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο για γεωμετρία σφήνας εδρασμένης σε επίπεδο. Ένθετη εικόνα: ακουστικές τροχιές από αναλυτική μελέτη

Τέλος, στο Σχ.3.2 παρουσιάζονται συγκρίσεις από την προτεινόμενη μέθοδο με επιτόπιες μετρήσεις [7] για επίπεδη ακουστικά σκληρή επιφάνεια κάθετα εδρασμένη πάνω σε ακουστικά σκληρό έδαφος. Οι προσομοιώσεις με χρήση της μεθόδου έγιναν ξεχωριστά για κάθε συχνότητα και για μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Σημειώνεται η ικανοποιητική σύγκριση για όλο σχεδόν το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 3.2 Σύγκριση προλέψεων από την προτεινόμενη μέθοδο με μετρήσεις [7] για επίπεδη σκληρή επιφάνεια κάθετα εδρασμένη πάνω σε σκληρό έδαφος.

#### 4. Συζήτηση / Μελλοντική Εργασία

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί για διαφορετικά είδη πηγών, σημειακές ή γραμμικές, κατευθυντικές ή παντοκατευθυντικές, μονοχρωματικές ή πολυχρωματικές. Η δυσκολία της προτεινόμενης μεθόδου έγκειται στον σωστό και γρήγορο υπολογισμό των τροχιών διάδοσης. Ο αλγόριθμος θα επανζηθεί στο μέλλον με την προσθήκη περιθλάσεων δεύτερης τάξης και περιθλάσεων από κορυφές.

#### 5. Αναφορές

- [1] M. E. Goldstein, «A generalized acoustic analogy», J. Fluid Mech. **455**, pp. 315-333 (2003).
- [2] A. S. Lyrintzis , «Review of the use of Kirchhoff's method in computational aero-acoustics», J. Fluids Eng. **116**, pp. 665-676 (1994).
- [3] K. A. Kurbatskii and R. R. Mankbadi, «Review of computational aeroacoustics algorithms», Int. J. of Comp. Fluid Dyn. **18**, pp. 533-546 (2004).
- [4] M. Farshchi, K. Siamak, and E. Mohammad, «Linearized and non-linear acoustic/viscous splitting techniques for low Mach number flows», Int J. Num. Meth. in Fluids **42**, pp. 1059 – 1072 (2003).
- [5] Ι. Μακρής, «Ανάλυση του Αεροδυναμικού Θορύβου και της σκέδασης του από την άτρακτο σε πλήρη ελικόπτερα», Διπλωματική Εργασία, ΕΠΜ, Αθήνα (2007).
- [6] A. Agarwal, A.P. Dowling, Shin Ho-Chul, W. Graham, and S. Sefi, «A Ray Tracing Approach to Calculate Acoustic Shielding by the Silent Airframe», in *27th AIAA Aeroacoustics Conference*, AIAA 2006-2618 (2006).
- [7] T. Isei, T.F.W. Embleton, J.E. Piercy, «Noise reduction by barrier on finite impedance ground», J. Acoust. Soc. Am. **67**, pp. 46-58 (1980).



# **Αναλυτική λύση για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου περίθλασης γύρω από σφήνα**

Πηνελόπη Μενούνου, Πέτρος Νικολάου & Πολυξένη Σουρίδη

Πανεπιστήμιο Πατρών

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πεδίο περίθλασης που δημιουργείται από την πρόσπτωση ακουστικού κύματος πάνω σε ακουστικά σκληρή σφήνα. Το περιθλώμενο πεδίο μοντελοποιείται ως πεδίο ακτινοβολίας από άπειρες στοιχειώδεις σημειακές πηγές ομοιόμορφα κατανομημένες κατά μήκος της ακμής περίθλασης. Οι σημειακές πηγές έχουν συγκεκριμένη κατευθυντικότητα, η οποία είναι ανεξάρτητη από το είδος του προσπίπτοντος κύματος και η οποία εξετάζεται διεξοδικά. Προλέξεις με χρήση της προτεινόμενης μεθόδου συγκρίνονται ικανοποιητικά με άλλες αναλυτικές λύσεις καθώς και με εργαστηριακές μετρήσεις. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις, όπου η ακμή της σφήνας είναι τυχαίας μορφής (απείρου ή πεπερασμένου μήκους, ευθεία ή τεθλασμένη). Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικές πηγές θορύβου, καθώς ισχύει για κατευθυντικά και μη-κατευθυντικά επίπεδα, κυλινδρικά και σφαιρικά κύματα .

## ***Analytical solution for the diffraction field around wedges***

### **ABSTRACT**

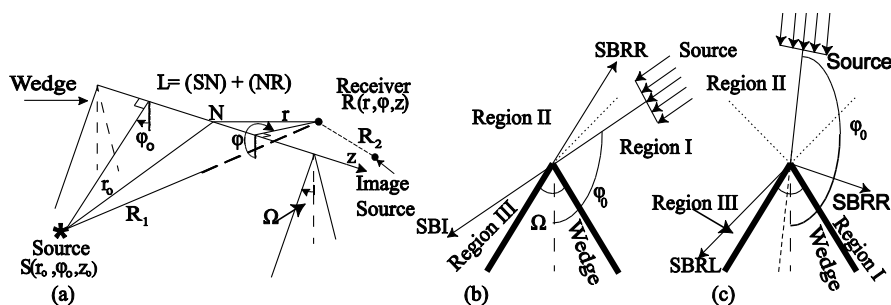
*Sound diffraction by a rigid edge is considered. The diffraction field is modeled as radiation coming from directive point sources continuously distributed along the diffracting edge. The point sources have a specified directivity (independent from the type of incident radiation), which is thoroughly investigated. Predictions employing the suggested method agree reasonably well with predictions from other analytical solutions and with experimental data. The suggested method differs from other available methods as it can be applied to various types of diffracting edges (infinite or finite length, straight or jagged) and for all types of incident radiation (omni-directional cylindrical and spherical waves, plane waves, as well as waves from directional sources), which makes the method useful for practical applications.*

## Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πεδίο περίθλασης που δημιουργείται από την πρόσπτωση ακουστικού κύματος πάνω σε ακουστικά σκληρή σφήνα. Η γεωμετρία της σφήνας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάλυση του πεδίου περίθλασης γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες, καθώς η επιφάνεια των στερεών σωμάτων μπορεί να αναπαρασταθεί από τρίγωνα, τα οποία ανά δύο σχηματίζουν μια σφήνα.

Οι δημοσιευμένες μέθοδοι για τον υπολογισμό της περίθλασης γύρω από σφήνα είναι πολλές τόσο στο πεδίο των συχνοτήτων (π.χ. [1]) όσο και στο πεδίο του χρόνου (π.χ. [2]). Η πλειονότητα των λύσεων αφορά περιθλούσα ακμή απείρου μήκους. Λύση για περίθλαση από ακμή πεπερασμένου μήκους, που είναι αναγκαία για το σκοπό που προαναφέρθηκε, αναφέρεται μεταξύ άλλων στην [3], τόσο για γεωμετρία ημι-επιπέδου (σφήνα μηδενικής γωνίας) όσο και για γεωμετρία σφήνας. Ισχύει όμως μόνο για δέκτες μακριά από τα σύνορα σκιάς. Το μοντέλο αυτό έχει διευρυνθεί και ισχύει για κάθε θέση δέκτη γύρω από τα σύνορα σκιάς, αλλά μόνο για το ημι-επίπεδο.[4] Στην παρούσα εργασία προτείνεται επέκταση αυτού του διευρυμένου μοντέλου, ώστε να ισχύει και για τη γενική περίπτωση της σφήνας.

Η τυπική γεωμετρία για το πρόβλημα της περίθλασης γύρω από σφήνα φαίνεται στο Σχ. 1.1. Για τη μισή γωνία της σφήνας  $\Omega$  ισχύει  $0 \leq \Omega < \pi/2$ , ενώ  $\gamma$  είναι μια παράμετρος με  $\gamma\pi = 2\pi - 2\Omega$  (για  $\gamma = 2$  έχουμε  $\Omega = 0$ , δηλαδή ημι-επίπεδο).



Σχήμα 0.1. Γεωμετρία του προβλήματος της περίθλασης από εμπόδιο τύπου σφήνας.

Με βάση τη γεωμετρική ακουστική το ακουστικό πεδίο γύρω από τη σφήνα μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1. Αν  $\Omega \leq \phi_0 \leq \pi - \Omega$  [βλέπε Σχ. 1.1(b)], το πεδίο χωρίζεται από τις γραμμές  $SBI$  και  $SBRR$ , που αποτελούν σύνορα σκιάς για την πρόσπτωση και την ανάκλαση αντίστοιχα. Αν  $\pi - \Omega < \phi_0 < \pi$  [βλέπε Σχ. 1.1(c)], το πεδίο χωρίζεται από τις γραμμές  $SBRR$  και  $SBRL$ , που αποτελούν σύνορα σκιάς για τις ανακλάσεις από τη δεξιά και αριστερή πλευρά της σφήνας αντίστοιχα. Σύμφωνα πάλι με τη γεωμετρική ακουστική, το προσπίπτον και ανακλώμενο από τις επιφάνειες της σφήνας πεδίο υπάρχει σε κάποιες από τις περιοχές αυτές. Το πεδίο περίθλασης, όμως, υπάρχει σε

όλες τις περιοχές (και στις δύο περιπτώσεις) και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 1. Ανάπτυξη και ιδιότητες λύσης για το πεδίο περίθλασης

### 1.1 Ανάπτυξη

Αφετηρία αποτελεί το Μοντέλο Κατευθυντικών Πηγών (Directive Line Source Model - DLSM)[3] για δέκτες μακριά από τα σύνορα σκιάς και η επέκταση του [4] για τον υπολογισμό του πεδίου περίθλασης σε κάθε θέση δέκτη αλλά μόνο για ημι-επίπεδο. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα της περίθλασης από ημι-επίπεδο μπορεί να μετατραπεί (ανεξάρτητα από τον τύπο του προσπίπτοντος κύματος) σε πρόβλημα ακτινοβολίας από άπειρες, σημειακές, κατευθυντικές πηγές, ομοιόμορφα καταναμημένες πάνω στην ακμή του εμποδίου[4] :

$$P_{glob}^d = -\frac{A_f}{4\pi} \int_{edge} \frac{e^{ik\sqrt{\rho^2+l^2}}}{\sqrt{\rho^2+l^2}} D_{glob} dl, \quad (1.1)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται κατά μήκος της ακμής περίθλασης,  $k$  ο κυματαριθμός,  $A_f$  ένας παράγοντας πλάτους, ( $A_f = 1$ ,  $H_0^{(1)}(kr_0)$ ,  $(rr_0)^{-0.5}$  για επίπεδο, κυλινδρικό ή σφαιρικό προσπίπτον κύμα αντίστοιχα),  $\rho$  ένα χαρακτηριστικό μήκος ( $\rho = r$ ,  $r$ ,  $L$  για επίπεδο, κυλινδρικό ή σφαιρικό προσπίπτον κύμα αντίστοιχα), και  $D_{glob}$  μία συνάρτηση κατευθυντικότητας, η οποία είναι κοινή για όλους τους τύπους προσπίπτοντος κύματος και έχει ως μεταβλητές τους αριθμούς Fresnel  $N_1$  και  $N_2$ . Σημειώνεται ότι μακριά από τα σύνορα σκιάς η  $D_{glob}$  αποκτά την απλή μορφή  $D_{dlsm} = 1/\cos((\phi - \phi_0)/2) + 1/\cos((\phi + \phi_0)/2)$ . Η δε αντίστοιχη πίεση συμβολίζεται με  $P_{dlsm}^d$ . Για τη περίπτωση της σφήνας, το πεδίο περίθλασης μακριά από το σύνορο σκιάς  $P_{dlsm}^{w,d}$  μπορεί επίσης να εκφραστεί στην μορφή της Εξ.(1.1) με  $D_{dlsm}^w = \gamma \sin(\pi/\gamma) \left\{ \left[ \cos((\phi - \phi_0)/\gamma) - \cos(\pi/\gamma) \right]^{-1} - \left[ \cos((2\pi - \phi - \phi_0)/\gamma) + \cos(\pi/\gamma) \right]^{-1} \right\}$  [3].

Αν εκφράσουμε τις μεταβλητές της  $D_{glob}$ ,  $N_1$  και  $N_2$ , ως γινόμενο δύο παραγόντων  $u_1 |\Phi_1|$  και  $u_2 |\Phi_2|$ , όπου  $u_{1,2} = \sqrt{(kr)(kr_0)\pi/k(L+R_{1,2})}$  σχετίζεται αποκλειστικά με κανονικοποιημένες αποστάσεις (βλέπε Σχ. 1.1(a)) και  $\Phi_1 = 2\sqrt{2}\pi^{-1} \cos((\phi - \phi_0)/2)$ ,  $\Phi_2 = 2\sqrt{2}\pi^{-1} \cos((\phi + \phi_0)/2)$  αποκλειστικά με γωνίες, και συγκρίνουμε τις λύσεις για ημι-επίπεδο και σφήνα μακριά από τα σύνορα σκιάς,  $P_{dlsm}^d$  και  $P_{dlsm}^{w,d}$ , παρατηρούμε ότι διαφέρουν μόνο ως προς τον παράγοντα που σχετίζεται με τις γωνίες. Προτείνεται στη συνέχεια ως λύση για το περιθλώμενο πεδίο γύρω από τη σφήνα,  $P_{glob}^{d,w}$ , η λύση για το πεδίο περίθλασης γύρω από ημι-επίπεδο,  $P_{glob}^d$ , με τον παράγοντα που αφορά τις γωνίες,  $\Phi_1$  και  $\Phi_2$ , στην συνάρτηση κατευθυντικότητας  $D_{glob}$  να έχει αντικατασταθεί με τον αντίστοιχο παράγοντα για τη γεωμετρία της σφήνας

$$\Phi_1^w = \gamma\sqrt{2}\pi^{-1} \left[ \cos((\phi - \phi_0)/\gamma) - \cos(\pi/\gamma) \right] / \sin(\pi/\gamma) \quad \text{και}$$

$$\Phi_2^w = -\gamma\sqrt{2}\pi^{-1} \left[ \cos((2\pi - \phi - \phi_0)/\gamma) + \cos(\pi/\gamma) \right] / \sin(\pi/\gamma). \text{ Συγκεκριμένα}$$

$$P_{glob}^{d,w} = -\frac{A_f}{4\pi} \int_{edge} \frac{e^{ik\sqrt{\rho^2+l^2}}}{\sqrt{\rho^2+l^2}} D_{glob}^w dl \quad (1.2)$$

$$D_{glob}^w = D_{glob}^{w,i} + D_{glob}^{w,r}, \quad (1.3)$$

$$D_{glob}^{w,i} = \pm 2\sqrt{2}u_1 e^{-\frac{i\pi}{2}u_1^2(\Phi_1^w)^2} \left( \overline{F(\infty)} + iF(u_1|\Phi_1^w) \right), \quad (1.4)$$

$$D_{glob}^{w,r} = \pm 2\sqrt{2}u_2 e^{-\frac{i\pi}{2}u_2^2(\Phi_2^w)^2} \left( \overline{F(\infty)} + iF(u_2|\Phi_2^w) \right), \quad (1.5)$$

όπου  $F$  το ολοκλήρωμα Fresnel  $F(x) = \int_0^x e^{i\frac{\pi}{2}\tau^2} d\tau$ , ενώ τα πρόσημα των  $D_{glob}^{w,i}$  και

$D_{glob}^{w,r}$  ακολουθούν τα πρόσημα των  $\Phi_1^w$  και  $\Phi_2^w$  αντίστοιχα. Στη περίπτωση που το προσπίπτον κύμα είναι επίπεδο, η συνάρτηση  $u_{1,2}$  αντικαθίσταται από την απλούστερη  $v = \sqrt{kr\pi/2}$  ( $\lim_{r \rightarrow \infty} u_{1,2} = v$ ). Σημειώνεται ότι η συνάρτηση  $D_{glob}^{w,i}$  και όλες οι παράμετροι με δείκτη 1 σχετίζονται με τη περίθλαση που προκαλείται από το προσπίπτον πεδίο, ενώ η  $D_{glob}^{w,r}$  και οι παράμετροι με δείκτη 2 σχετίζονται με το ανακλώμενο πεδίο. Ο συσχετισμός αυτός είναι ανεξάρτητος από την περίπτωση της πρόσπτωσης που εξετάζουμε [βλέπε Σχ. 1.1(b),(c)]. Η προτεινόμενη λύση είναι απλούστερη από τις υπάρχουσες, ισχύει για κάθε είδος προσπίπτουσας ακτινοβολίας, για τυχαίες ακμές περίθλασης και για κάθε θέση δέκτη γύρω από τα σύνορα σκιάς.

## 1.2 Ασυμπτωτικές μορφές και ιδιότητες της συνάρτησης κατευθυντικότητας

$$D_{glob}^w.$$

Στη συνέχεια για λόγους σαφήνειας παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για τη  $D_{glob}^{w,i}$  σε σχέση με το αντίστοιχο σύνορο σκιάς  $SBI$ , ενώ τα ίδια ισχύουν και για τη  $D_{glob}^{w,r}$  σε σχέση με το αντίστοιχο σύνορο σκιάς  $SBRR$  ή  $SBRL$ .

Κοντά στο σύνορο σκιάς  $SBI$ , όπου το όρισμα  $u_1|\Phi_1^w|$  του ολοκληρώματος Fresnel είναι μικρό, χρησιμοποιείται η ημι-συγκλίνουσα σειρά  $F(x) = x + F_2(x)$ ,  $F_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} i^n \pi^n x^{2n+1} / 2^n n!(2n+1)$  για να προκύψει

$$D_{glob}^{w,i} = D_{close}^{w,i} \pm i2\sqrt{2}u_1 e^{-\frac{i\pi}{2}u_1^2\Phi_1^{w2}} F_2(u_1|\Phi_1^w), \quad (1.6)$$

$$D_{close}^{w,i} = \pm 2\sqrt{2}u_1 e^{-\frac{i\pi}{2}u_1^2\Phi_1^{w2}} \left( \overline{F(\infty)} + i(u_1|\Phi_1^w) \right). \quad (1.7)$$

Όταν ο δέκτης πλησιάζει το  $SBI$ , το όρισμα  $u_1 |\Phi_1^w| \rightarrow 0$  και άρα η σειρά  $F_2(u_1 |\Phi_1^w|) \rightarrow 0$ . Η  $D_{close}^{w,i}$  είναι συνεπώς η ασυμπτωτική μορφή της  $D_{glob}^{w,i}$  κοντά στο σύνορο σκιάς  $SBI$  και είναι απλούστερη της  $D_{glob}^{w,i}$  [Εξ. (1.4)]. Η δε αντίστοιχη πίεση  $P_{close}^{w,i}$  [Εξ. (1.2)] πάνω στο σύνορο σκιάς  $SBI$  ( $\phi = \pi + \phi_0$ ) δίνει περίπου το μισό του προσπίπτοντος κύματος στην ίδια θέση, αποτέλεσμα που προβλέπεται από τους Bowman-Senior.[5]

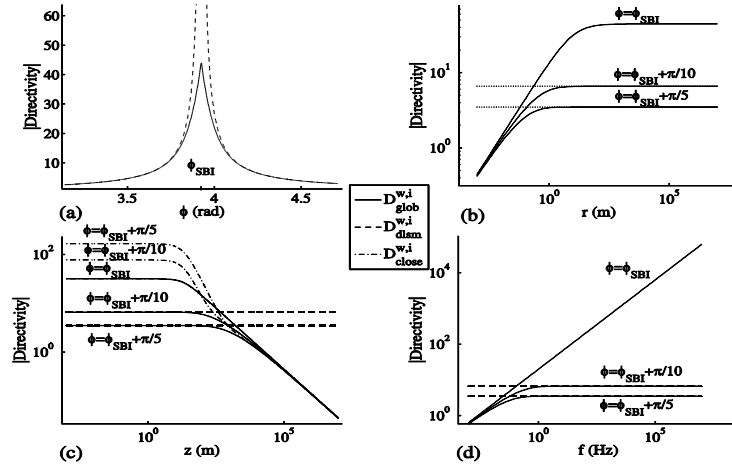
Αντίθετα, μακριά από το σύνορο σκιάς  $SBI$ , όπου το όρισμα  $u_1 |\Phi_1^w|$  είναι μεγάλο, χρησιμοποιείται η συγκλίνουσα σειρά  $F(x) = F(\infty) + e^{-\frac{i\pi}{2}x^2} (i\pi x)^{-1} [1 + F_1(x)]$ ,

$$F_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \prod_{m=0}^n (2m+1) / (i\pi x^2)^{n+1}, \quad x \neq 0 \text{ για να προκύψει}$$

$$D_{glob}^{w,i} = D_{dism}^{w,i} \pm i2\sqrt{2}u_1 e^{-\frac{i\pi}{2}u_1^2 \Phi_1^{w2}} F_1(u_1 |\Phi_1^w|), \quad (1.8)$$

$$D_{dism}^i = \pm 2\sqrt{2}u_1 e^{-\frac{i\pi}{2}u_1^2 \Phi_1^{w2}} \frac{e^{\frac{i\pi}{2}u_1^2 \Phi_1^{w2}}}{\pi u_1 |\Phi_1^w|}, \quad u_1^w |\Phi_1^w| \neq 0. \quad (1.9)$$

Όπως προηγουμένως, η  $D_{dism}^{w,i}$  είναι η ασυμπτωτική μορφή της  $D_{glob}^{w,i}$  μακριά από το σύνορο σκιάς και είναι απλούστερη της  $D_{glob}^{w,i}$ . Η δε πίεση  $P_{dism}^{d,w,i}$  που υπολογίζεται από την Εξ. (1.2) είναι ίδια με αυτές που προβλέπεται από τους Bowman-Senior.[5]

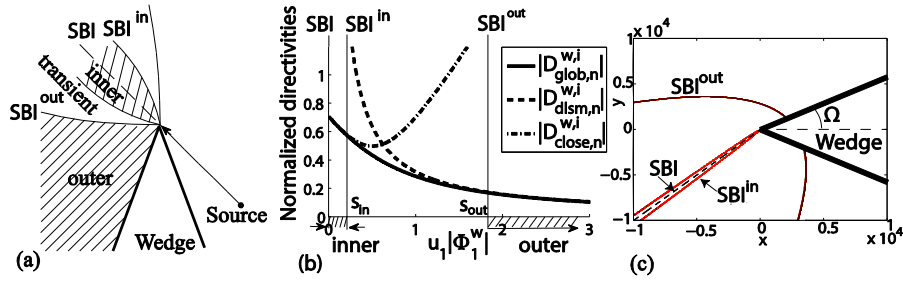


Σχήμα 1.1. Εξάρτηση της  $|D_{glob}^{w,i}|$  από τη γωνία  $\phi$  [(a)], την ακτινική απόσταση  $r$  [(b)], την απόσταση κατά μήκος της ακμής  $z$  [(c)], τη συχνότητα  $f$  της πηγής [(d)]: πηγή  $(r_0, \phi_0, z_0) = (10, \pi/4, 0)$ ; δέκτης  $(r, \phi, z)$ ;  $\Omega = \pi/6$ ;  $k = 10\pi$ .

Το Σχ. 1.2 δείχνει τη συμπεριφορά της  $|D_{glob}^{w,i}|$  ως προς τις μεταβλητές  $r$ ,  $\phi$ ,  $z$  και  $f$ , καθώς και την σχέση της με τις  $|D_{dism}^{w,i}|$  και  $|D_{close}^{w,i}|$  ως προς τις ίδιες μεταβλητές.

## 2. Χωρισμός του πεδίου περίθλασης σε υπο-περιοχές

Με βάση την νέα προτεινόμενη λύση για το περιθλώμενο πεδίο και τις ασυμπτωτικές της μορφές προτείνεται ο ακριβής διαχωρισμός του ακουστικού πεδίου γύρω από το σύνορο σκιάς σε τρεις περιοχές με εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά διάδοσης: (i) την *εσωτερική περιοχή* (inner region), όπου το πεδίο περίθλασης μπορεί να περιγραφεί από τις  $P_{close}^{w,d}$  και  $D_{close}^w$  και μοιάζει με το πεδίο πρόσπτωσης, (ii) τη *μεταβατική περιοχή* (transient region), όπου το πεδίο περίθλασης είναι μεταβατικό από τη φύση του και μπορεί να περιγραφεί μόνο από τις  $P_{glob}^{w,d}$  και  $D_{glob}^w$ , και (iii) την *εξωτερική περιοχή* (outer region), όπου το πεδίο περίθλασης περιγράφεται από τις  $P_{dism}^{w,d}$  και  $D_{dism}^w$  και μοιάζει με πεδίο από γραμμική πηγή. Οι περιοχές χωρίζονται από τις επιφάνειες  $SBI^{in}$  και  $SBI^{out}$  [ βλ Σχ. 3.1(a)], και οι οποίες καθορίζονται από τη σχέση μεταξύ των  $D_{glob}^w$ ,  $D_{dism}^w$  και  $D_{close}^w$ .



Σχήμα 2.1. Προτεινόμενος χωρισμός του πεδίου περίθλασης [(a)]; Σχέση των  $D_{dism,n}^{w,i}$ ,  $D_{close,n}^{w,i}$ ,  $D_{glob,n}^{w,i}$  [(b)]; Παράδειγμα απεικόνισης περιοχών σε περίπτωση κυλινδρικού προσπίπτοντος κύματος,  $k = 5\pi$  [(c)].

Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι κανονικοποιημένες συναρτήσεις κατευθυντικότητας

$$D_{dism,n}^{w,i} = \frac{D_{dism}^{w,i}}{d}, \quad D_{close,n}^{w,i} = \frac{D_{close}^{w,i}}{d}, \quad D_{glob,n}^{w,i} = \frac{D_{glob}^{w,i}}{d}, \quad (2.1)$$

όπου  $d = 2\sqrt{2}u_1 e^{-i\frac{\pi}{2}u_1^2\Phi_1^w}$ , είναι συναρτήσεις μιας μοναδικής μεταβλητής, της  $u_1|\Phi_1^w|$ . Η δε εξάρτησή τους από αυτή φαίνεται στο Σχ. 3.1(b). Η μεταβλητή  $u_1|\Phi_1^w|$  περιέχει όλη την πληροφορία για τη διάταξη πηγής-ακμής-δέκτη και τη συχνότητα της πηγής. Έτσι, για μια δεδομένη πηγή, ένα σημείο πάνω στον άξονα

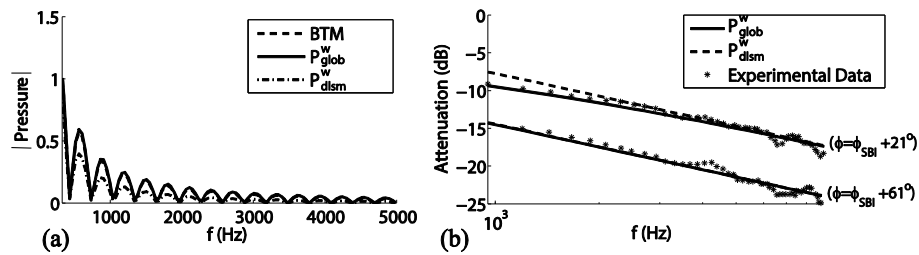
$u_1 |\Phi_1^w|$  αντιστοιχεί σε μία επιφάνεια γύρω από τη σφήνα, ενώ ένα ευθύγραμμο τμήμα πάνω στον άξονα  $u_1 |\Phi_1^w|$  σε μία περιοχή του χώρου γύρω από τη σφήνα. Παρατηρείται ότι η  $|D_{dism,n}^{w,i}|$  συμπίπτει με τη  $|D_{glob,n}^{w,i}|$ , καθώς το  $u_1 |\Phi_1^w|$  αυξάνει (δηλαδή ο δέκτης κινείται μακριά από το σύνορο σκιάς). Μπορούμε να ορίσουμε ένα σημείο  $s_{out}$  πάνω στον άξονα  $u_1 |\Phi_1^w|$ , τέτοιο ώστε η  $|D_{dism,n}^{w,i}|$  να είναι σχεδόν ίση (με ακρίβεια  $a_{out}$ ) με τη  $|D_{glob,n}^{w,i}|$  στο διάστημα  $(s_{out}, +\infty)$   $|D_{glob,n}^{w,i}| = a_{out} |D_{dism,n}^{w,i}|$ . Μπορούμε δηλαδή να ορίσουμε την επιφάνεια  $SBI^{out}$  :  $u_1 |\Phi_1^w| = s_{out}$ . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία ορίζουμε το σημείο  $s_{in}$  (με ακρίβεια  $a_{in}$ ), το οποίο αντιστοιχεί στην επιφάνεια  $SBI^{in}$  :  $u_1 |\Phi_1^w| = s_{in}$ . Χρησιμοποιώντας τις τιμές του Σχ. 3.1(b) για  $a_{in} = a_{out} = 99\%$  παίρνουμε

$$s_{out} = \frac{253}{200} \pi \quad \text{and} \quad s_{in} = \frac{47}{1280} \pi . \quad (2.2)$$

Αυτές οι τιμές ισχύουν για οποιαδήποτε θέση πηγής ή δέκτη αλλά και για οποιονδήποτε τύπο προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ένα παράδειγμα απεικόνισης των  $SBI^{in}$  και  $SBI^{out}$  φαίνεται στο Σχ. 3.1(c).

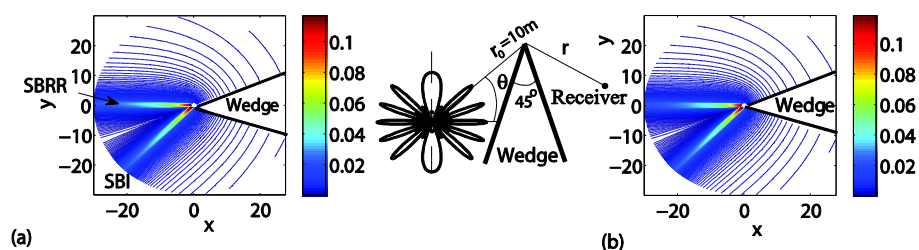
### 3. Αποτελέσματα

Η προτεινόμενη λύση  $P_{glob}^w$  [Εξς. (1.2)-(1.5)] συγκρίνεται με υπάρχουσα ακριβή αναλυτική λύση στο πεδίο του χρόνου[6][7] για τετραγωνικό παλμό. Η σύγκριση [βλέπε Σχ. 4.1(a)] γίνεται μέσω μετασχηματισμού Fourier και είναι ικανοποιητική. Στη συνέχεια η προτεινόμενη λύση συγκρίνεται με δημοσιευμένες εργαστηριακές μετρήσεις [8] σε θέσεις δέκτη τόσο μακριά όσο και κοντά στο σύνορο σκιάς [βλέπε Σχ. 4.1(b)]. Οι συγκρίσεις είναι ικανοποιητικές για μεγάλο εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 3.1. Σύγκριση της  $P_{glob}^w$  με τη αναλυτική λύση Biot-Tolstoy-Medwin  $\Omega = 30^\circ$ ,  $(r_0, \phi_0, z_0) = (1, 280^\circ, 0)$ ,  $(r, \phi, z) = (1, \phi, 0)$  [(a)]; και με εργαστηριακές μετρήσεις  $\Omega = 21^\circ$ ,  $(r_0, z_0) = (1.7, 0)$ ,  $(r, z) = (1.5, 0)$ ,  $\phi_0 = 360^\circ - 2\phi$  [(b)].

Τέλος, η αναλυτική λύση χρησιμοποιείται για την αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας της πηγής. Συμπεραίνεται ότι η κατευθυντικότητα της πηγής δεν επηρεάζει την κατευθυντικότητα του πεδίου περίθλασης, η οποία παραμένει η ίδια όπως προβλέπεται για παντοκατευθυντική πηγή. Το μέτρο όμως του πεδίου περίθλασης γίνεται ίσο με αυτό που θα έδινε μία παντοκατευθυντική πηγή πολλαπλασιασμένο με την τιμή της κατευθυντικότητας της πηγής  $\Theta$  στο σημείο  $N$  [βλέπε Σχ. 1.1(a)]. Το Σχ. 5.2 παρουσιάζει τις ισούψεις του πεδίου περίθλασης σε μια επιφάνεια κάθετη στην ακμή περίθλασης. Στο Σχ. 5.2(a) θεωρούμε την υπέρθεση των πεδίων περίθλασης από τρεις παντοκατευθυντικές σημειακές πηγές και στο Σχ. 5.2(b) μία ισοδύναμη σημειακή πηγή κατευθυντικότητας  $\Theta(\theta) = \sin(3k\bar{d}/2\sin\theta)/\sin(k\bar{d}/2\sin\theta)$ , όπου  $\bar{d}$  είναι η απόσταση μεταξύ των παντοκατευθυντικών πηγών.



Σχήμα 3.2 Πεδίο περίθλασης από υπέρθεση τριών παντοκατευθυντικών πηγών [(a)] ; πεδίο περίθλασης από κατευθυντική πηγή;  $k\bar{d} = 18.4$  [(b)];

#### 4. Περίληψη/Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια προσεγγιστική αναλυτική λύση για το πεδίο περίθλασης γύρω από γεωμετρία σφήνας, η οποία ισχύει για κάθε είδος προσπίπτοντος ακουστικού κύματος, μπορεί να εφαρμοστεί σε ακμές περίθλασης απείρου ή πεπερασμένου μήκους, και ισχύει για δέκτες τόσο κοντά όσο και μακριά από τα σύνορα σκιάς. Αποτελέσματα από την προτεινόμενη λύση συγκρίνονται ικανοποιητικά με άλλες αναλυτικές λύσεις και πειραματικές μετρήσεις.

#### 5. Αναφορές

- [1] W. J. Hadden and A. D. Pierce, «Sound diffraction around screens and wedges for arbitrary point source locations», J. Acoust. Soc. Am. **69**, pp. 1266-1276 (1981).
- [2] U. P. Svensson and P. T. Calamia, «Edge-Diffraction Impulse Responses Near Specular-Zone and Shadow-Zone Boundaries», Acust. Acta Acust. **92**, pp. 501-512 (2006).
- [3] P. Menounou, I. J. Busch-Vishniac, and D. T. Blackstock, «Directive line source model. A new model for sound diffraction by half planes and wedges», J. Acoust. Soc. Am. **107**, pp. 2973-2986 (2000).



- [4] Π. Νικολάου, «Συμβολή στη μελέτη της επίδρασης στερεού σώματος στο ακουστικό πεδίο», Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο (2014).
- [5] J. J. Bowman and T. B. A. Senior, *Electromagnetic and Acoustic Scattering by Simple Shapes*, edited by J. J. Bowman, T. B. A. Senior, and P. L. E. Uslenghi, North-Holland, Amsterdam, (1969).
- [6] M. A. Biot and I. Tolstoy, «Formulation of wave propagation in infinite media by normal coordinates with an application to diffraction», *J. Acoust. Soc. Am.* **29**, pp 381–391 (1957).
- [7] H. Medwin, «Shadowing by finite noise barriers», *J. Acoust. Soc. Am.* **69**, pp. 1060–1064 (1981).
- [8] A. I. Papadopoulos and C. G. Don, «A study of barrier attenuation by using acoustic impulses», *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, pp. 1011-1018 (1991).
- [9] D. T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000).

## ***Νανοακουστικά κύματα με τη χρήση υπερβραχέων παλμών laser και οι εφαρμογές τους σε σύνθετα υλικά***

Ειρήνη Τζιανάκη<sup>1,a</sup>, Ιωάννης Ορφανός<sup>1,b</sup>, Ευάγγελος Κασελούρης<sup>1,c</sup>, Ευθύμιος Μπακαρέζος<sup>1,2,d</sup>, Βασίλειος Δημητρίου<sup>1,3,e</sup>, Μιχάλης Ταταράκης<sup>1,4,f</sup> & Νεκτάριος Παπαδογιάννης<sup>1,2,g</sup>

<sup>1</sup>Κέντρο Φυσικής Πλάσματος και Laser, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

<sup>2</sup>Τμήμα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ε. Δασκαλάκη 1, 74100 Ρέθυμνο

<sup>3</sup>Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρωμανού 3, Χαλέπα, 73133 Χανιά

<sup>4</sup>Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ρωμανού 3, Χαλέπα, 73133 Χανιά

<sup>a</sup> [i.tzianaki@chania.teicrete.gr](mailto:i.tzianaki@chania.teicrete.gr), <sup>b</sup> [yorphanos@staff.teicrete.gr](mailto:yorphanos@staff.teicrete.gr), <sup>c</sup> [v.kaselouris@chania.teicrete.gr](mailto:v.kaselouris@chania.teicrete.gr),

<sup>d</sup> [bakarezos@staff.teicrete.gr](mailto:bakarezos@staff.teicrete.gr), <sup>e</sup> [dimvasi@chania.teicrete.gr](mailto:dimvasi@chania.teicrete.gr), <sup>f</sup> [m.tatarakis@chania.teicrete.gr](mailto:m.tatarakis@chania.teicrete.gr),

<sup>g</sup> [npapadogiannis@staff.teicrete.gr](mailto:npapadogiannis@staff.teicrete.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Κατά την αλληλεπίδραση υπερβραχέων παλμών laser με την ύλη δημιουργούνται υψίσουχα μηχανικά κύματα, τα οποία διαδίδονται σε όλες τις κατευθύνσεις έξω από το σημείο αλληλεπίδρασης. Χρησιμοποιώντας παλμούς laser διάρκειας 6ns και 30fs δημιουργήθηκαν και ανιχνεύθηκαν με διάφορες οπτικές μεθόδους, νανοακουστικά κύματα με συχνότητες από μερικά MHz έως sub-THz. Μελετήθηκαν τα κύματα αυτά τόσο με πειραματικές μεθόδους, όσο και με προσομοιώσεις βασιζόμενες σε πεπερασμένα στοιχεία, για την κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών της μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε μηχανικό κύμα και της διάδοσής τους.*

*Τα παραπάνω κύματα χρησιμοποιήθηκαν για το χαρακτηρισμό σύνθετων υλικών, όπως διαστρωματωμένα λεπτά μεταλλικά υμένα σε διηλεκτρικά και ημιαγώγιμα υποστρώματα. Από τη μελέτη αυτή εξάχθηκαν βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών (ατέλειες, πάχος υμενίων) και βασικά ελαστικά και θερμομηχανικά χαρακτηριστικά (ταχύτητα διάδοσης, σταθερές αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίων-φωτονίων, χαρακτηριστικές συχνότητες αλληλεπίδρασης φωτονίων-φωτονίων / Brillouin phonons).*

## ***Nanoacoustic waves using ultrafast laser pulses and their application in composite materials***

### **ABSTRACT**

*During the interaction of ultrafast laser pulses with matter high-frequency mechanical waves are generated, that propagate at all directions outward the interaction region. Using 6ns and 30fs laser pulses, few MHz up to sub-THz nanoacoustic waves are generated and detected using various optical techniques. These waves are studied experimentally, as well as with simulations based on finite element analysis, for the understanding of the basic characteristics of the conversion of optical energy into mechanical waves, and their propagation.*

*The aforementioned waves are used for the characterization of composite materials, such as layered thin metallic films on dielectric and semiconducting substrates. Basic morphological (film thickness, defects), and elastic and thermomechanical (propagation velocity, electron-phonon coupling constants, characteristic frequencies of photon-phonon interaction / Brillouin phonons) characteristics of these materials are extracted from this study.*

## **Εισαγωγή**

Το πώς αντιδρά η ύλη όταν αυτή ακτινοβολείται από οπτική ακτινοβολία είναι ένα κλασσικό πεδίο της Φυσικής. Αν η οπτική ακτινοβολία είναι laser τότε υπάρχει η δυνατότητα τοπικής διέγερσης της ύλης που προφανώς εξαρτάται από την εστίαση της ακτινοβολίας και από το βάθος διέγερσης της ύλης είτε πρωτογενώς από την οπτική ακτινοβολία στο βάθος διείσδυσης αυτής είτε δευτερογενώς από την διάχυση της ενέργειας μακριά από το σημείο εστίασης. Στην περίπτωση που το laser είναι παλμικό τότε η ισχύς της ακτινοβολίας μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη. Επιπρόσθετα αν η ύλη είναι με την μορφή λεπτών υμενίων που δεν μπορεί να διαπεράσει η οπτική ακτινοβολία π.χ. μέταλλα το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας περιορίζεται για το ορατό φως σε λίγα nanometers. Συνεπώς η ενέργεια που εναποτίθεται στην ύλη ανά μονάδα όγκου και χρόνου μπορεί να είναι τεράστια.

Σημαντικό ρόλο πέρα από την ισχύ της εστιαζόμενης οπτικής δέσμης και η διάρκεια του παλμού της οπτικής ακτινοβολίας αλλά και ο χρόνος αντίδρασης του υλικού σε αυτή την υπερβραχεία ακτινοβολία. Τα μέταλλα γενικά λόγω της ύπαρξης των ελευθέρων ηλεκτρονίων αλλά και του πολύ «σκληρού» δεσίματος των ιόντων μέσω των πλεγματικών δεσμών μπορούν να αντιδρούν τάχιστα στην αλληλεπίδραση με τους παλμούς laser. Η αλληλεπίδραση αυτή συνίσταται στο γεγονός της γρήγορης αρχικής απορρόφησης του φωτός και της τοπικής θέρμανσης του πλέγματος και της τελικής μετατροπής της ενέργειας σε μηχανικό κύμα που τείνει να φύγει μακριά από το χώρο της αλληλεπίδρασης και μπορεί να έχει εξαιρετικά υψηλές συχνότητες.

Η φυσική της παραπάνω αλληλεπίδρασης εξαρτάται σημαντικά από το χρόνο που διαρκεί ο παλμός του laser σε σχέση με τους χαρακτηριστικούς χρόνους που ανταποκρίνεται το υλικό. Στην περίπτωση των μετάλλων οι χαρακτηριστικοί χρόνοι που μπορεί να ταλαντωθεί το πλέγμα (ακουστικά ή οπτικά φωνόνια) είναι της τάξης των μερικών picoseconds και σε ειδικές περιπτώσεις μέχρι και μερικές δεκάδες femtoseconds. Για παλμούς laser με διάρκεια nanoseconds μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι η απορρόφηση της ενέργειας από τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας γίνεται ταυτόχρονα με την θέρμανση του πλέγματος και να χειριστεί το θέμα με την κλασσική εξίσωση διάδοσης θερμότητας και κυματικής εξίσωσης. Στην περίπτωση όμως των femtosecond laser η φυσική της αλληλεπίδρασης αλλάζει. Το φως απορροφάται αρχικά από τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και σημαντικός πληθυσμός τους μπορεί να αποκτήσει ενέργειες αρκετά πιο ψηλά από την ενέργεια Fermi. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν υπακούουν στην γνωστή κατανομή Fermi-Dirac με αποτέλεσμα να μπορεί κανείς να τους δώσει στατιστική θερμοκρασιακή τιμή. Για αυτό τον λόγο ονομάζονται μη θερμικά ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν πολύ μεγάλες ταχύτητες της τάξης των  $10^6$  m/s και μπορεί να διεισδύσουν μέσα στο μέταλλο σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις (σε σχέση με το

βάθος διείσδυσης της οπτικής ακτινοβολίας) και να μεταφέρουν την ενέργεια τους μέχρι και εκατοντάδες nanometers μέσα στο υλικό. Σε πολύ λίγο χρόνο μέσω των συγκρούσεων με άλλα ηλεκτρόνια και το πλέγμα τα μη-θερμικά ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια και εν τέλει μεταπίπτουν σε μια κατάσταση που υπακούουν την κατανομή Fermi-Dirac και έτσι μπορεί να τους προσδοθεί στατιστική θερμοκρασία που μπορεί να φτάνει τις αρκετές χιλιάδες βαθμούς Kelvin ενώ την ίδια στιγμή το πλέγμα (και το υλικό) παραμένει κρύο. Έτσι υπάρχουν πλέον δυο συστήματα στο μέταλλο σε θερμική ανισορροπία, τα ηλεκτρόνια και το πλέγμα. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να εισαχθεί σύστημα εξισώσεων (γνωστές ως εξισώσεις Anisimov) που περιγράφουν την θερμική αλληλεπίδραση των δύο συστημάτων. Σε λίγο χρόνο (μερικά picoseconds) η ενέργεια των ηλεκτρονίων θα μεταφερθεί στο πλέγμα και τα δύο συστήματα θα έρθουν σε θερμική ισορροπία. Η θερμοκρασία τελικά του πλέγματος θα ανέλθει πολύ γρήγορα σε εκατοντάδες βαθμούς Kelvin και αυτό θα προκαλέσει μηχανικά κύματα σε υπερ-υψηλές συχνότητες.

Ανάλογα με την ένταση της οπτικής ακτινοβολίας και την φύση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ύλης μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές. Την ελαστική περιοχή όπου το πλέγμα ταλαντώνεται μεν σε υψηλές συχνότητες αλλά επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Την περιοχή όπου το πλέγμα τοπικά θα αποκτήσει πλαστικές ιδιότητες και μπορεί να διαρραγεί μετατρέποντας μέρος του υλικού σε υγρό. Και τέλος την περιοχή που το πλέγμα μπορεί πλήρως να αποδομηθεί και να μετατραπεί σε αέριο πλάσμα.

Τα ναοακουστικά κύματα που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση μπορεί να είναι διαφόρων ειδών και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι έχουμε εγκάρσια και διαμήκη κύματα προς το εσωτερικό του υλικού αλλά και πάνω στην επιφάνεια του με την μορφή συχνά κυμάτων Rayleigh. Τα κύματα αυτά λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος μπορεί να έχουν τεράστιες εφαρμογές στην μελέτη σύνθετων υλικών όσων αφορά της θερμομηχανικές τους ιδιότητες, στην ακριβή μέτρηση του πάχους λεπτών υμενίων με ακρίβεια μερικών ναομέτρων καθώς και στην μελέτη διάδοσης ναοκυμάτων από συνοριακές επιφάνειες σε διαστρωμένα υλικά.

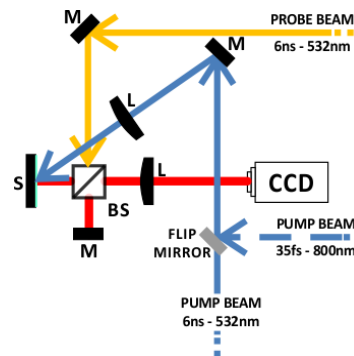
Στην εργασία αυτή θα δείξουμε πειραματικά αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιώντας nanosecond και femtosecond παλμούς laser μελετώντας επιφανειακά κύματα, και αντίστοιχες θεωρητικές μοντελοποιήσεις της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιώντας ένα ρεαλιστικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, και πειραματικά αποτελέσματα μελετώντας διαμήκη κύματα με τη χρήση femtosecond παλμών σε διαστρωμένα υλικά.

## **1. Μελέτη επιφανειακών κυμάτων**

### *1.1. Πειραματική διάταξη & αποτελέσματα*

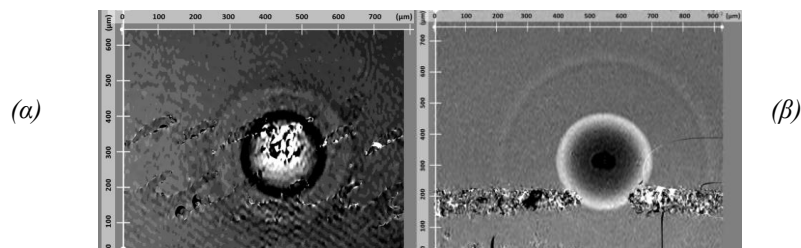
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί εξέλιξη προηγούμενων εργασιών πάνω στην δημιουργία και ανίχνευση υπερήχων [1, 2]. Στην παρούσα πειραματική διάταξη, έγινε συνδυασμός της χρήσης δύο συστημάτων laser. Το πρώτο ήταν ένα Nd:YAG Q-switched (532nm) laser με διάρκεια παλμού 6ns που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία & ανίχνευση υπερήχων). Το δεύτερο ήταν ένα σύστημα ενισχυτή Ti:Sapphire με χρονική διάρκεια παλμού 35fs και κεντρικό μήκος κύματος ~800nm. Στην πειραματική διάταξη (Σχ. 1.1) χρησιμοποιείται

συμβολόμετρο Michelson για την ανίχνευση των υπερήχων στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού (S). Ένας αποσπώμενος καθρέπτης (flip mirror) χρησιμεύει στην επιλογή του συστήματος laser για την δημιουργία του υπερήχου. Η ανίχνευση του υπερήχου γίνεται μέσω του συστήματος ns laser, ενώ για την χρονική καθυστέρηση της δέσμης ανίχνευσης από την δέσμη δημιουργίας του υπερήχου χρησιμοποιείται οπτική καθυστέρησης για το ns σύστημα laser και συνδυασμός ηλεκτρονικής και οπτικής καθυστέρησης για το fs σύστημα laser. Και στις δύο περιπτώσεις η δημιουργία των υπερήχων έγινε από ένα παλμό.



Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης δημιουργίας & ανίχνευσης υπερήχων με την χρήση ns & fs παλμών laser.

Η δημιουργία των υπερήχων έγινε σε φιλμ χρυσού (Au) πάχους 500nm εναποτιθέμενο σε υπόστρωμα fused silica πάχους 1mm. Στο σύστημα φιλμ-υποστρώματος υπήρχαν επιφανειακές ατέλειες ή/και εγκοπές βάθους  $\sim 25\mu\text{m}$ . Στα αποτελέσματα (Σχ. 1.2) που εξήχθησαν μετά από την επεξεργασία των συμβολογραμμάτων παρατηρήθηκε ότι στους υπέρηχους (πλάτους μόνο μερικών nm) που δημιουργήθηκαν από το σύστημα ns laser, οι επιφανειακές ατέλειες δεν εμπόδισαν τους υπέρηχους να διαδοθούν διαμέσου αυτών. Αντίθετα, στους υπέρηχους που δημιουργήθηκαν από το σύστημα fs laser, οι επιφανειακές ατέλειες σταμάτησαν την πορεία των υπερήχων.



Σχήμα 1.2. Πειραματικά αποτελέσματα διάδοσης υπερήχων σε επιφάνεια Au: (α) από παλμό laser 6ns (delay 44ns), και (β) από παλμό laser 35fs (delay 115ns).

## 1.2. Θεωρητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε, παρέχει ταυτόχρονη μελέτη των θερμικών και μηχανικών παραμέτρων όπως καθορίζονται από την θερμική εξίσωση και την εξίσωση διάδοσης κύματος [2]. Η εξίσωση κύματος μελετάει τις μετατοπίσεις του στόχου που ακτινοβολείται, ενώ η θερμική εξίσωση μελετάει τη θερμοκρασιακή κατανομή που δημιουργείται λόγω της απορρόφησης του παλμού laser από το στόχο.

Η θερμική εξίσωση και η εξίσωση διάδοσης του κύματος έχουν αντίστοιχα τη μορφή

$$[K]\{T\} + [C]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{Q - L_i\} \quad (1.1)$$

$$[M]\left\{\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right\} + [S]\{U\} = \{F\} \quad (1.2)$$

όπου  $[K]$  το μητρώο θερμική αγωγιμότητας,  $\{T\}$  το διάνυσμα της θερμοκρασίας,  $[C]$  το μητρώο της ειδικής θερμοχωρητικότητας,  $\{\partial T/\partial t\}$  το διάνυσμα του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας,  $\{Q\}$  το διάνυσμα της πηγής θερμότητας του laser,  $L_i$  η λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα χρόνου ( $i = m$  για τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης και  $i = v$  για τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης), ενώ,  $[M]$  είναι το μητρώο της μάζας,  $[S]$  το μητρώο της ακαμψίας,  $\{U\}$  το διάνυσμα μετατόπισης,  $\{\partial^2 U/\partial t^2\}$  το διάνυσμα επιτάχυνσης και  $\{F\}$  το διάνυσμα δύναμης.

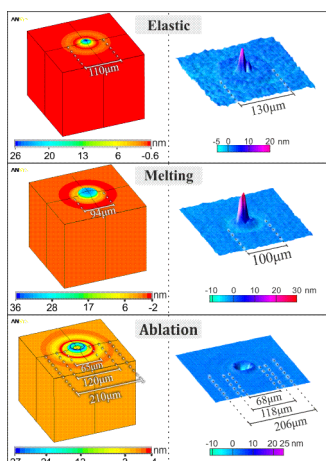
Η πηγή θερμότητας  $Q$  είναι ουσιαστικά η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα όγκου και χρόνου και περιγράφεται από την ακόλουθη Γκαουσιανή κατανομή στο χώρο και στο χρόνο:

$$Q(x, y, z, t) = I_0 e^{-bh(t)-dE_a(t)} (1-R) e^{-4\ln 2(t/t_0)^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)/r_0^2}{\tau_0}} a_b e^{-a_b z} \quad (1.3)$$

όπου  $I_0$  είναι η προσπίπτουσα ένταση ενέργειας του laser στο στόχο,  $R$  είναι η οπτική ανακλαστικότητα του δείγματος,  $a_b$  ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης,  $t_0$  η διάρκεια του παλμού του laser στο πλήρες πλάτος στο μισό του μεγίστου (FWHM) και  $r_0$  είναι η FWHM ακτίνα της δέσμης του laser που ακτινοβολεί το στόχο. Σε χαμηλές πυκνότητες ενέργειας του laser στο στόχο που υπερβαίνουν το κατώφλι για να γίνει αφαίρεση υλικού (ablation threshold), μπορεί να δημιουργηθεί πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας στο στόχο. Ο εκθετικός όρος  $-bh(t)-dE_a(t)$  εισάγεται στην εξίσωση (1.3) για να περιγράψει την απορρόφηση της πυκνότητας ενέργειας του laser λόγω της ύπαρξης πλάσματος, όπου  $E_a$  είναι η πυκνότητα της ενέργειας που απορροφάται,  $h$  είναι το βάθος αφαίρεσης υλικού και  $b$  και  $d$  είναι συντελεστές ανεξάρτητοι του χρόνου [2,3]. Ο εκθετικός αυτός όρος ισούται με 1 για χαμηλές πυκνότητες ενέργειας του laser που δεν ξεπερνούν το απαιτούμενο κατώφλι για να αφαιρεθεί υλικό.

Το τρισδιάστατο 3-D μοντέλο που αναπτύχθηκε δημιουργήθηκε με το εμπορικό λογισμικό ANSYS® 14.5. Μελετήθηκε η χρονικά μεταβαλλόμενη θερμική και μηχανική συμπεριφορά ενός ομογενούς, ελαστικού, ισοτροπικού στόχου (μεταλλικό φιλμ με γυαλί ως υπόστρωμα) όταν ακτινοβολείται με παλμούς laser ns διάρκειας. Για την προσομοίωση αυτή δημιουργήθηκε προσαρμοστικό πλέγμα στην περιοχή που εναποτίθεται η ακτινοβολούμενη ενέργεια [2].

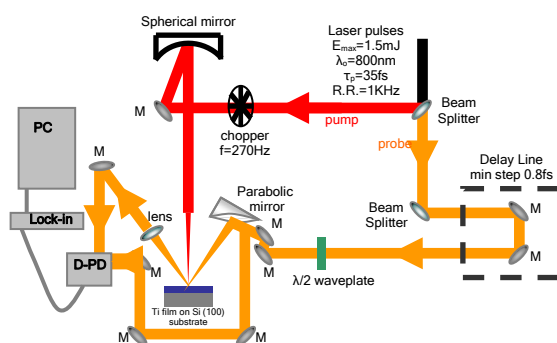
Σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικών αποτελεσμάτων (Σχ. 1.3), σε φιλμ Au χρησιμοποιώντας ενέργειες στην ελαστική, πλαστική και στην περιοχή αποδόμησης (ablation) παρουσιάζει την ισχυρή συμφωνία των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων.



Σχήμα 1.3. Συγκριτική απεικόνιση προσομοίωσης (αριστερά) και πειραματικών αποτελεσμάτων (δεξιά) υπερήχων με ns laser σε φιλμ Au και στην ελαστική, πλαστική και περιοχή αποδόμησης (ablation).

## 2. Μελέτη διαμηκών κυμάτων δημιουργούμενων από fs laser

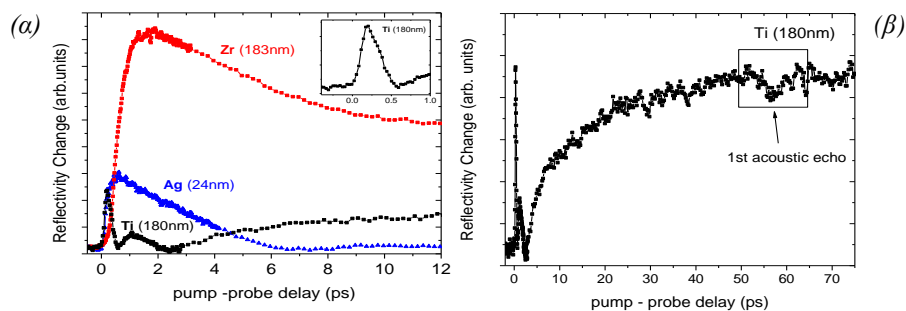
Οι αλλαγές της ανακλαστικότητας της επιφάνειας διαφορετικών μεταλλικών φιλμ, πάχους μερικών nm, πάνω σε υπόστρωμα Si (100), που επάγονται από υπερβραχείους παλμούς laser χρονοδιάρκειας 35fs με επαναληψιμότητα 1kHz, ανιχνεύθηκαν μέσω μίας πειραματικής διάταξης διέγερσης-ανίχνευσης (pump-probe), η οποία φαίνεται στο Σχ. 2.1.



Σχήμα 2.1. Η πειραματική διάταξη pump-probe για τη μέτρηση της αλλαγής της ανακλαστικότητας της επιφάνειας λεπτών μεταλλικών φιλμ σε υπόστρωμα Si (100) (M: Κάτοπτρα, D-PD φωτοδίοδος, PC: Η/Υ)

Η έξοδος του fs laser διαχωρίζεται σε μία υψηλής ενέργειας pump δέσμη και μία χαμηλής ενέργειας probe δέσμη, μέσω ενός 90%-10% διαχωριστή δέσμης. Η pump δέσμη διαμορφώνεται στα 270Hz μέσω ενός μηχανικού chopper και εστιάζεται στη συνέχεια ελαφρά (ελαστική περιοχή) στην επιφάνεια των μεταλλικών δειγμάτων. Η probe δέσμη, αφού περάσει από μία γραμμή χρονικής καθυστέρησης, εστιάζεται στο ίδιο σημείο της επιφάνειας. Διάφορες ενέργειες μέχρι και 50μJ/παλμό χρησιμοποιήθηκαν για τη μη καταστρεπτική διέγερση των μεταλλικών φιλμ. Επίσης, οι δύο δέσμες ρυθμίστηκαν να έχουν κάθετες πολώσεις, μέσω ενός πλακιδίου καθυστέρησης  $\lambda/2$  στη διαδρομή της probe, για την εξάλειψη της μεταξύ τους συμβολής. Η αλλαγή της ανακλαστικότητας ( $<10^{-4}$ ) της επιφάνειας των δειγμάτων ανιχνεύεται μέσω μιας balanced φωτοδιόδου και ενός lock-in amplifier και το τελικό σήμα καταγράφεται στον H/Y μέσω ενός LabView προγράμματος.

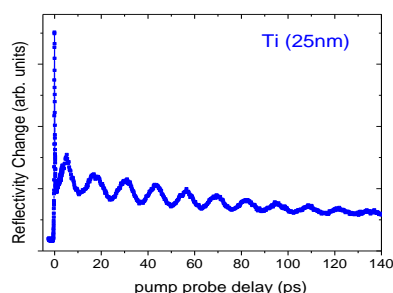
Στο Σχ. 2.2.α φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της αλλαγής της ανακλαστικότητας σε χρόνους έως 12ps, για τρία μέταλλα, Zr, Ag και Ti με πάχη 183, 24 και 180nm, αντίστοιχα, υπό ίδιες συνθήκες διέγερσης (πυκνότητα ενέργειας διέγερσης 19mJ/cm<sup>2</sup>). Παρατηρούνται διαφορές στους χαρακτηριστικούς χρόνους αποκατάστασης για τα τρία μέταλλα (10ps, 6ps και 0.5ps αντίστοιχα) σε πλήρη συμφωνία με τις θεωρητικές τιμές της σταθεράς σύζευξης ηλεκτρονίων-φωνονίων [4]. Επιπλέον αλλαγές προκύπτουν σε μεταγενέστερες χρονικές στιγμές, οι οποίες οφείλονται σε διαφορετικούς φυσικούς μηχανισμούς. Καθώς η H/M ακτινοβολία απορροφάται μέσα στο οπτικό βάθος διείσδυσης του μετάλλου (10-20nm), η επαγόμενη αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα περιορισμένο όγκο δημιουργεί θερμική διαστολή, και έτσι δημιουργείται μια μηχανική διαταραχή στην επιφάνεια που διαδίδεται μέσα στο μέταλλο σαν διαμήκης ακουστικό κύμα (θερμοελαστικό φαινόμενο). Το ελαστικό κύμα ανακλάται στην διεπιφάνεια μετάλλου-υποστρώματος και φτάνει τελικά στην επιφάνεια του μετάλλου (ως echo) όπου προκαλεί αλλαγή στο σήμα της ανακλαστικότητας [5]. Ο χαρακτηριστικός χρόνος που το echo εμφανίζεται εξαρτάται από το πάχος του μεταλλικού φιλμ και την ταχύτητα διάδοσης του μέσα στο συγκεκριμένο υλικό. Στο Σχ. 2.2.β φαίνεται η εμφάνιση του echo στα 57ps, για το Ti πάχους 180nm, χρόνος που αντιστοιχεί στη διάδοση του κύματος στο πάχος του φιλμ, με μία διαμήκη ταχύτητα ήχου ~6100m/s.



Σχήμα 2.2. (α) Αλλαγή της ανακλαστικότητας της επιφάνειας σαν συνάρτηση του χρόνου, για τρία διαφορετικά μέταλλα (Zr, Ag, και Ti) πάνω σε υπόστρωμα Si (100). (β) Ανίχνευση echo στο δείγμα Ti πάχους 180nm.



Επιπλέον πειράματα έγιναν σε λεπτότερα φιλμ Ti με πάχος 25nm, το οποίο είναι συγκρίσιμο με το οπτικό βάθος διείσδυσης (19nm). Στην περίπτωση αυτή, ένα σημαντικό μέρος της οπτικής ακτινοβολίας φτάνει στη διεπιφάνεια μετάλλου-υποστρώματος, διαδίδεται μέσα στο υπόστρωμα Si και στη συνέχεια διαμορφώνεται από το υπάρχον ακουστικό κύμα. Το αποτέλεσμα αυτό καταγράφεται ως ταλαντώσεις (Brillouin oscillations) με χαρακτηριστική χρονική περίοδο, οι οποίες στην περίπτωση μας φαίνονται στο Σχ. 2.3 και έχουν περίοδο ~12.5ps, σε πλήρη συμφωνία με την θεωρητική πρόβλεψη για το Si(100) στο δεδομένο μήκος κύματος.



Σχήμα 2.3. Brillouin oscillations σε Ti πάχους 25nm πάνω σε Si (100).

### 3. Αναφορές

- [1] Y. Orphanos, V. Dimitriou, E. Kaselouris, E. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis and N.A. Papadogiannis «An integrated method for material properties characterization based on pulsed laser generated surface acoustic waves» *Microelectronics Eng.* **112**, pp 249-254 (2013).
- [2] V. Dimitriou, E. Kaselouris, Y. Orphanos, E. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis, and N.A. Papadogiannis, «Three dimensional transient behavior of thin films surface under pulsed laser excitation», *Appl. Phys. Lett.* **103**, 114104 (2013).
- [3] A. V. Bulgakov and N. M. Bulgakova, «Thermal model of pulsed laser ablation under the conditions of formation and heating of a radiation-absorbing plasma», *Quantum Electron.* **29**, pp 433-437 (1999).
- [4] Z. Lin, L.V. Zhigilei, and V. Celli, «Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium», *Phys. Rev. B* **77**, 075133 (2008).
- [5] C. Thomsen, H.T. Grahn, H.J. Maris and J. Tauc, «Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses», *Phys.Rev. B* **34**, pp 4129-4138 (1986).

«Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος "Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση", Πράξη Αρχιμήδης III (Υποέργο 19: «Καινοτόμος οπτοακουστική διάταξη για τον τρισδιάστατο χωροχρονικό μικρο-χαρακτηρισμό σύνθετων υλικών βασισμένη σε υπερβραχείς παλμούς λέιζερ») και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους (Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς 2007-2013)».

Οι συγγραφείς ευχαριστούν ιδιαίτερος τους Δρ. Γεώργιο Κωνσταντινίδη (IESL-FORTH) και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΑΠΘ Δρ. Παναγιώτη Πατσαλά για την προμήθεια των υπό μελέτη δειγμάτων.

**Πρόγραμμα ΕΥΑΙΣΘΟ: η αναπλαισίωση εννοιών  
της ακουστικής με στόχο  
την παραγωγή εκπαιδευτικού υλικού για παιδιά**

Νίκος Μπάρκας<sup>1,a</sup>, Αναστασία Δημητρίου<sup>2,b</sup>, Βασιλεία Χρηστίδου<sup>3,c</sup> & Μαρία Παπαδοπούλου<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Δ.Π.Θ.

<sup>2</sup> Τμήμα Επιστημών της Εκπαίδευσης στην Προσχολική Ηλικία, Δ.Π.Θ.

<sup>3</sup> Παιδαγωγικό Τμήμα Προσχολικής Εκπαίδευσης, Π.Θ.

<sup>a</sup> [nbarkas@arch.duth.gr](mailto:nbarkas@arch.duth.gr), <sup>b</sup> [anadim@otenet.gr](mailto:anadim@otenet.gr), <sup>c</sup> [vchristi@uth.gr](mailto:vchristi@uth.gr), <sup>d</sup> [mariapap@uth.gr](mailto:mariapap@uth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζονται οι διαδικασίες αναπλαισίωσης της επιστημονικής γνώσης για την ακουστική και τις συνέπειες της έκθεσης στο θόρυβο, κατά το σχεδιασμό ενός εκπαιδευτικού προγράμματος για παιδιά μικρών ηλικιών. Η αναπλαισίωση είναι μια σύνθετη διαδικασία μετασχηματισμού της εξειδικευμένης γνώσης για κοινά μη ειδικών. Για την ανάπτυξη του προγράμματος ΕΥΑΙΣΘΟ ήταν αναγκαία η λήψη μίας σειράς αποφάσεων που αφορούν το αντικείμενο (φυσική έννοια του θορύβου) και τον τρόπο προσέγγισης του λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των παιδιών και τους τρόπους με τους οποίους μαθαίνουν.

***Recontextualizing knowledge about acoustics  
in an educational program for raising young children's  
awareness to noise***

## ABSTRACT

*Recontextualization is a complex procedure of reconstructing scientific knowledge for non experts, which includes selection, 'simplification', concentration and handling of scientific knowledge through a combination of scientific principles, pedagogic principles and social selection. The paper presents the procedures for the recontextualization of scientific knowledge in the field of acoustics in the frame of an educational program (<http://noiseawareness.gr>) for raising young children's awareness about noise.*

## Εισαγωγή

Το εκπαιδευτικό πρόγραμμα ευαισθητοποίησης για τις συνέπειες του θορύβου (ΕΥΑΙΣΘΟ, Επιτροπή Ερευνών ΔΠΘ ΚΕ 81346) αναπτύχθηκε ως διεπιστημονική, διαπανεπιστημιακή συνεργασία ερευνητών/τριών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και εκπαιδευτικών της Α/βάθμιας και Β/βάθμιας Εκπαίδευσης στην Αλεξανδρούπολη, στον Βόλο και στη Θεσσαλονίκη, με στόχο την ενημέρωση σχετικά με το θόρυβο και τις συνέπειές του. Προς τούτο αναπτύχθηκε ψηφιακή πλατφόρμα (<http://noiseawareness.gr>) η οποία περιλαμβάνει πληροφοριακό υλικό για τους/τις εκπαιδευτικούς και εκπαιδευτικό υλικό κατάλληλο για την ευαισθητοποίηση των παιδιών (κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά) μικρών ηλικιών στις συνέπειες του θορύβου. Αφορά ένα θέμα της καθημερινότητας που δεν είναι σύνηθες στα σχετικά εκπαιδευτικά εγχειρίδια του Δημοτικού Σχολείου, ενώ είναι παρατηρούνται αντίστοιχες δραστηριότητες στο πλαίσιο της Προσχολικής Εκπαίδευσης στην Ελλάδα. Το εκπαιδευτικό υλικό είχε τη μορφή ενός ανοικτού και ευέλικτου εκπαιδευτικού σεναρίου για παιδιά μικρών ηλικιών (4 - 8ετών) και εκτεινόταν σε 9 εκπαιδευτικές δραστηριότητες (ενδεικτικής διάρκειας περίπου 30 λεπτών έκαστη). Υλοποιήθηκε σε 3 τάξεις νηπιαγωγείων και σε μία δημοτικού σχολείου (Φεβρουάριος - Μάρτιος 2014).

### 1. Εναλλακτικές ιδέες των παιδιών για τον ήχο και το θόρυβο

Κεντρικό μέλημα στο σχεδιασμό εκπαιδευτικού υλικού και δράσεων για έννοιες και φαινόμενα των Φυσικών Επιστημών είναι η εξοικείωση των μαθητών με την επιστημονική σκοπιά αντιμετώπισης των συναφών προβλημάτων. Καθημερινά τα παιδιά αναπτύσσουν εμπειρικά πεποιθήσεις και γνώσεις που συχνά διαφέρουν από την επιστημονική, αλλά και από τη σχολική γνώση για την επιστήμη [1]. Η εξοικείωση των παιδιών με την επιστήμη θα πρέπει να γίνεται με τρόπο κατανοητό και αποτελεσματικό, ώστε να ευνοεί τη μετάβαση των μαθητών από τις αρχικές, βιωματικές και διαισθητικές τους αντιλήψεις σε νέες, συμβατές με την επιστημονική γνώση. Για τα παιδιά, αυτές οι αρχικές αντιλήψεις συνιστούν δομές υποδοχής της νέας γνώσης, ενώ για τους παιδαγωγούς αποτελούν γνώμονα για την επιλογή των στόχων, του περιεχομένου (τι να διδάξουμε) και των διαδικασιών μάθησης (πώς να διδάξουμε). Μ' αυτή τη θεώρηση, ο βαθμός επιτυχίας της εκάστοτε διδακτικής παρέμβασης κρίνεται κυρίως από τη συνεισφορά της στην απαγκίστρωση των παιδιών από τις αρχικές και ανεπαρκείς τους γνώσεις, οι οποίες μέχρι να διδαχθούν συστηματικά στα μαθήματα των Φυσικών Επιστημών αποτελούν το μοναδικό τους ερμηνευτικό πλαίσιο [2].

Οι αρχικές, εναλλακτικές ιδέες των παιδιών για τον ήχο και το θόρυβο δεν έχουν διερευνηθεί επαρκώς. Σύμφωνα με τον Jean Piaget [3] :

-τα παιδιά 4-5 ετών αγνοούν το μέσο της ηχοδιάδοσης, δηλαδή θεωρούν ότι δεν παρεμβάλλεται τίποτε ανάμεσα στην πηγή που εκπέμπει και στο αυτί του ακροατή, -για τα παιδιά 6 ετών οι ήχοι είναι αντικείμενα, έχουν υλικότητα, ακόμη και όταν δεν τους ακούμε,

-από την ηλικία των 7 ετών τα παιδιά αντιλαμβάνονται τον ήχο ως κάτι που κινείται σε «ευθείες γραμμές» προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η υλικότητα του ήχου φαίνεται να είναι παρούσα στις αντιλήψεις των παιδιών μέχρι τουλάχιστον τα 11 έτη, μολοντί σε μικρότερο βαθμό όσο προχωρά η ηλικία

και η εκπαίδευσή τους. Συχνά, τα παιδιά αντιμετωπίζουν τον ήχο σαν υλικό σώμα, το οποίο ωστόσο δεν διαθέτει όλες τις ιδιότητες της ύλης (π.χ. για τα περισσότερα παιδιά της προσχολικής ηλικίας ο ήχος διαθέτει ουσία / substance και διατηρησιμότητα / permanence, αλλά όχι κατ' ανάγκη βάρος) [4].

Όσον αφορά την ηχοδιάδοση, τα μικρά παιδιά, σε μεγάλα ποσοστά, πιστεύουν ότι ο ήχος διαδίδεται γύρω από μία ηχητική πηγή μόνο προς τους ανθρώπους, αλλά όχι προς στο περιβάλλον [4]. Επίσης, συχνά τα παιδιά 4-6 ετών πιστεύουν ότι ο ήχος συνδέεται με τις δικές τους πράξεις ή θεωρούν πως αποτελεί μέρος της πηγής του [5]. Τέλος, η αντίληψη ότι ο ήχος μπορεί να διαδοθεί στο κενό υπάρχει ακόμη και σε παιδιά μεγαλύτερων ηλικιών [6], ενώ τα μικρά παιδιά θεωρούν ότι για να διαδοθεί ένας ήχος θα πρέπει να υπάρχουν 'οπές' σε ένα στερεό σώμα [4].

Από την παραπάνω σύντομη ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας φαίνεται ότι τα παιδιά μικρών ηλικιών έχουν εναλλακτικές ιδέες για τον ήχο και το θόρυβο οι οποίες δεν ταυτίζονται με την επιστημονική γνώση. Η ανάγκη απαγκίστρωσης των μαθητών από τις αρχικές, μη επιστημονικές ιδέες τους, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι ο ήχος είναι ένα σημαντικό ζήτημα της καθημερινής ζωής, καθιστούν το θέμα εξαιρετικά σημαντικό για διδασκαλία [5]. Ειδικότερα όσον αφορά τον θόρυβο, στον οποίο επικεντρώθηκε το εκπαιδευτικό σενάριο, η κατανόηση των συνεπειών του είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς η ηχορρύπανση αποτελεί το υπ' αριθμό δεύτερο (που εξελίσσεται σε πρώτιστο) περιβαλλοντικό πρόβλημα των σύγχρονων κοινωνιών [7] [8]. Ερευνητικά ευρήματα υποδεικνύουν πως η έκθεση των παιδιών στο θόρυβο σχετίζεται με καταστάσεις άγχους, σωματικές και ψυχολογικές διαταραχές, καθώς επίσης και με μαθησιακές δυσκολίες, όπως αδυναμία συγκέντρωσης, κατανόησης, επικοινωνίας και μνήμης [7] [8] [9]. Θεωρώντας δεδομένο πως ο ήχος και ο θόρυβος πρέπει να αποτελούν πεδία διδασκαλίας και μάθησης για μαθητές μικρών ηλικιών, καθώς ανήκουν στο καθημερινό, εμπειρικό τους πεδίο, ζητούμενη είναι η αναζήτηση τρόπων διδασκαλίας που να επικεντρώνονται στα παιδιά, στις αντιλήψεις τους και στους τρόπους με τους οποίους μαθαίνουν. Σε αυτή την κατεύθυνση ιδιαίτερα σημαντική είναι η έννοια της αναπλαισίωσης.

## 2. Η διαδικασία της αναπλαισίωσης

Η επιστημονική γνώση που παράγεται σε πρωτογενές πλαίσιο (σε επιστημονικά εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα) δεν μεταφέρεται αυτούσια στο σχολείο, αλλά αφού υποστεί ένα βαθύτερο μετασχηματισμό, το οποίο ο Basil Bernstein, ονομάζει 'αναπλαισίωση' [10]. Ο όρος αναφέρεται στις διαφοροποιήσεις που υφίσταται η επιστημονική γνώση, ώστε να μετασχηματιστεί σε σχολική γνώση, δηλαδή σε περιεχόμενο των αναλυτικών προγραμμάτων, του εκπαιδευτικού υλικού αλλά και σε περιεχόμενο της ίδιας της διδασκαλίας μέσα στο σχολείο. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, η επιστημονική γνώση αναπαράγεται στο σχολικό περιβάλλον αναπλαισιωμένη μέσα από ένα συνδυασμό επιστημονικών αρχών, παιδαγωγικών θέσεων και κοινωνικών επιλογών. Η αναπλαισίωση λοιπόν περιλαμβάνει την επιλογή, την απλοποίηση, τη συμπύκνωση και την επεξεργασία μέσω της οποίας η επιστημονική γνώση μετασχηματίζεται στη σχολική της εκδοχή [11].

Ωστόσο, θα ήταν χρήσιμο να τονιστούν δύο ουσιώδη χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας. Η αναπλαισίωση δεν είναι μόνο μια απλοποίηση της επιστημονικής γνώσης, αλλά ένας ουσιώδης μετασχηματισμός που εμπλέκει ποικίλες διεργασίες. Η αναπλαισίωση, επίσης, δεν είναι μία ουδέτερη διαδικασία, καθώς, ταυτόχρονα με

την προσαρμογή του επιστημονικού λόγου (για να γίνει κατανοητός στα παιδιά), ο παιδαγωγικός λόγος (στο εκπαιδευτικό υλικό και στο λόγο του διδάσκοντα), λειτουργεί ως πρακτική πολιτισμικής αναπαραγωγής, ως διαδικασία ‘θυροφύλαξης’, με στόχο την επιλογή των ατόμων που μπορούν να επιτύχουν πρόσβαση στο λόγο της επιστήμης και τελικά να ασκήσουν εξουσία μέσω του λόγου της [10] [12].

### 3. Η αναπλαισίωση στο πρόγραμμα ΕΥΑΙΣΘΟ

Για τις ανάγκες του προγράμματος ΕΥΑΙΣΘΟ η επιστημονική γνώση αναφορικά με τον ήχο και το θόρυβο αναπλαισιώθηκε σε δύο επίπεδα, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες αφενός των εκπαιδευτικών και αφετέρου των παιδιών. Βασικές έννοιες και γνώσεις της ακουστικής δόθηκαν σε συνοπτικό κείμενο και σε εκλαϊκευμένη, οπτικοποιημένη ψηφιακή παρουσίαση για τους / τις εκπαιδευτικούς. Η ερευνητική ομάδα επέλεξε έναν κατάλογο βασικών εννοιών της ακουστικής, τις οποίες έκρινε σκόπιμο να αναλυθούν εκτενώς, με διπλό στόχο:

- να παρέχουν στους/στις εκπαιδευτικούς την απαραίτητη θεωρητική κατάρτιση και πληροφόρηση για να υλοποιήσουν με επάρκεια το εκπαιδευτικό σενάριο.
- να υποστηρίξουν την αναμόρφωση των αρχικών, εναλλακτικών ιδεών των μικρών μαθητών σχετικά με τον ήχο, το θόρυβο και τις συνέπειές του στην υγεία.

Οι βασικές –αναπλαισιωμένες- έννοιες της ακουστικής που περιλήφθηκαν στο εκπαιδευτικό υλικό ήταν οι εξής:

1. Ο ήχος και τα χαρακτηριστικά του. Από το σύνολο των διατυπωμένων ορισμών, επιλέχθηκαν δύο, με κοινό χαρακτηριστικό την ανθρωποκεντρική και βιωματική θεώρηση [13], [14]:

- για τους / τις εκπαιδευτικούς, ‘ήχος είναι η σχετική (σε χώρο και χρόνο) μεταβολή της πίεσης του περιβάλλοντος στην περιοχή των αισθητηρίων’, καθώς επίσης και ορισμένα χαρακτηριστικά του (συχνότητα, μήκος κύματος, εύρος ταλάντωσης, μέσο της ηχοδιάδοσης, ύψος, χροιά) σύμφωνα με τις θεωρίες της κυματικής και των ταλαντώσεων,

- για τα παιδιά, ‘ήχος είναι κάθε τι που διεγείρει το αυτί’

2. Η ηχητική ένταση και η μονάδα μέτρησης dB. Όπως παραπάνω, αναδείχθηκε η διπλή σημασία της ηχητικής έντασης, σε αντιδιαστολή με την εναλλακτική παιδική ιδέα της σύγχυσης των ήχων με τις πηγές τους [14], [15]:

- για τους εκπαιδευτικούς επιλέχθηκαν προσεγγίσεις από τη φυσική (‘το παραγόμενο έργο στη μονάδα του χρόνου, ή ο ρυθμός κατανομής της ενέργειας στην έκταση του χώρου’) και από τη φυσιολογία, (‘η μεταβολή της πίεσης ως προς την αντίστοιχη στο κατώφλι της ακοής’). Επίσης εξηγήθηκε η λογαριθμική προσομοίωση των μεταβολών της ανθρώπινης ακουστικής αίσθησης (θεωρία Weber-Fechner) σε συνάρτηση με την γραμμικότητα των φυσικών μεγεθών της έντασης και το λογαριθμικό σύστημα μονάδων decibel.

- στα παιδιά, για την κατανόηση, διάκριση, πρόβλεψη και αξιολόγηση της ακουστικής όχλησης διαφόρων θορύβων του περιβάλλοντος δόθηκαν ψηφιακά ηχόμετρα (θερμόμετρα ήχου) που λειτούργησαν με ανοικτές εφαρμογές σε κινητό τηλέφωνο, όπου αντί για την τυπική (αριθμητική ή διαγραμματική) ένδειξη απέδιδαν τις επιμέρους στάθμες των ηχητικών εντάσεων με χρώματα προφανούς διάκρισης (πράσινο, πορτοκαλί και κόκκινο) και εικονογράμματα με εκφράσεις προσώπου (ευαρέσκεια, ανοχή, ενόχληση).

3. Ο θόρυβος και τα χαρακτηριστικά του. Επιλέχθηκε (για εκπαιδευτικούς και παιδιά) η κεντρική ψυχο-ακουστική θεώρηση:

- 'θόρυβος είναι κάθε ήχος που ενοχλεί' και δόθηκαν (σε σχέση με την εναλλακτική παιδική ιδέα πως θόρυβοι είναι μόνο οι πολύ δυνατοί ήχοι) οι τυπικοί παράγοντες διάκρισης των θορύβων με βάση φυσικά χαρακτηριστικά, αλλά και υποκειμενικά δεδομένα της περίπτωσης και των συμμετεχόντων.

4. Ταξινόμηση (για εκπαιδευτικούς και παιδιά) των θορύβων ως προς το περιβάλλον και τις δραστηριότητες, ώστε να τεθούν σε αμφισβήτηση οι εναλλακτικές παιδικές ιδέες πως οι θόρυβοι παράγονται αποκλειστικά σε αστικό περιβάλλον (εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων), ενώ το φυσικό περιβάλλον είναι πάντα ειδυλλιακό. Οι επιλεγμένες διακρίσεις είναι οι θόρυβοι της φύσης, οι αστικοί θόρυβοι, οι κυκλοφοριακοί θόρυβοι και οι θόρυβοι του εργασιακού περιβάλλοντος. Για την αξιολόγηση γνωστών και άγνωστων θορύβων, τα παιδιά επιδόθηκαν στην πρόβλεψη και μέτρηση διαφόρων περιστάσεων (στην τάξη, στην αυλή, σε δρόμο, σε μικρούς περίπατους).

5. Έκταση και βαρύτητα της ακουστικής όχλησης [16] [17]. Σε αναφορά με την εναλλακτική παιδική ιδέα πως οι θόρυβοι είναι εξίσου ενοχλητικοί για όλους τους ανθρώπους (ή ότι οι άνθρωποι ενοχλούνται εξίσου από τους ίδιους ήχους, κάθε φορά), περιγράφηκε (για εκπαιδευτικούς και παιδιά) η πολυ-παραμετρικότητα του προβλήματος σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά του θορύβου (ένταση, συχνοτικό φάσμα, διάρκεια, ρυθμός και επαναληψιμότητα, απόσταση και σχετική θέση της πηγής), τον χώρο έκθεσης (τοπογραφία και πολεοδομική οργάνωση της περιοχής), αλλά και την υποκειμενική διάσταση του θορύβου (περίστασης της επικοινωνίας, προσδοκώμενη άνεση).

6. Επιπτώσεις του θορύβου στην υγεία. Σε αναφορά με την εναλλακτική παιδική ιδέα πως οι θόρυβοι είναι απλώς ενοχλητικοί, δεν βλάπτουν σοβαρά την υγεία και οι συνέπειες της έκθεσης είναι πρόσκαιρες, επισημάνθηκε [8] [17]:

- στους εκπαιδευτικούς, τα πρόσφατα πορίσματα της WHO (εκτιμώμενες απώλειες σε προσδόκιμα υγιή χρόνια ζωής, τάση εξέλιξης του θορύβου σε πρώτιστο κίνδυνο για την υγεία των κατοίκων της Δ. Ευρώπης την επόμενη 20ετία),

- στα παιδιά, ότι οι προσβολές της ακοής είναι αθροιστικές και οι βλάβες συνήθως ανεπανόρθωτες.

#### **4. Αντί επιλόγου - ευχαριστίες**

Κομβική επιλογή του προγράμματος ΕΥΑΙΣΘΟ είναι να απευθυνθούμε σε παιδιά, χωρίς διδασκασμό, ενισχύοντας τη μάθηση αντί της διδασκαλίας. Επιδιώξαμε να αναπτύξουμε ένα μαθητο-κεντρικό υλικό λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες κατανόησης και τις εναλλακτικές ιδέες τους για τα σχετικά φυσικά φαινόμενα επειδή δεν υπάρχουν εκπαιδευτικά υλικά ευαισθητοποίησης για τις συνέπειες του θορύβου κατάλληλα για παιδιά μικρών ηλικιών και ό,τι συνήθως διατίθεται αφορά μετατροπές υφιστάμενων υλικών για ενήλικες. Επιπλέον, επειδή τα παιδιά δεν κατανοούν τις έννοιες των φυσικών επιστημών όπως οι μεγάλοι, αλλά μαθαίνουν με ποικίλους τρόπους βιώνοντας και διερευνώντας ενεργητικά, η διάχυση των ειδικών γνώσεων για το θόρυβο σε μεγάλες ομάδες πληθυσμού απαιτεί τη διαμεσολάβηση καταρτισμένων εκπαιδευτικών. Τέλος, για να κερδηθεί στις νέες γενιές η μάχη της ακουστικής απέναντι στο θόρυβο, που δείχνει καταδικασμένη στο πεδίο των πολιτιστικών στερεοτύπων, οι όποιες εκπαιδευτικές παρεμβάσεις έχει νόημα να

απευθύνονται σε παιδιά μικρών ηλικιών, τα οποία δεν έχουν εμπεδώσει ακόμη στάσεις και συμπεριφορές που να συνδέουν το θόρυβο με το life style.

Η ερευνητική ομάδα: Ν. Μπάρκας, επιστημονικός υπεύθυνος, Α. Δημητρίου, Μ. Παπαδοπούλου και Β. Χρηστίδου μέλη της επιστημονικής ομάδας, Ν. Εμμ. Αγγουριδάκης, Σ. Βουδηλάκη, Σ. Γραμμένος, Λ. Κούτνα, Μ. Κούτσικου, Έμη Μαλκοπούλου, Α. Οικονόμου, Α. Ρουσίδου και Σ. Θεοδοσίου συνεργάτες – ερευνητές, ευχαριστεί τους μαθητές και τις μαθήτριες του Νηπιαγωγείου Ν. Χηλής (Αλεξανδρούπολη), του 24ου Νηπιαγωγείου Βόλου, του 23ου Νηπιαγωγείου Αλεξανδρούπολης, του 31ου Δημοτικού Σχολείου Βόλου (β' τάξη) και του 28ου Γυμνασίου Θεσσαλονίκης (γ' τάξη) για τη συμμετοχή τους στο πρόγραμμα.

## 6. Αναφορές

- [1] J. Lautrey, S. Remi-Giraud, E. Sander, & A. Tiberghien (2008) *Les connaissances naïves*, Armand Colin, Paris (chapitre 1) (2008)
- [2] Β. Κουλαϊδής «Διδακτική των Φυσικών Επιστημών : αντικείμενο και αναγκαιότητα» στο *Διδακτική των Φυσικών Επιστημών*, Κ. Δημόπουλος & Β. Χατζηνικήτα (επιμέλεια), ΕΑΠ, Τόμος Α' σελίδες. 25-50 (2001)
- [3] J. Piaget *Les explications causales* PUF, Paris (1971)
- [4] Κ. Mazens & J. Lautrey «Conceptual change in physics: children's naive representations of sound» *Cognitive development*, 115, pp 1-18 (2003).
- [5] Η. Eschach «Development of a student-centered instrument to access middle school students' conceptual understanding of sound» *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 10, pp 1-14.
- [6] Ι. Caleon & R. Subramanian «Development and application of a three-tier diagnostic test to assess secondary students' understanding of waves» *International Journal of Science Education*, 32 (7), pp. 939–961 (2010).
- [7] D. Prasher «A European concerted action on noise pollution health effects reduction – NOPHER» *Noise Health* 2, pp. 1-3. (2000).
- [8] WHO: *Burden of Disease from Environmental Noise: quantification of healthy life years lost in Europe*, World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011, Copenhagen Denmark
- [9] Β. Shield & J. Dockrell «The effects of noise on children at school: a review» *Journal of Building Acoustics* 10(2), pp. 97-106 (2003).
- [10] Β. Bernstein *The structure of Pedagogic Discourse* Routledge, London (1990).
- [11] Β. Κουλαϊδής, Κ. Δημόπουλος, Σ. Σκλαβενίτη, & Β. Χρηστίδου, Β. *Τα κείμενα της Τεχνο-επιστήμης στον δημόσιο χώρο* Μεταίχμιο, Αθήνα (2002).
- [12] Μ. Ποιμενίδου *Ο παιδαγωγικός λόγος στο νηπιαγωγείο. Μελέτη των αποκλίσεων στην οργάνωση των κειμενικών ειδών και τη συγκρότηση του νοήματος* Αδημοσίευτη διδακτορική διατριβή, Π.Τ.Π.Ε., Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (2008).
- [13] Μ. Bruneau *Introduction aux Théories de l'Acoustique*, πανεπιστημιακή έκδοση, Le Mans (1984).
- [14] R. Lehmann *Éléments de Physio et de Psycho Acoustique* Dunod, Paris (1969).
- [15] P. Lienard *Décibels et Indices de Bruit*, Masson, 1978, Paris.
- [16] Ν. Μπάρκας *Δομική Φυσική - Ηχομόνωση* πανεπιστημιακές εκδόσεις ΔΠΘ, Ξάνθη (2004).

[17] ΕΛΥΑΝΕ: *Ο θόρυβος, αυτός ο άγνωστος* Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας, Αθήνα (2007).



# **Ένα μοντέλο Nx2D για τον υπολογισμό της διάδοσης ακουστικών σημάτων στη θάλασσα σε περιβάλλοντα με τρισδιάστατη γεωμετρία**

Μιχάλης Ταρουδάκης

Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης  
Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών,  
Ν. Πλαστήρα 100, 70013 Ηράκλειο

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο ακουστικής διάδοσης για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου σε θαλάσσιους κυματοδηγούς όταν η γεωμετρία του περιβάλλοντος έχει τρισδιάστατο χαρακτήρα. Χρησιμοποιείται σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και θεωρία κανονικών ιδιομορφών συζευγμένων ως προς την απόσταση (*coupled mode theory*) αλλά χωρίς σύζευξη ως προς το αζιμούθιο. Εφαρμογές αυτής της τεχνικής έχουμε σε προβλήματα ακουστικής τομογραφίας στη θάλασσα οπότε το πεδίο μας χωρίζεται σε κάθετες ως προς την επιφάνεια τομές. Παρουσιάζεται με συντομία η θεωρία των συζευγμένων ιδιομορφών για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου σε περιοχή με τοπική ανομοιογένεια στις κάθετες τομές και με χρήση παραδειγμάτων παρουσιάζεται η λύση του προβλήματος στο πεδίο των συχνοτήτων και συζητείται η ποιοτική συμπεριφορά του μοντέλου.

## ***A Nx2D model for calculating the propagation of sound signals in 3-D oceanic environments***

### **ABSTRACT**

*A simple model for the calculation of the acoustic field in 3-D oceanic environments where the inhomogeneity is of compact support is presented. A cylindrical co-ordinate system is used and Normal Mode solution of the Helmholtz equation is considered. Full coupling between modes is assumed in vertical slices defined on the basis of the azimuth angles from the origin, but no coupling is assumed between slices defined at different angles. The approach is known as Nx2D and has applications in problems of ocean acoustic tomography.*

## Εισαγωγή

Η εργασία αναφέρεται στο πρόβλημα της διάδοσης του ήχου σε θαλάσσιους κυματοδηγούς με τρισδιάστατη γεωμετρία η οποία ωστόσο περιλαμβάνει περιορισμένη γεωμετρικά ανομοιομορφία (compact support). Στην εργασία παρουσιάζεται μία απλουστευμένη διαδικασία σύνθεσης του τρισδιάστατου ακουστικού πεδίου από γνωστή σημειακή μονοχρωματική πηγή που θεωρείται κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί σε αντίστροφα προβλήματα ακουστικής τομογραφίας, σύμφωνα με τα οποία το τρισδιάστατο θαλάσσιο περιβάλλον περιγράφεται μέσω  $N$  κάθετων τομών (slices) και ανασυντίθεται μέσω αυτών. Η διάδοση σε κάθε τομή θεωρείται ανεξάρτητη της διάδοσης σε κάθε άλλη με αποτέλεσμα να αμελείται η σύζευξη της ακουστικής διάδοσης στο αζιμούθιο. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως διάδοση  $N \times 2D$  (αντί για  $3D$ ). Στην εργασία θεωρείται ότι η διάδοση σε κάθε τομή παρουσιάζει πλήρη χαρακτηριστικά σύζευξης. Η περίπτωση που παρουσιάζεται ως εφαρμογή στην εργασία αφορά κωνική ανύψωση του πυθμένα αλλά η θεωρία εφαρμόζεται γενικότερα σε κάθε τρισδιάστατη ανομοιογένεια περιορισμένης έκτασης. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να συγκριθούν με αποτελέσματα που έχουν παρουσιασθεί για το εν λόγω πρόβλημα (κωνική ανύψωση) με πλήρη σύζευξη στο αζιμούθιο [1-2]. Το πλεονέκτημα της παρουσιαζόμενης θεώρησης είναι ότι δίνει πολύ καλά αποτελέσματα με μικρότερο χρόνο εκτέλεσης του σχετικού προγράμματος και τέλος μπορεί να δώσει αποτελέσματα για μεγάλες συχνότητες, κάτι που είναι δύσκολο με τις γνωστές  $3D$  θεωρήσεις.

### 1. Το πρόβλημα της ακουστικής διάδοσης σε τρισδιάστατο θαλάσσιο κυματοδηγό.

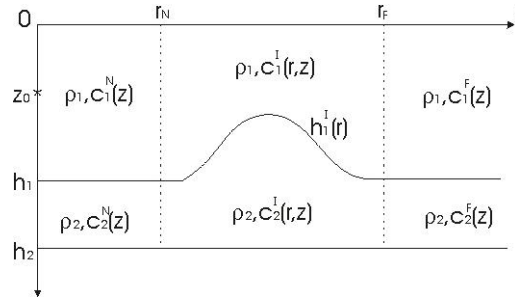
*1.1. Το πρόβλημα και η λύση του με ανάπτυγμα σε σειρά ιδιοσυναρτήσεων σε περιβάλλον αξονικής συμμετρίας*

Θεωρούμε το περιβάλλον που φαίνεται στο σχήμα 1.1. Η πυκνότητα  $\rho$  θα θεωρηθεί ανεξάρτητη από την απόσταση. Η υδάτινη στήλη συναντά τον πυθμένα σε διεπιφάνεια βάθους  $h_1(r)$  κάτω από την οποία υπάρχει ρευστός πυθμένας που τερματίζεται σε επίπεδο σύνορο σε βάθος  $h_2$  με οριακή συνθήκη ακλόνητου πυθμένα. Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος απαιτούν επιπλέον επιφάνεια ελεύθερη πίεσεων συνέχεια της πίεσης και της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας των στοιχειωδών σωματιδίων στη διεπιφάνεια και συνθήκη ακτινοβολίας του Sommerfeld. Η ανομοιογένεια περιορίζεται ανάμεσα στις αποστάσεις  $r_N$  και  $r_F$ .

Για μία σημειακή αρμονική πηγή σε βάθος  $z_0$ , η κυματική εξίσωση (Helmholtz) για την ακουστική πίεση  $p(r,z)$  γράφεται :

$$\frac{\partial^2 p(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 p(r,z)}{\partial z^2} + k^2(r,z)p(r,z) = -\frac{1}{2\pi r} \delta(r)\delta(z-z_0) . \quad (1.1)$$

όπου  $k(r, z) = \omega/c(r, z)$  είναι ο αριθμός κύματος και  $c(r, z)$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου.



Σχήμα 1.1. Ένα περιβάλλον μεταβαλλόμενων συναρτήσεων της απόστασης παραμέτρων σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Παρουσιάζονται οι βασικές γεωακουστικές παράμετροι του προβλήματος, ταχύτητα ( $c$ ) και πυκνότητα ( $\rho$ ).

Σε κάθε απόσταση  $r$ , θα θεωρήσουμε την ομάδα ιδιοσυναρτήσεων  $u_n(r, z)$  του «τοπικού» προβλήματος βάθους:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial u_n(r, z)}{\partial z} \right] + \left[ \frac{k^2(r, z)}{\rho(z)} - \frac{\lambda_n(r)}{\rho(z)} \right] u_n(r, z) = 0, \quad (1.2)$$

όπου 
$$u_n(r, z) = \begin{cases} u_n^{(1)}(r, z) & \text{για } 0 \leq z \leq h_1(r) \\ u_n^{(2)}(r, z) & \text{για } h_1(r) \leq z \leq h_2 \end{cases}$$

$$k(r, z) = \begin{cases} k^{(1)}(r, z) & \text{για } 0 \leq z \leq h_1(r) \\ k^{(2)}(r, z) & \text{για } h_1(r) \leq z \leq h_2 \end{cases}$$

$$\rho(z) = \begin{cases} \rho_1 & \text{για } 0 \leq z \leq h_1(r) \\ \rho_2 & \text{για } h_1(r) \leq z \leq h_2 \end{cases}$$

και 
$$u_n^{(1)}(r, 0) = 0, \quad (1.3\alpha)$$

$$u_n^{(1)}(r, h_1(r)) = u_n^{(2)}(r, h_1(r)), \quad (1.3\beta)$$

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial u_n^{(1)}(r, h_1(r))}{\partial z} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial u_n^{(2)}(r, h_1(r))}{\partial z}, \quad (1.3\gamma)$$

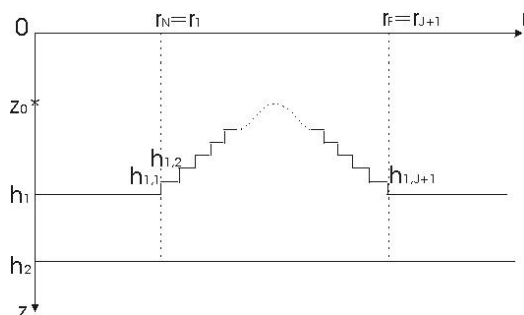
$$\frac{\partial u_n^{(2)}}{\partial z}(r, h_2) = 0 \quad . \quad (1.3\delta)$$

Γνωρίζουμε ότι υπό τις ανωτέρω συνθήκες, το πρόβλημα βάθους είναι ένα κανονικό πρόβλημα ιδιοτιμών τύπου Sturm-Liouville (με διεπιφάνεια), και ότι οι ιδιοσυναρτήσεις αποτελούν ένα ορθοκανονικό σύστημα. Επιπλέον είναι πλήρεις στο  $[0, h_2]$  οπότε μπορούμε να γράψουμε την λύση για την πίεση ως μία συγκλίνουσα σειρά.

$$p(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(r) u_n(r, z) \quad . \quad (1.4)$$

Ο υπολογισμός των ιδιοτιμών γίνεται με λύση της χαρακτηριστικής εξίσωσης του προβλήματος 1.3 ο υπολογισμός των ιδιοσυναρτήσεων από τη λύση του προβλήματος βάθους και ο υπολογισμός των συντελεστών  $\varphi_n(r)$  μέσω θεωρίας συναρτήσεων Green ως κατωτέρω [3,4].

## 1.2 Η Διακριτοποίηση



Σχήμα 1.2. Διακριτοποίηση της ανομοιογένειας ανάμεσα στο  $r_N$  και το  $r_F$ .

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε χωρική διακριτοποίηση  $J$  στοιχείων στην ανομοιογένεια όπως στο σχήμα 1.2 προκειμένου να καταστεί δυνατή η αριθμητική αντιμετώπιση του προβλήματος και ο ορισμός τοπικών ιδιοτιμών-ιδιοσυναρτήσεων σε καθένα από τα  $J+2$  διακριτά τμήματα του περιβάλλοντος (κυματοδηγού). Από την πηγή μέχρι την αρχή της ανομοιογένειας θεωρούμε επί πλέον το εγγύς πεδίο (Near Field) και από το τέλος της ανομοιογένειας μέχρι το άπειρο το άπω πεδίο (Far Field). Κάτω από αυτές τις συνθήκες ορίζουμε διακριτά προβλήματα βάθους (εξισώσεις 1.3) για τα  $J+2$  τμήματα του κυματοδηγού με τις ανάλογες ιδιοτιμές  $\lambda_{n,j}$  και ιδιοσυναρτήσεις  $u_{n,j}(z)$ ,  $j = 1, \dots, J+2$ .

Στη συνέχεια μπορούμε να δείξουμε [4] ότι η λύση του προβλήματός μας στα διάφορα χωρία διακριτοποίησης δίδεται από τις σχέσεις :

$$p_N(r, z) = \frac{1}{4\rho_1} \sum_{n=1}^M u_{n,N}(z_0) u_{n,N}(z) H_0^{(1)}(\sqrt{\lambda_{n,N}} r) + \sum_{n=1}^M C_{n,N} J_0(\sqrt{\lambda_{n,N}} r) u_{n,N}(z), \quad (1.5\alpha)$$

$$p_j(r, z) = \sum_{n=1}^M \left\{ A_{n,j} H_0^{(1)}(\sqrt{\lambda_{n,j}} r) + B_{n,j} H_0^{(2)}(\sqrt{\lambda_{n,j}} r) \right\} u_{n,j}(z), \quad j=1, 2, \dots, J \quad (1.5\beta)$$

$$p_F(r, z) = \sum_{n=1}^M A_{n,F} H_0^{(1)}(\sqrt{\lambda_{n,F}} r) u_{n,F}(z), \quad (1.5\gamma)$$

όπου έχουμε διατηρήσει ως μέγιστο αριθμό ιδιομορφών  $M$  αυτές που αντιστοιχούν στις διαδιδόμενες ιδιομορφές (Normal Modes) που έχουν συνεισφορά σε αποστάσεις μακριά από την πηγή και  $H_0^{(*)}(x)$ ,  $*$  = 1, 2 είναι οι συναρτήσεις Hankel μηδενικής τάξης πρώτου και δεύτερου είδους που εκφράζουν αποκλίνοντα και συγκλίνοντα κύματα αντίστοιχα και  $J_0(x)$  είναι συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης.

Εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες συνέχειας της πίεσης και της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου στις κατακόρυφες, τεχνητές διεπιφάνειες, και αξιοποιώντας τη συνθήκη ορθοκανονικότητας των ιδιοσυναρτήσεων, υπολογίζουμε λύνοντας ένα γραμμικό σύστημα  $2 \times M \times (J+1)$  εξισώσεων τους ισάριθμους άγνωστους συντελεστές της αναπαράστασης της λύσης. Το σύστημα είναι καλώς τεθειμένο [4]. Στη λύση εισάγονται και οι συντελεστές σύζευξης ως κατωτέρω, που εκφράζουν ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα στις ιδιομορφές της λύσης.

$$C_{1mn} = \int_0^{h_2} \frac{1}{\rho_j} u_{m,j} u_{n,j+1} dz, \quad (1.6\alpha)$$

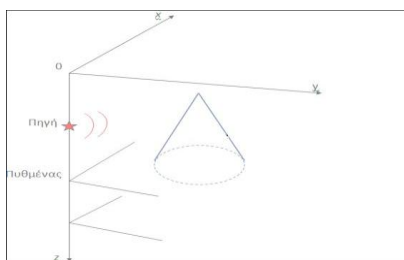
$$C_{2mn} = \int_0^{h_2} \frac{1}{\rho_{j+1}} u_{m,j} u_{n,j+1} dz. \quad (1.6\beta)$$

Τα παραπάνω ολοκληρώματα υπολογίζονται αριθμητικά. Η λύση του προβλήματός μας είναι ακριβής με τον περιορισμό της διακριτοποίησης του χωρίου της ανομοιογένειας. Η εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου για τον υπολογισμό της ακουστικής πίεσης σε περιβάλλον μεταβαλλόμενων παραμέτρων έχει υλοποιηθεί μέσω του προγράμματος MODE4 το οποίο επί πλέον χρησιμοποιεί μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών του προβλήματος στην περίπτωση μεταβαλλόμενης με το βάθος ταχύτητας διάδοσης του ήχου.

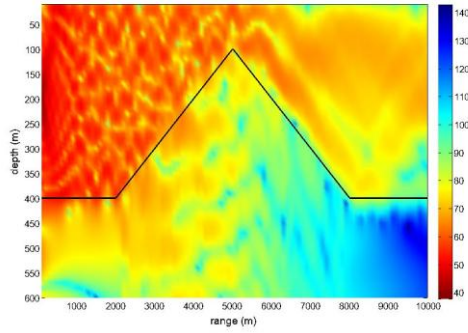
### 1.2. Εφαρμογή στις 3 διαστάσεις με πολλαπλές τομές.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν η γεωμετρία παρουσιάζει τρισδιάστατο χαρακτήρα, μία μέθοδος που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ιδιαίτερα όταν η ανομοιογένεια βρίσκεται μακριά από την πηγή, είναι αυτή στην οποία θεωρούμε από τη σημειακή πηγή κάθετες τομές που «σαρώνουν» την ανομοιογένεια, σε κάθε μία από τις οποίες θεωρείται δισδιάστατη γεωμετρία. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την επίλυση του προβλήματος την προαναφερθείσα μέθοδο των συζευγμένων ιδιομορφών (coupled modes). Θεωρώντας ότι δεν ανταλλάσσεται ενέργεια ως προς το αζιμούθιο, λύνουμε το πρόβλημα για όλες τις κάθετες τομές και στη συνέχεια με παρεμβολή υπολογίζουμε το ακουστικό πεδίο σε κάθε σημείο του τρισδιάστατου κυματοδηγού. Επομένως στις λύσεις του προβλήματος όπως αυτές αποτυπώνονται στις 1.5 προσθέτουμε ένα ακόμη δείκτη ( $l$ ) που αναφέρεται στην κάθετη τομή σε κάθε γωνία  $\theta_l$ . Το σχήμα 1.3 αποτυπώνει τα παραπάνω σε μία περίπτωση που η τοπική ανομοιογένεια έχει κωνική μορφή, που θα είναι και η περίπτωση που θα δούμε στη συνέχεια ως εφαρμογή.

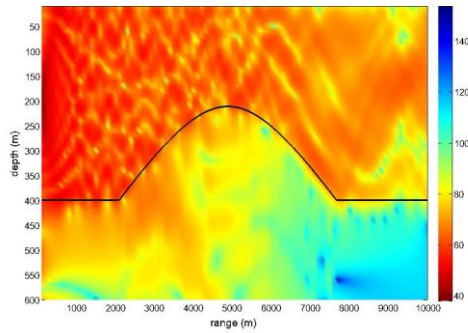
Θεωρούμε λοιπόν το περιβάλλον που περιγράφεται από το σχήμα 1.3. Το βάθος της θάλασσας εκτός κώνου είναι 400 m ενώ ο κώνος έχει διάμετρο 4000 m, ύψος 300 m, και ο άξονάς του βρίσκεται σε απόσταση (range) 5000 m από την πηγή. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό θεωρείται σταθερή και ίση με 1500 m/sec, ενώ για τον πυθμένα θεωρούμε πυκνότητα 1500 kg/m<sup>3</sup> και ταχύτητα διάδοσης του ήχου 1800 m/sec. Για υπολογιστικούς λόγους θεωρούμε και ένα δεύτερο (τεχνητό) πυθμένα σε μεγάλο βάθος με πολύ σκληρό υλικό προκειμένου να έχουμε προσέγγιση της μοντελοποίησης του τέλεια ανακλαστικού πυθμένα που επιβάλλει η θεωρία. Για την επίλυση του προβλήματος με τη μέθοδο των πολλαπλών τομών, θα θεωρήσουμε γωνίες ως προς το αζιμούθιο από  $-40^\circ$  έως  $40^\circ$  και θα λάβουμε τομές ανά 2 μοίρες. Σε κάθε μία από τις τομές αυτές υπολογίζουμε το ακουστικό πεδίο για μια σημειακή ηχητική πηγή που εκπέμπει στα 50 Hz και βρίσκεται σε βάθος 200 m. Παράδειγμα υπολογισμού δίνουμε στα σχήματα 1.4. και 1.5 που αφορούν διάδοση στην τομή που περνά από τον άξονα του κώνου και σε γωνία μοιρών. Στο σχήμα 1.6 δίδεται το ηχητικό πεδίο σε βάθος 100 m για όλο το περιβάλλον από  $-40,5$  έως  $40,5$  μοίρες. Σε όλα τα σχήματα η επίδραση της ανύψωσης είναι εμφανής.



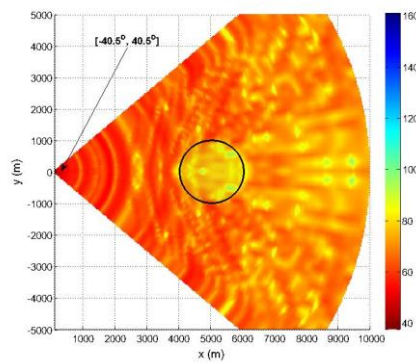
Σχήμα 1.3. Το περιβάλλον του παραδείγματος. Η επιφάνεια της θάλασσα είναι επίπεδη και βρίσκεται στη θέση  $z=0$ .



Σχήμα 1.4. Το ηχητικό πεδίο σε τομή οριζόμενη από τον άξονα του κώνου.



Σχήμα 1.5. Το ηχητικό πεδίο σε τομή οριζόμενη από γωνία  $27,5^{\circ}$  ως προς το αξιμούθιο



Σχήμα 1.6. Το ηχητικό πεδίο σε οριζόντια τομή σε βάθος 200 μέτρων. Στο σχήμα φαίνεται και η τομή με τον κώνο

## 2. Σχολιασμός

Στην εργασία παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και ένα παράδειγμα εφαρμογής μιας μεθόδου που στη βιβλιογραφία χαρακτηρίζεται  $N \times 2D$  (η πολλαπλών τομών) για τον προσεγγιστικό υπολογισμό του ηχητικού πεδίου σε θαλάσσιο κυματοδηγό που παρουσιάζει τοπική τρισδιάστατη ανομοιομορφία. Στο παράδειγμα που δόθηκε και αφορούσε ανύψωση πυθμένα με κωνικό σχήμα η επίδραση της ανομοιογένειας ήταν εμφανής. Στα σχήματα 1.4 και 1.5 μπορούμε να διακρίνουμε εύκολα την διαφυγή ακουστικής ενέργειας προς τον πυθμένα και τη μείωση των διαδιδόμενων κανονικών ιδιομορφών στην περιοχή της ανύψωσης. Η διαφυγή ενέργειας στον πυθμένα δεν ανακτάται πίσω από την ανομοιογένεια παρά μόνο σε μεγάλες γωνίες ως προς το αξιμούθιο, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 1.6. αλλά και παρατηρώντας τη μορφή του ακουστικού πεδίου στις κάθετες τομές που παρουσιάζονται στα σχήματα 1.4 και 1.5. Η χαρακτηριστική δομή του ακουστικού πεδίου πίσω από μία κωνική ανομοιογένεια έχει παρατηρηθεί και στις προηγούμενες εργασίες που αφορούν την ίδια γεωμετρική περίπτωση ([1-2]). Δεν έγινε ωστόσο σύγκριση σε απόλυτα μεγέθη με αποτελέσματα που προέρχονται από τη λύση του προβλήματος με μεθόδους που λαμβάνουν υπ όψιν τους εναλλαγή ενέργειας κατά το αξιμούθιο, κάτι που είναι στις μελλοντικές προθέσεις του συγγραφέα, όπως επίσης είναι στις προθέσεις του η εφαρμογή της μεθόδου σε ειδικά περιβάλλοντα (σφήνες) που αποτελούν προβλήματα αναφοράς για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου σε τρισδιάστατα θαλάσσια περιβάλλοντα.

## 3. Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΦΥΚΑ της Δράσης ΚΡΗΠΠΣ της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα. Ευχαριστώ επίσης τον υποψήφιο Διδάκτορα Κώστα Σμαραγδάκη για τη βοήθειά του στην παραγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην εργασία

## 5. Αναφορές

- [1] Taroudakis M.I. "A Coupled-Mode Formulation for the Solution of the Helmholtz Equation in the Water in the Presence of a Conical Seamount", *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 4, No 1, pp 101-121 (1996).
- [2] Luo W. and Schmidt, H. "Three-dimensional propagation and scattering around a conical seamount," *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 52-65 (2009).
- [3] Boyles, Allan: *Acoustic Waveguides. Applications to Oceanic Science*, John Wiley, (1984).
- [4] Taroudakis M.I., Athanassoulis G.A. and Ioannidis J.P. "A Hybrid Solution of the Helmholtz Equation in Shallow Water, Based on a Variational Principle" in *Acoustique Sous Marine et Ultrasons*, CNRS-LMA, Marseille, pp. 213-227 (1991).



# **Παραμετρική ανάλυση του συντελεστή ανάκλασης από στρωματοποιημένο πυθμένα δύο στρωμάτων με επικλινή διεπιφάνεια<sup>1</sup>**

Π. Παπαδάκης<sup>1,a</sup>, Γ. Πιπεράκης<sup>1,b</sup> & Μ. Καλογεράκης<sup>2,1,c</sup>

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ν. Πλαστήρα 100, Βασιλικά Βουτών, 70 013 Ηράκλειο

<sup>2</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. - ΤΕΙ Κρήτης  
Εσταυρωμένος 71 004 Ηράκλειο

<sup>a</sup> [panos@iacm.forth.gr](mailto:panos@iacm.forth.gr), <sup>b</sup> [piperak@iacm.forth.gr](mailto:piperak@iacm.forth.gr), <sup>c</sup> [mixalis@iacm.forth.gr](mailto:mixalis@iacm.forth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Ο συντελεστής ανάκλασης μονοχρωματικού επιπέδου κύματος από στρωματοποιημένο πυθμένα ο οποίος αποτελείται από δύο στρώματα που η διεπιφάνεια μεταξύ τους δεν είναι παράλληλη με την διεπιφάνεια του πρώτου στρώματος με το νερό, έχει μελετηθεί από τους συγγραφείς και έχει αναπτυχθεί η μαθηματική του διατύπωση. Στην εργασία αυτή μελετάται η εξάρτηση της τιμής του συντελεστή ανάκλασης από τις παραμέτρους του προβλήματος. Οι παράμετροι αυτοί είναι οι φυσικές και ακουστικές παράμετροι των υλικών που αποτελούν τον πυθμένα καθώς και οι γεωμετρικές παράμετροι του μοντέλου.*

## ***Parametric Analysis of the Reflection Coefficient from a Two Layered Sea Floor with Oblique Interface.***

### **ABSTRACT**

*The reflection coefficient of a plane wave from a two layered sea floor with non-parallel interface between the layers has been studied by the authors and its mathematical foundation has been developed. In this work the dependence of the acoustical, physical and geometrical parameters which characterize the model on its value are examined. This analysis is necessary in the design and utilization of inversion techniques for the estimation of these parameters in the case where the reflection coefficient is known from measurements in the laboratory or at the field.*

---

<sup>1</sup> Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΦΥΚΑ της Δράσης ΚΡΗΠΣ της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα.

## Εισαγωγή

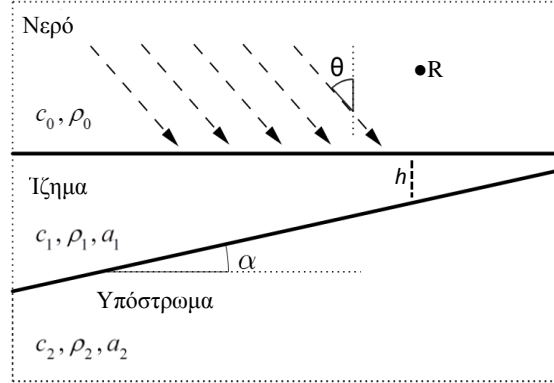
Σε πρόσφατη εργασία τους [1] οι συγγραφείς μελέτησαν τον συντελεστή ανάκλασης μονοχρωματικού επιπέδου κύματος από στρωματοποιημένο πυθμένα ο οποίος αποτελείται από δύο στρώματα που η διεπιφάνεια μεταξύ τους δεν είναι παράλληλη με την διεπιφάνεια του πρώτου στρώματος με το νερό (σχήμα 1). Συγκεκριμένα αναπτύχθηκε η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, στις περιπτώσεις που τα υλικά του πυθμένα μπορούν να θεωρηθούν ρευστά ή στερεά. Ο συντελεστής ανάκλασης εξαρτάται - εκτός από την συχνότητα και την γωνία πρόσπτωσης του επίπεδου κύματος- από τις γεωμετρικές, φυσικές και ακουστικές παραμέτρους του μοντέλου. Οι γεωμετρικές παράμετροι είναι η γωνία που σχηματίζει η επικλινής επιφάνεια ως προς την οριζόντια, και το σημείο μέτρησης του συντελεστή ανάκλασης. Αν και παραδοσιακά το σημείο αυτό ήταν πάνω στην διεπιφάνεια νερού - πρώτου στρώματος, στη θεώρηση του προβλήματος αυτού έχει γίνει η παραδοχή ότι το σημείο μέτρησης μπορεί να είναι και μέσα στη στήλη του νερού. Όταν τα στρώματα του πυθμένα θεωρηθούν ρευστά, οι παράμετροι που τα χαρακτηρίζουν είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα των ηχητικών κυμάτων και ο συντελεστής απορρόφησης κάθε στρώματος. Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν συνολικά 8 παράμετροι. Αν τώρα θεωρήσουμε το ένα ή και τα δύο στρώματα στερεά τότε υπάρχουν μέχρι και 4 επιπλέον παράμετροι, η ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων και ο συντελεστής απορρόφησης των ελαστικών κυμάτων.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην μελέτη της εξάρτησης της τιμής του συντελεστή ανάκλασης από τις παραμέτρους στην περίπτωση ρευστών υλικών. Το εύρος των τιμών των παραμέτρων ανταποκρίνεται στις τιμές πραγματικών υλικών (όπως άμμος, πηλός, άργιλος κλπ) που αποτελούν τον πυθμένα.

Στην ενότητα 1 παρουσιάζεται πολύ σύντομα η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ενώ στην ενότητα 2 παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση για καθεμιά από τις 8 παραμέτρους και σχολιάζονται τα αποτελέσματα. Επίσης παρουσιάζονται γραφικά η εξάρτηση του συντελεστή ανάκλασης όταν δύο από τις παραμέτρους (ταχύτητα του ήχου στο ιζήμα και πάχος του ιζήματος κάτω από τον δέκτη) μεταβάλλονται ταυτόχρονα.

### 1. Το θεωρητικό μοντέλο

Το μοντέλο του προβλήματος δίνεται στο Σχήμα 1.1. Ένα επίπεδο κύμα συχνότητας  $f$ , με γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  διαδίδεται μέσα στο νερό και ανακλάται από τον πυθμένα ο οποίος αποτελείται από δύο στρώματα: Ένα ιζήμα και ένα ημίαιμο υπόστρωμα που η διεπιφάνεια τους δεν είναι παράλληλη με την διεπιφάνεια νερού - ιζήματος. Στην ανάλυση που ακολουθεί τα υλικά του πυθμένα θεωρούνται ρευστά. Ο δέκτης θεωρείται τοποθετημένος είτε μέσα στη στήλη του νερού είτε πάνω στην διεπιφάνεια νερού - ιζήματος στο σημείο  $R$ . Η επικλινής διεπιφάνεια μπορεί να έχει είτε θετική κλίση (όπως στο Σχήμα 1.1) είτε αρνητική ανάλογα αν η γωνία  $\alpha$  είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1. Το περιβάλλον του προβλήματος

Ο συντελεστής ανάκλασης δίνεται από τον τύπο:

$$RC = \sum_{N=0}^{NMAX} R_n \exp(i\omega D_N) \quad (1.1)$$

όπου  $NMAX$  είναι ο μέγιστος αριθμός κυμάτων που φθάνουν στον δέκτη και  $D_N$  είναι η διαφορά φάσης κάθε κύματος. Οι συντελεστές  $R_n$  εξαρτώνται από τις παραμέτρους των υλικών και την γωνία πρόσπτωσης του κύματος στο σημείο υπολογισμού τους [2].

Γενικά ο συντελεστής ανάκλασης  $RC$  εξαρτάται από:

1. την συχνότητα του επιπέδου κύματος  $f$  και την γωνία πρόσπτωσης  $\theta$
2. την θέση του δέκτη  $(x_R, y_R)$ , την ταχύτητα του ήχου στο νερό  $c_0$ , την πυκνότητα του νερού  $\rho_0$  και
3. τις ταχύτητες του ήχου στο ίζημα και στο υπόστρωμα  $(c_1, c_2)$  τις αντίστοιχες πυκνότητες  $(\rho_1, \rho_2)$ , τους συντελεστές απορρόφησης στα δύο υλικά  $(a_1, a_2)$ , το πάχος του ιζήματος κάτω από τον δέκτη  $h$  και την γωνία  $\alpha$  της διεπιφάνειας των δύο υλικών.

Σε ένα τυπικό πρόβλημα αντιστροφής, οι παράμετροι της λίστας 1 και 2 είναι συνήθως γνωστές ενώ εκείνες της λίστας 3 όχι. Συμβολίζουμε με  $\underline{u}$  το διάνυσμα των παραμέτρων της λίστας 2 και με  $\underline{x}$  το διάνυσμα αυτών της λίστας 3.

$$\underline{u} = (c_0, \rho_0, x_R, y_R), \quad \underline{x} = (c_1, c_2, \rho_1, \rho_2, a_1, a_2, h, \alpha)$$

Άρα ο συντελεστής ανάκλασης είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$RC = RC(\theta, f, \underline{u}, \underline{x}) \quad (1.2)$$

και συνήθως είναι γνωστός για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$ . Το αντίστροφο λοιπόν πρόβλημα είναι ή εύρεση τιμών του  $\underline{x}$  έτσι ώστε οι τιμές του  $RC$  όπως

υπολογίζονται από την (1.1) να είναι κοντά στις γνωστές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για όλες τις τιμές της  $\theta$  όπου έχει μετρηθεί.

## 2. Παραμετρική Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή μελετάται η εξάρτηση της τιμής του συντελεστή ανάκλασης από τις τιμές των παραμέτρων της λίστας 3. Η μέθοδος που εφαρμόζεται είναι αντίστοιχη της μεθόδου στην αναφορά [3]. Στο παράδειγμα που ακολουθεί, υπολογίζεται ο συντελεστή ανάκλασης για κάποιες τιμές των παραμέτρων που φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Οι μονάδες για τις ταχύτητες είναι m/s, για τις πυκνότητες  $\text{gr/cm}^3$ , για τους συντελεστές απορρόφησης dB/λ, για το πάχος του ιζήματος μέτρα, για την συχνότητα Hz και για την γωνία μοίρες.

Πίνακας 2.1: Οι τιμές των παραμέτρων

Νερό		Ίζημα		Υπόστρωμα			
$c_0$	1000	$c_1$	1485	$c_2$	1800	$h$	1
$\rho_0$	1.0	$\rho_1$	1.28	$\rho_2$	2.0	$a$	2
		$a_1$	0.1	$a_2$	0.9	$f$	5000 Hz
						$\theta$	Από 0 έως 90 ανά μοίρα

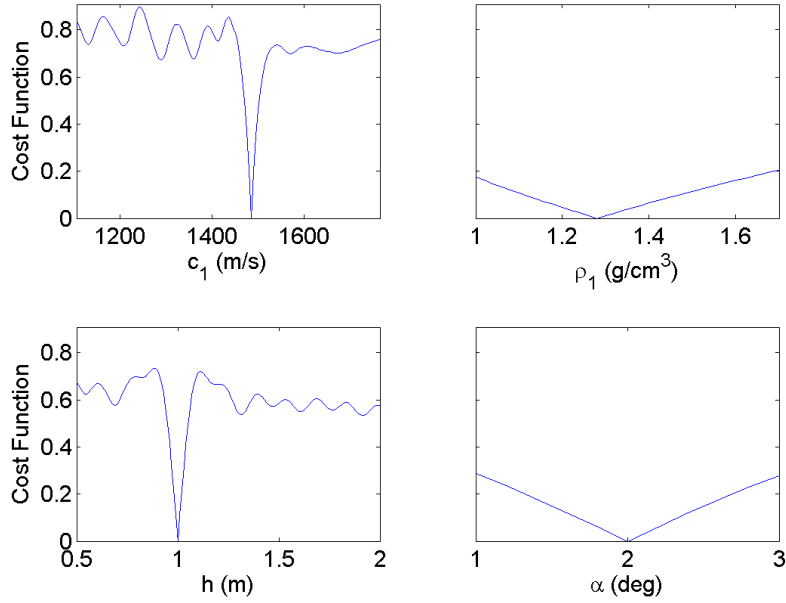
Αλλάζουμε την τιμή μιας εκ των παραμέτρων γύρω από την ακριβή της τιμή κρατώντας όλες τις άλλες παραμέτρους στην ακριβή τους τιμή και υπολογίζουμε τον συντελεστή ανάκλασης. Συγκρίνουμε κατόπιν με τον συντελεστή ανάκλασης για τις ακριβείς τιμές του Πίνακα 2.1 χρησιμοποιώντας την συνάρτηση κόστους:

$$C(\mathcal{X}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |R(\theta_k, f, \bar{u}, \mathcal{X}) - R(\theta_k, f, \bar{u}, \bar{x})|} \quad (2.1)$$

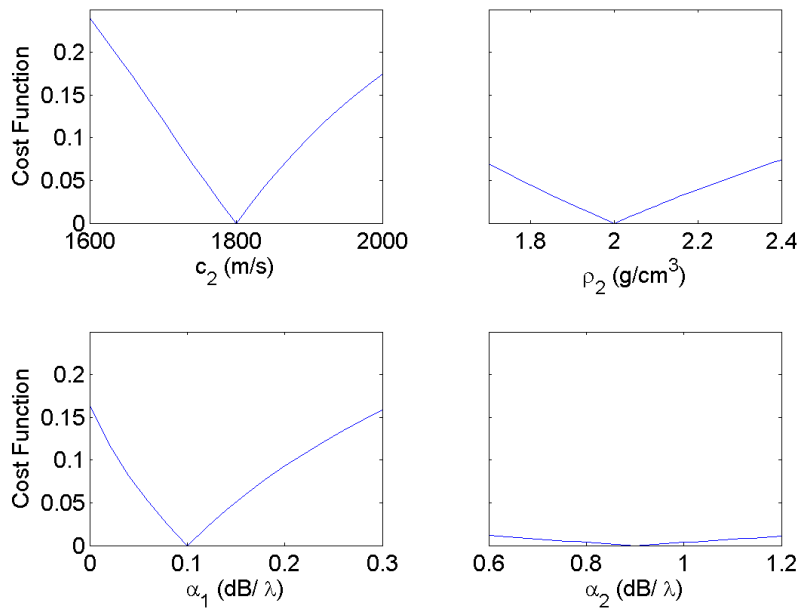
όπου  $N$  είναι το πλήθος των γωνιών,  $\bar{u}, \bar{x}$  οι παράμετροι του πίνακα 1, και  $\mathcal{X}$  οι παράμετροι στις οποίες μία έχει διαφορετική τιμή από εκείνη του Πίνακα 2.1. Οι τιμές της συνάρτησης κόστους για όλες της παραμέτρους φαίνονται στα Σχήματα 2.2 και 2.3. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι που είναι πιο σημαντικές (επηρεάζουν πιο πολύ) για τον συντελεστή ανάκλασης ενώ στο Σχήμα 2.3 αυτές που είναι λιγότερο σημαντικές.

Παρατηρούμε ότι, με εξαίρεση την ταχύτητα του ήχου στο ίζημα και το πάχος του ιζήματος  $h$ , όλες οι άλλες παράμετροι έχουν μόνο ένα ελάχιστο στο εύρος των τιμών τους. Αυτό σημαίνει ότι η εύρεση της ακριβούς τιμής τους μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και αν η αρχική τιμή τους είναι μακριά από την ακριβή. Αυτό δεν ισχύει για την ταχύτητα του ήχου και για το  $h$  για τα οποία η συνάρτηση κόστους έχει πολλά ελάχιστα πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να ξεκινήσει κάποιος αρκετά κοντά στην ακριβή τιμή για να υπάρξει σύγκλιση στο σωστό ελάχιστο. Επίσης παρατηρούμε ότι οι παράμετροι του σχήματος 2.3 επηρεάζουν λιγότερο την τιμή του συντελεστή ανάκλασης από εκείνες του σχήματος 2.2, πράγμα που υποδηλώνει

ότι μια μέθοδος αντιστροφής δεν θα προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτές τις παραμέτρους.

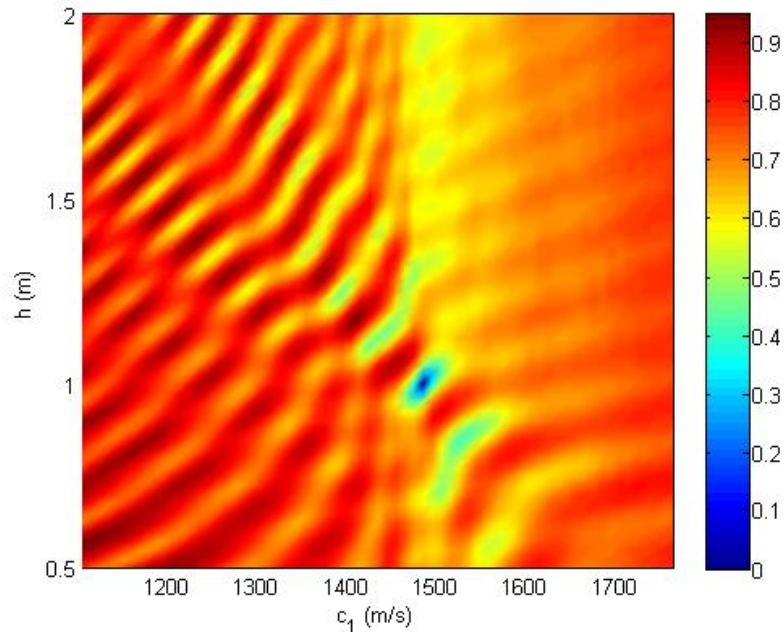


Σχήμα 2.2. Οι παράμετροι που έχουν μεγαλύτερη επιρροή στην τιμή του συντελεστή ανάκλασης



Σχήμα 2.3. Οι παράμετροι που έχουν μικρότερη επιρροή στην τιμή του συντελεστή ανάκλασης.

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η τιμή της συνάρτησης κόστους όταν η ταχύτητα του ήχου στο ιζήμα και το πάχος του ιζήματος  $h$  κάτω από τον δέκτη μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Είναι εμφανή τα πολλαπλά ελάχιστα που δημιουργούνται και που υποδηλώνουν την δυσκολία ανάκτησης των παραμέτρων αυτών με ακρίβεια.



Σχήμα 2.4. Η τιμή της συνάρτησης κόστους όταν η ταχύτητα του ήχου στο ιζήμα και το πάχος του ιζήματος κάτω από τον δέκτη αλλάζουν ταυτόχρονα.

### 3. Αναφορές

- [1] P.I. Papadakis, G.S. Piperakis and M.A. Kalogerakis, *Reflection of a plane wave from a two-layered seafloor with non-parallel interface between the layers*, Η εργασία έχει υποβληθεί στο περιοδικό J. Acoust. Soc. Am. (2014)
- [2] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov, *Fundamentals of oceans acoustics*, Springer, New York, (2003)
- [3] P. J. Papadakis, L. Bjørnø, J. P. Sessarego, M. I. Taroudakis, *A non-linear inversion method for recovering the properties of a multi-layered elastic bottom: A laboratory experiment*, Acta Acustica united with Acoustica, **Vol 89** 614-624 (2003)

## ***Ακουστικές Μετρήσεις στον Κόλπο του Ηρακλείου\****

Π. Παπαδάκης<sup>1,a</sup>, Εμμ. Σκαρσουλής<sup>1,b</sup>, Γ. Πιπεράκης<sup>1,c</sup>,  
Μιχ. Καλογεράκης<sup>2,d</sup> & Εμμ. Ορφανάκης<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ν. Πλαστήρα 100, Βασιλικά Βουτών,  
70 013 Ηράκλειο

<sup>2</sup> Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. - ΤΕΙ Κρήτης, Εσταυρωμένος 71 004 Ηράκλειο

<sup>a</sup> [panos@iacm.forth.gr](mailto:panos@iacm.forth.gr), <sup>b</sup> [eskars@iacm.forth.gr](mailto:eskars@iacm.forth.gr), <sup>c</sup> [piperak@iacm.forth.gr](mailto:piperak@iacm.forth.gr),  
<sup>d</sup> [michalis@iacm.forth.gr](mailto:michalis@iacm.forth.gr), <sup>e</sup> [morf@iacm.forth.gr](mailto:morf@iacm.forth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στα πλαίσια του προγράμματος SeaEars έγιναν το Μάιο 2014 προκαταρκτικές ακουστικές μετρήσεις στον κόλπο του Ηρακλείου. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούσαν αφ' ενός στη δοκιμή των οργάνων και αφ' ετέρου σε μια αρχική μελέτη των συνθηκών ακουστικής διάδοσης στην περιοχή. Μεταξύ άλλων μετρήθηκε η εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από το βάθος και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή, ενώ κατεγράφησαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από μια παλμική ακουστική πηγή και συγκρίθηκαν με αποτελέσματα μοντελοποίησης.*

### ***Acoustic Measurements in the Gulf of Heraklion***

#### **ABSTRACT**

*In the framework of SeaEars project preliminary acoustic measurements were conducted in May 2014 in the Gulf of Heraklion. The purpose of these measurements was to test the instruments and also to perform an initial study of sound propagation conditions in the area of interest. Among others, the sound-speed profile and the ambient noise levels were measured. Further, acoustic receptions from a pulsed acoustic source (pinger) were recorded at various distances and compared with results from propagation modelling.*

#### **Εισαγωγή**

Η δυνατότητα προσδιορισμού θέσης υποβρύχιων ηχητικών πηγών ήχου διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ασφάλεια υποβρύχιων εργασιών, στην

---

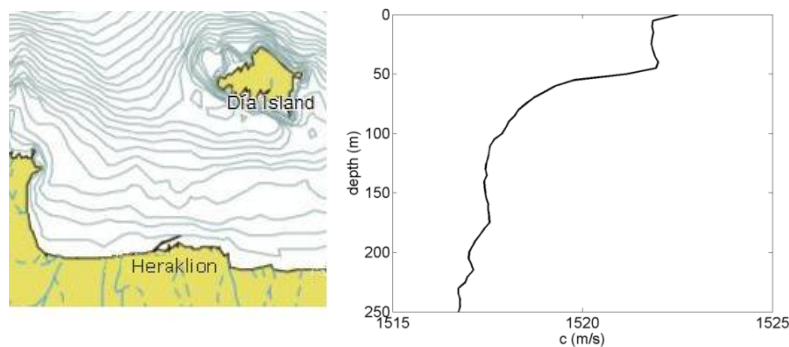
\* Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 – Δράση "ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ", έργο *SeaEars* με κωδικό 3495.

παρακολούθηση κητωδών, στην ανάκτηση οργάνων, κλπ. Το πρόγραμμα *SeaEars* έχει ως αντικείμενο τον τρισδιάστατο παθητικό εντοπισμό ευρυζώνιων υποβρύχιων πηγών ήχου στο εσωτερικό της θάλασσας, χρησιμοποιώντας απλές διατάξεις υδροφώνων (ζεύγη υδροφώνων), λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της διάθλασης και αξιοποιώντας φαινόμενα πολύδρομης ακουστικής διάδοσης [1].

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου προγράμματος έγιναν το Μάιο 2014 προκαταρκτικές ακουστικές μετρήσεις στον κόλπο του Ηρακλείου, μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούσαν αφ' ενός στη δοκιμή νέων οργάνων που αποκτήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος, και αφ' ετέρου σε μια αρχική μελέτη των συνθηκών ακουστικής διάδοσης στην περιοχή. Μεταξύ άλλων μετρήθηκε η εξάρτηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση της ταχύτητας του ήχου από το βάθος καθώς και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή, ενώ καταγράφηκαν και αναλύθηκαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από μια παλμική ακουστική πηγή. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μερικά από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

## 1. Μετρήσεις

Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει την περιοχή των μετρήσεων και το προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου μέχρι βάθος 250 m. Παρατηρούμε ότι πέρα από μια μικρή αύξηση κοντά στην επιφάνεια η ταχύτητα του ήχου έχει μικρές διακυμάνσεις μέχρι βάθος 50 m, ενώ μετά ελαττώνεται σταδιακά λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας.

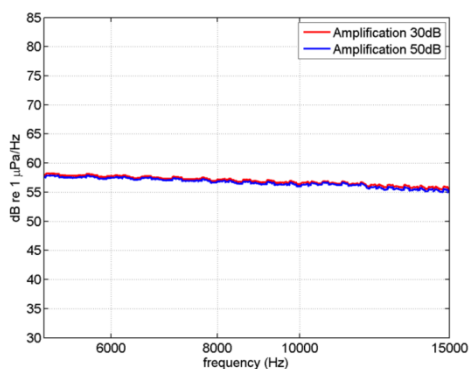


Σχήμα 1.1. Περιοχή των μετρήσεων και προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου.

Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει την φασματική πυκνότητα του θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 5 και 15 kHz. Η κατάσταση θάλασσας κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης μέτρησης ήταν μεταξύ 1 και 2. Για τη μέτρηση του θορύβου εφαρμόστηκε ενίσχυση στα σήματα εισόδου ούτως ώστε να ξεπεραστεί ο εσωτερικός θόρυβος του μετρητικού συστήματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το φάσμα του εκάστοτε ενισχυμένου σήματος και στο τέλος αφαιρέθηκε η ενίσχυση. Τα τελικά αποτελέσματα μετά την αφαίρεση της ενίσχυσης εμφανίζονται στο Σχήμα 1.2 για δύο τιμές της ενίσχυσης, 30 και 50 dB. Παρατηρούμε ότι τα δύο αποτελέσματα είναι ταυτόσημα, πράγμα που επιβεβαιώνει την ορθότητα της μέτρησης. Τα επίπεδα θορύβου είναι μεταξύ 55 και 60 dB/te 1  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ . Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες από τα τυπικά επίπεδα θορύβου για ανοιχτή θάλασσα και κατάσταση θάλασσας 2 (~40 dB te 1  $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$  στα 10kHz).

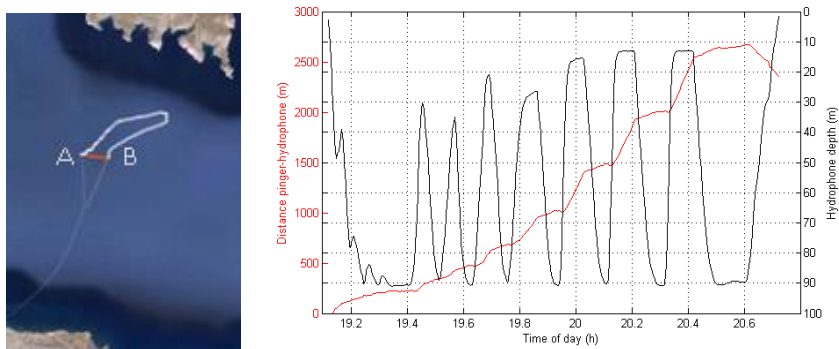


Ο αυξημένος θόρυβος πιθανόν οφείλεται στη γεινίαση με το λιμάνι του Ηρακλείου αλλά και στη μορφολογία της περιοχής.



Σχήμα 1.2. Θόρυβος περιβάλλοντος μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας.

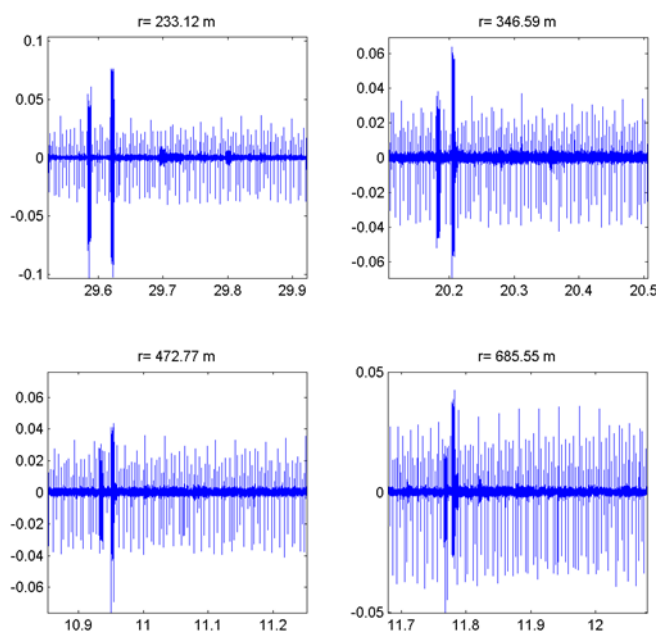
Στη μέση της απόστασης μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας έγινε πόντιση μιας ηχητικής πηγής σε βάθος 73 m με τη βοήθεια πλωτήρα. Η συγκεκριμένη πηγή εκπέμπει παλμικά σήματα κάθε 5 δευτερόλεπτα με κεντρική συχνότητα 11 kHz και διάρκεια 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για τον έλεγχο της οριζόντιας θέσης της πηγής τοποθετήθηκε δέκτης GPS επάνω στον πλωτήρα. Για τον έλεγχο του βάθους της πηγής τοποθετήθηκε αυτοκαταγραφικό βάθους (TDR) στο σχοινί πόντισης σε μικρή απόσταση από την πηγή. Από το σκάφος ποντίστηκε υδρόφωνο με καλώδιο μήκους περίπου 90 m. Για τον έλεγχο του βάθους του υδροφώνου τοποθετήθηκε αυτοκαταγραφικό βάθους (TDR) στο καλώδιο σε μικρή απόσταση από το υδρόφωνο ενώ χρησιμοποιήθηκε δέκτης GPS για τον έλεγχο της οριζόντιας θέσης του σκάφους. Από το συνδυασμό των δεδομένων των δύο δεκτών GPS προκύπτει η απόσταση μεταξύ πλωτήρα και σκάφους (μεταξύ πηγής και υδροφώνου).



Σχήμα 1.3. Αριστερά: Διαδρομή σκάφους-υδροφώνου (λευκή γραμμή) και πλωτήρα-πηγής (κόκκινη γραμμή) κατά την διάρκεια των μετρήσεων διάδοσης. Δεξιά: Βάθος του υδροφώνου (μαύρη γραμμή) και απόσταση πηγής-δέκτη (κόκκινη γραμμή) συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η περιοχή της μέτρησης. Το σημείο A είναι το σημείο πόντισης της πηγής και το σημείο B είναι το σημείο ανέλκυσης. Είναι εμφανής η μετατόπιση προς τα ανατολικά λόγω ρευμάτων (ταχύτητα μετατόπισης περίπου 0.6 κόμβοι). Ο χρόνος από την πόντιση μέχρι την ανέλκυση ήταν περίπου 1 ώρα. Στη διάρκεια αυτή το σκάφος απομακρύνθηκε από την πηγή σε απόσταση μέχρι και 2626 μέτρα. Κατά την διάρκεια της απομάκρυνσης έγιναν στάσεις διάρκειας περίπου 5 λεπτών η κάθε μία. Στο δεξιό μέρος του Σχήματος 1.3 παρουσιάζεται το βάθος του υδροφώνου συνάρτηση του χρόνου και συγχρόνως η απόσταση πλωτήρα-σκάφους όπως προέκυψε από το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού (GPS). Οι σταθμοί διακρίνονται από τη βύθιση του υδροφώνου ενώ η κίνηση του σκάφους από την ανάδυση του υδροφώνου.

Η καταγραφή του σήματος της πηγής έγινε με συχνότητα δειγματοληψίας 100 kHz. Το Σχήμα 1.4 παρουσιάζει τις ακουστικές καταγραφές (χρονοσειρές) σε 4 σταθμούς. Οι συγκεκριμένες λήψεις είναι προς το τέλος του κάθε σταθμού που το καλώδιο του υδροφώνου είναι σχεδόν κατακόρυφο και το υδρόφωνο βρίσκεται στο μέγιστο βάθος (91 m). Η απόσταση μεταξύ πλωτήρα και σκάφους που αντιστοιχεί σε κάθε σταθμό φαίνεται στην κορυφή της κάθε καταγραφής. Ο οριζόντιος άξονας μετράει χρόνο σε δευτερόλεπτα και το εμφανιζόμενο παράθυρο χρόνου είναι ίδιου μήκους και στις 4 καταγραφές.



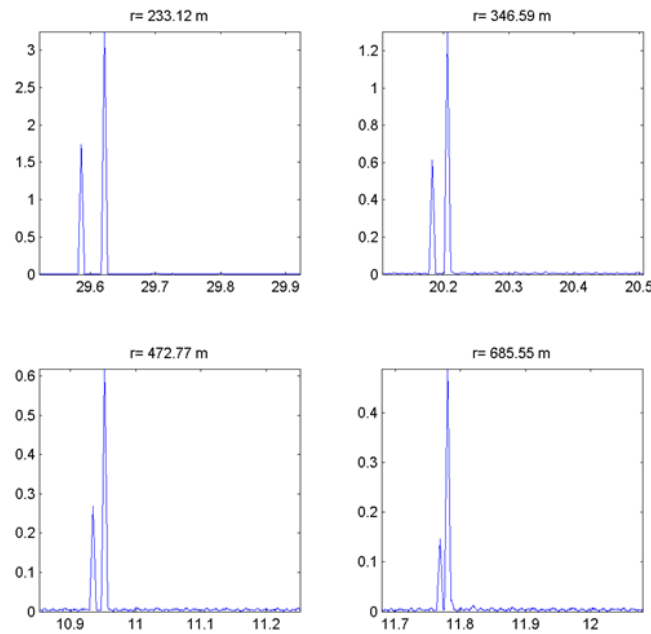
Σχήμα 1.4. Ακουστικές καταγραφές (χρονοσειρές) σε 4 σταθμούς.

Η πρώτη άφιξη της κάθε καταγραφής είναι η απ' ευθείας άφιξη ενώ η δεύτερη είναι η ανάκλαση από την επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη μεγαλώνει, η χρονική απόσταση ανάμεσα στην απευθείας και την ανακλώμενη άφιξη μικραίνει. Ο βασικός λόγος είναι ότι η διαφορά στο μήκος των αντίστοιχων ακτίνων είναι όλο και πιο μικρό. Με δεδομένο ότι η πηγή που

χρησιμοποιήθηκε ήταν παντοκατευθυντική η διαφορά στην ένταση μεταξύ της απ' ευθείας και της ανακλώμενης άφιξης αποδίδεται στις συνθήκες διάδοσης. Από το Σχήμα 1.4 παρατηρούμε ότι οι καταγραφές γίνονται σε περιβάλλον θορύβου, η παρουσία του οποίου δυσχεραίνει την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με τη χρήση του ενεργειακού φίλτρου [2]

$$E(\tau) = \int_{t=0}^T s^2(t + \tau) dt$$

όπου  $s(t)$  είναι το καταγραφόμενο σήμα (ακουστική χρονοσειρά) και  $T$  είναι η διάρκεια του εκπεμπόμενου παλμού (5msec). Το αποτέλεσμα εφαρμογής του ενεργειακού φίλτρου στις χρονοσειρές του Σχήματος 1.4 φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



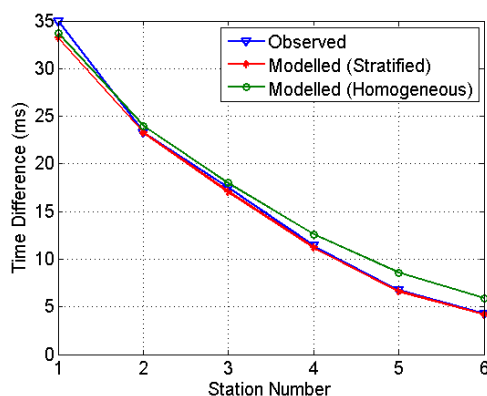
Σχήμα 1.5. Ενεργειακές χρονοσειρές: Αποτέλεσμα της εφαρμογής του ενεργειακού φίλτρου στις χρονοσειρές του Σχήματος 4.

Από τις ακουστικές καταγραφές υπολογίστηκε η διαφορά των χρόνων άφιξης ανάμεσα στις απευθείας και τις ανακλώμενες αφίξεις και αυτή η διαφορά συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα μοντελοποίησης με χρήση θεωρίας ακτίνων [3] που λαμβάνει υπ' όψιν το προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου την απόσταση και τα βάθη πηγής και δέκτη. Η σύγκριση μεταξύ μέτρησης και μοντελοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Εκτός από τη θεωρία ακτίνων που λαμβάνει υπ' όψιν το προφίλ ταχύτητας και την αντίστοιχη στρωμάτωση (stratification), υπολογίστηκε εναλλακτικά η διαφορά των χρόνων άφιξης υποθέτοντας ομογενές (homogeneous) μέσο. Οι προβλεπόμενες διαφορές χρόνων είναι πολύ κοντά στις μετρημένες, με τα αποτελέσματα του απλοποιημένου υπολογισμού (ομογενές μέσο) να παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές, ειδικά στις μεγάλες αποστάσεις. Σημειώνεται ότι η

επίπτωση των σφαλμάτων στην εκτίμηση της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη στην πρόβλεψη των χρόνων άφιξης είναι μεγαλύτερη στις μικρές αποστάσεις.

## 2. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια των προκαταρκτικών μετρήσεων μετρήθηκε η εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από προς βάθος καθώς και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή του κόλπου του Ηρακλείου και κατεγράφησαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από την παλμική ακουστική πηγή. Σε όλες τις λήψεις διακρίνονται σαφώς οι απευθείας και ανακλώμενες στην επιφάνεια αφίξεις. Μοντελοποιήθηκαν οι διαφορές χρόνων μεταξύ απευθείας και ανακλώμενων αφίξεων χρησιμοποιώντας θεωρία ακτίνων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου με το βάθος και την καμπύλωση των ακτίνων που αυτή επάγει. Εναλλακτικά έγινε μοντελοποίηση των χρόνων υποθέτοντας ευθύγραμμη διάδοση. Στην πρώτη περίπτωση οι προβλέψεις συμφωνούν πολύ καλά με τις μετρήσεις. Στη δεύτερη περίπτωση (ευθύγραμμη διάδοση) υπάρχουν αποκλίσεις που μεγαλώνουν καθώς το υδρόφωνο απομακρύνεται από την πηγή.



Σταθμός	Απόσταση (m)
1	233
2	346
3	472
4	685
5	1011
6	1477

Σχήμα 1.6. Μετρημένες και προβλεπόμενες διαφορές χρόνων άφιξης.

## 3. Αναφορές

- [1] E.K. Skarsoulis and M. Kalogerakis «Ray-theoretic localization of an impulsive source in a stratified ocean using two hydrophones» J. Acoust. Soc. Am. **118**, pp. 2934-2943(2005).
- [2] W.S.Burdic *Underwater Acoustic System Analysis* Prentice-Hall, New Jersey (1984).
- [3] L. Brekhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer Verlag, New York (1982).

## Πληροφορική μουσική και χειρονομικός έλεγχος ηχητικών χώρων στο «Δυνάμει Ον»

Σωτήρης Μανιτσάρης  
Ερευνητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, MINES ParisTech-IRCAM  
60, Boulevard Saint-Michel 75272 Cedex 06, Paris  
sotiris.manitsaris @ uom.edu.gr

Βασιλική Τσεκουροπούλου  
Συνθέτρια-Ερευνήτρια, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
Εγνατία 156, Τ.Θ. 1591, 540 06 Θεσσαλονίκη  
viky.tsekouropoulou @ uom.edu.gr

Βασιλική Γκατζιάκη  
Πληροφορικός, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
Εγνατία 156, Τ.Θ. 1591, 540 06 Θεσσαλονίκη  
gatziki @ uom.edu.gr

Χριστίνα Βολιώτη  
Υπ. διδάκτορας, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας  
Εγνατία 156, Τ.Θ. 1591, 540 06 Θεσσαλονίκη  
christina.volioti @ uom.edu.gr

Αλίνα Γκλουσκόβα  
Υπ. διδάκτορας, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Εγνατία 156, Τ.Θ. 1591, 540 06 Θεσσαλονίκη  
alina.glushkova @ uom.edu.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζονται η έρευνα και η προγραμματιστική υλοποίηση που πραγματοποιήθηκαν για την αναγνώριση ανθρώπινης χειρονομίας και τον έλεγχο της σύνθεσης ήχου σε πραγματικό χρόνο, στα πλαίσια του *in-vivo* έργου μουσικού θεάτρου «Δυνάμει Ον». Αυτό το έργο βασίζεται στο χειρονομικό έλεγχο ηχητικών παραμέτρων ομιλίας ή μουσικών τμημάτων, όπου η σύλληψη της χειρονομίας γίνεται με χρήση καμερών βάθους. Χάρη σε προγραμματιστικές τεχνικές πραγματικού χρόνου, η κάμερα παρέχει ακολουθίες εικόνων βάθους από τις οποίες εξάγονται οι συντεταγμένες ενός αριθμού αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος και στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε ηχητικούς χώρους εμπνευσμένους από τα τέσσερα στοιχεία του Αριστοτέλη: γη, νερό, αέρας, φωτιά. Στοχαστική μοντελοποίηση και εκπαίδευση μηχανής χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστοίχιση χειρονομιών σε ήχο ή ομιλία.

**Computer music and gesture control of sound spaces in "Dynamei On"**

## ABSTRACT

*This article presents the system that has been developed for the human gesture recognition and real-time control of sound synthesis in the in-vivo musical performance "Dynamei On". It is based on gesture control of acoustic parameters of speech or musical excerpts, where the gestures are captured using depth cameras. Based on real-time programming techniques, the coordinates of the joints of the human body are extracted from depth image sequences. Stochastic modeling and machine learning techniques are used to gesturally control sound spaces, inspired by the four elements of Aristotle: earth, water, air, fire.*

### Εισαγωγή

Ο Αριστοτέλης χρησιμοποίησε τους όρους «δυνάμει ον» και «ενεργεία ον» για να εξηγήσει την κίνηση και τη μεταβολή, με σκοπό την ολοκλήρωση των όντων. Το έργο «Δυνάμει ον» (2013) εμπνέεται από την αέναη πάλη των όντων για κίνηση και ολοκλήρωση. Πρόκειται για ένα έργο σύγχρονης μικτής μουσικής με στοιχεία in-vivo μουσικού θεάτρου. Στο «Δυνάμει Ον» εισάγεται μια πρωτότυπη δραματουργία βασισμένη στη σημασιολογία της ανθρώπινης χειρονομίας όπου συμβιώνουν σύνθεση μουσικής και παραστατική τέχνη καθώς και ηχητικοί, χειρονομικοί και οπτικοί πόροι. Η κίνηση αποτελεί τον πυρήνα τόσο της ιδέας του έργου όσο και της υλοποίησής της, καθώς το έργο βασίζεται στο χειρονομικό έλεγχο ηχητικών παραμέτρων ομιλίας και μουσικών τμημάτων, όπου η σύλληψη της χειρονομίας γίνεται με χρήση καμερών βάρθους. Χάρη σε προγραμματιστικές τεχνικές πραγματικού χρόνου, η κάμερα παρέχει ακολουθίες εικόνων βάρθους από τις οποίες εξάγονται οι συντεταγμένες ενός αριθμού αρθρώσεων του σώματος των εκτελεστών και στη συνέχεια αυτές αντιστοιχίζονται σε ηχητικούς χώρους εμπνευσμένους από τα τέσσερα στοιχεία του Αριστοτέλη: γη, νερό, αέρας, φωτιά.

## 1 Ανασκόπηση αισθητήρων σύλληψης κίνησης

### 1.1 Αδρανειακοί αισθητήρες

Οι αδρανειακοί αισθητήρες όπως τα MotionPod της Movea, το ρούχο Animazoo με 18 ή 11 αισθητήρες IGS-180 ή τα χειριστήρια όπως αυτό της Wii [1] επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικά της κίνησης όπως η περιστροφή και η επιτάχυνση [2]. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτών είναι η ανεξαρτησία τους από προβλήματα αποκρύψεων διάφορων μελών του σώματος που μπορούν να προκύψουν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης μιας κίνησης. Οι αδρανειακοί αισθητήρες έχουν δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή κινήσεων που εκτελούνται σε χορευτικές και μουσικές παραστάσεις [3]. Ωστόσο σε σχέση με τους αισθητήρες όρασης, το κόστος των αδρανειακών είναι αρκετά μεγαλύτερο.

### 1.2 Αισθητήρες όρασης η/υ

Οι τεχνικές όρασης υπολογιστών διακρίνονται με τη σειρά τους σε δύο κα-

τηγορίες α) με δείκτες και β) χωρίς δείκτες. Στην πρώτη κατηγορία, δείκτες αντανάκλασης τοποθετούνται σε χαρακτηριστικά σημεία του σώματος, όπως οι αρθρώσεις. Αποτελούνται από υπέρυθρες κάμερες που συλλαμβάνουν την κίνηση ως μετατόπιση των δεικτών αντανάκλασης [4] [5]. Είναι κυρίως ακριβά εμπορικά προϊόντα και δεν ενδείκνυται για ζωντανές παραστάσεις [6]. Οι τεχνικές όρασης χωρίς δείκτες δεν απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, δεν επηρεάζουν την κίνηση καθώς ο εκτελεστής δε φέρει ειδικό εξοπλισμό επάνω του. Στο έργο «Δυνάμει ον» χρησιμοποιήσαμε την κάμερα βάρους Kinect της Microsoft. Είναι μία χαμηλού κόστους κάμερα που παρέχει καρτεσιανή αναπαράσταση της ανθρώπινης κίνησης και χρησιμοποιείται συνήθως για τον εντοπισμό των αρθρώσεων του σώματος. Η συγκεκριμένη κάμερα έχει ξαναχρησιμοποιηθεί σε καλλιτεχνική παράσταση και έδωσε καλά αποτελέσματα για την αναγνώριση γενικών στάσεων του σώματος στη μελέτη των χορευτικών κινήσεων [7].

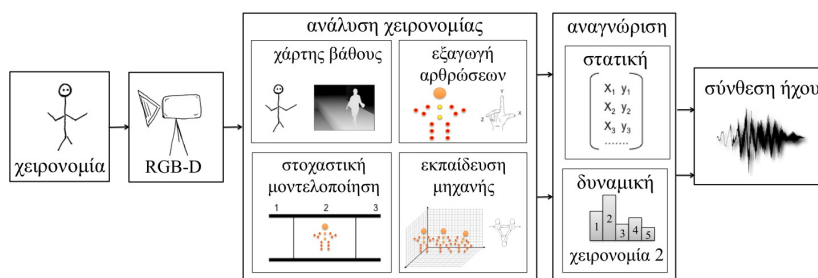
## 2 Μεθοδολογία

Στα πλαίσια του «Δυνάμει Ον» εφαρμόστηκε μεθοδολογία σύλληψης κίνησης, εξαγωγής συντεταγμένων αρθρώσεων, εκπαίδευση μηχανής και αντιστοίχιση σε ήχο. Η μεθοδολογία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκε η Microsoft Kinect ως αισθητήρας σύλληψης κίνησης για την απόκτηση και καταγραφή των δεδομένων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ανήκει στις κάμερες βάρους χαμηλού κόστους και παρέχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες σχετικές με τη θέση των αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος. Η Kinect τοποθετήθηκε σε σημείο ώστε να αποφεύγονται οι αποκρύψεις των σημείων του σώματος από αντικείμενα της σκηνής. Επιπλέον, η σκηνογραφία και η χορογραφία σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν ιδίες αποκρύψεις από τους εκτελεστές χορευτικών χειρονομιών.

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία της ακολουθίας εικόνων βάρους ώστε να εντοπιστούν και να εξαχθούν οι 3Δ συντεταγμένες των αρθρώσεων του σώματος σε πραγματικό χρόνο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία μιας ροής δεδομένων με συντεταγμένες X, Y και Z για κάθε άρθρωση του ανθρώπινου σώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Microsoft Kinect δεν ενδείκνυται για σύλληψη δακτυλικών κινήσεων. Συνεπώς, οι χορευτικές χειρονομίες των εκτελεστών αναπαρίστανται μέσω απολύτων θέσεων στο χώρο δίχως να εξάγεται περιστροφική πληροφορία ούτε να λαμβάνονται υπόψη οι κινήσεις των δακτύλων.

Η ροή των συντεταγμένων θέσης του σώματος των εκτελεστών χρησιμοποιήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους, είτε ως μέσο για το στιγμιαίο έλεγχο παραμέτρων του ήχου με χρήση κατωφλίων (στατική αναγνώριση), είτε για την εκπαίδευση του η/υ και την αναγνώριση της χειρονομίας ως δυναμική διαδικασία (δυναμική αναγνώριση).

Στη στατική αναγνώριση γίνεται μια αντιστοίχιση τύπου '1-1' μεταξύ συντεταγμένων θέσης της άρθρωσης του σώματος και μιας εντολής παραμετροποίησης του ήχου. Στην περίπτωση αυτή δε λαμβάνεται υπόψη η χρονική εξέλιξη της χειρονομίας. Η δυναμική αναγνώριση χειρονομιών του «Δυνάμει Ον» βασίζεται σε μια υβριδική προσέγγιση μεταξύ Κρυφών Μαρκοβιανών Μοντέλων (KMM) και Δυναμικής Στρέβλωσης του Χρόνου (ΔΣΧ) [3]. Το υβριδικό KMM-ΔΣΧ επιτρέπει αφενός την εκπαίδευση πάνω σε μοναδικό δείγμα των μοντέλων χειρο-



Σχήμα 2.1 Μεθοδολογία αντιστοίχισης χειρονομιών σε ήχο

νομιών και αφετέρου τη χρονική στρέβλωση της χειρονομίας εισόδου σε σχέση με τη χειρονομία εκπαίδευσης. Το πλεονέκτημα του υβριδικού KMM-ΔΣΧ είναι ότι η εκπαίδευση του συστήματος με νέες χειρονομίες είναι απλή και γρήγορη χωρίς απαίτηση για μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης.

Η έξοδος της φάσης αναγνώρισης ενεργοποιεί αντιστοίχως τη σύνθεση ήχου, διαμορφώνοντας ηχητικούς χώρους εμπνευσμένους από τα 4 στοιχεία του Αριστοτέλη. Στο «Δυνάμει Ον» οι ηχητικοί χώροι μπορεί να προσδιορίζονται από προκαθορισμένα φωνητικά αποσπάσματα ομιλίας που ενεργοποιούνται σε πραγματικό χρόνο, σύνθεση φιλτραρισμένων αποσπασμάτων από τη σονάτα Waldestein του Beethoven, και κοκκώδης σύνθεση ήχου.

### 3 Υλοποίηση

Στο «Δυνάμει Ον», δημιουργήθηκαν συνολικά 12 ηχητικοί χώροι, που υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον προγραμματισμού Max/MSP, ένα περιβάλλον ιδιαίτερα ευνοϊκό για τη σύνθεση και επεξεργασία ήχων σε πραγματικό χρόνο αλλά και τη σύνδεσή του με άλλα πολυμέσα όπως εικόνες ή βίντεο. Οι ηχητικοί χώροι ενεργοποιούνται από τις χειρονομίες των χορευτών, ή αλλιώς μέσω ρητής αντιστοίχισης θέσεων ή δυναμικών χειρονομιών σε ήχο.

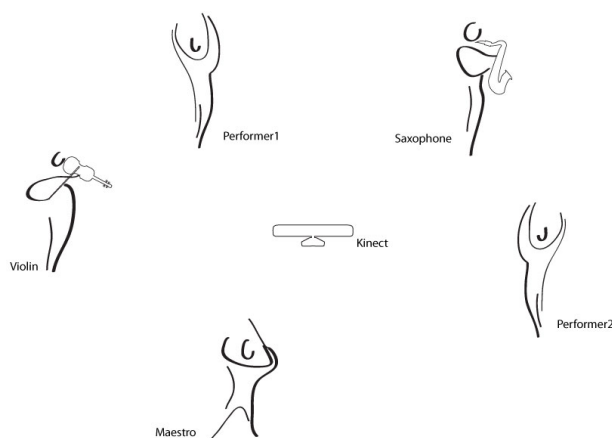
#### 3.1 Στατική αναγνώριση και ρητή αντιστοίχιση

Στην κατηγορία αυτή, ο χώρος στον οποίο ο εκτελεστής έχει τη δυνατότητα να ενεργεί αντιστοιχήθηκε σε ένα πλέγμα από ήχους. Η κάμερα Kinect στέλνει τα δεδομένα αρθρώσεων του ανθρώπινου σώματος στην εφαρμογή, όπου εντοπίζοντας σε πραγματικό χρόνο τη θέση του εκτελεστή στο χώρο, αντιστοιχίζονται οι αρθρώσεις του σε ήχους σύμφωνα με την εκάστοτε θέση του.

#### 3.2 Δυναμική αναγνώριση και ρητή αντιστοίχιση

Στη δυναμική αναγνώριση και ρητή αντιστοίχιση επιτυγχάνεται χωρική αντιστοίχιση καρτεσιανών συντεταγμένων σε ήχο. Για να ενεργοποιηθούν οι ηχητικοί χώροι, πραγματοποιήθηκε αρχικά η καταγραφή 4 χορευτικών χειρονομιών από τον εκτελεστή, οι οποίες αναπαριστούν τα 4 στοιχεία του Αριστοτέλη (γη, νερό, αέρας, φωτιά). Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτών των καταγραφών χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση μηχανής. Χρησιμοποιήθηκε το αντικείμενο Gesture





Σχήμα 3.1 Σκηνοθεσία και υλοποίηση στο «Δυνάμει Ον»

Follower, που έχει αναπτυχθεί από το IRCAM[9] και υλοποιεί το υβριδικό KMM-ΔΣΧ για την αντιστοίχιση χειρονομιών σε ήχο ή ομιλία. Κατά τη διάρκεια του έργου οι συγκεκριμένες 4 χειρονομίες αναγνωρίζονται από το σύστημα και επιτυγχάνεται η αντιστοίχισή τους με 4 διαφορετικά ακουστικά φίλτρα. Το κάθε φίλτρο παραπέμπει ακουστικά σε χαρακτηριστικά των 4 στοιχείων, παραμετροποιώντας τη συχνότητα, το εύρος, το πλάτος και την περιοδικότητα του παλμού του ψηφιακού ήχου.

#### 4 Συμπεράσματα

Αξιοποιώντας τις τεχνολογίες σύλληψης και αναγνώρισης κινήσεων στο έργο «Δυνάμει Ον», προτείνεται ένας αλληλεπιδραστικός χώρος για τη σύνθεση ήχου. Η παρουσία των μουσικών, των χορευτών, της μαέστρου αλλά και δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών μαζί με τους χειριστές τους επί σκηνής ενίσχυσαν το ενδιαφέρον και την περιέργεια των ακροατών. Ο ρόλος της κάμερας βάθους θα μπορούσε να ενισχυθεί σκηνοθετικά ώστε να είναι πιο ξεκάθαρη στο κοινό η συμβολή της στο έργο. Η σύνθεση ψηφιακού ήχου από τις χειρονομίες χορευτών, οι οποίες αναγνωρίζονται σε πραγματικό χρόνο από την κάμερα, αποτελεί μία από τις βασικότερες πρωτοτυπίες του. Είναι σημαντικό να γίνεται αντιληπτό από το κοινό πως αυτή η αλληλεπίδραση χειρονομιών/κάμερας/υπολογιστή/ είναι που ελέγχει τον ήχο και πως δεν πρόκειται για απλή αναπαραγωγή ήχων. Παράλληλα μία πιο προσεγμένη χωροταξία θα συνέβαλλε στο να αποφευχθούν σφάλματα όπως ο εντοπισμός χειρονομιών από τρίτα άτομα επί σκηνής. Επιθυμία μας είναι το «Δυνάμει Ον» να αποτελέσει ένα έργο το οποίο θα «ζει» και θα εξελίσσεται ακολουθώντας την επιστημονική πρόοδο στον τομέα της αναγνώρισης χειρονομιών και της δυναμικής αντιστοίχισής τους με ήχο.

## 5 Ευχαριστίες

Το Ερευνητικό Πρόγραμμα «ArtiMuse» υποστηρίζεται από τη Δράση «Ενίσχυση Μεταδιδασκτόρων Ερευνητών/τριών» του ΕΠΕΔΒΜ με Δικαιούχο την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους.

## 6 Αναφορές

- [1] GRUNBERG D., Gesture Recognition for Conducting Computer Music. Retrieved January 10, from: <http://schubert.ece.drexel.edu/research/gestureRecognition>, 2008
- [2] AYLWARD, R., DANIEL LOVELL S., AND JOSEPH A. PARADISO, A Compact, Wireless, Wearable Sensor Network for Interactive Dance Ensembles, In Proceedings of BSN, The IEEE International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, Cambridge, Massachusetts, April 3-5, pp. 65-70, 2006
- [3] FREDERIC BEVILACQUA, NORBERT SCHNELL, NICOLAS RASAMIMANANA, BRUNO ZAMBORLIN, FABRICE GUEDY, "Online Gesture Analysis and Control of Audio Processing", Musical Robots and Interactive Multimodal Systems, Springer Tracts in Advanced Robotics, Volume 74 Springer Verlag, 2011
- [4] DEMOUCRON M., ASKENFELT A. AND CAUSSE R., Observations on bow changes in violin performance. In Proceedings of Acoustics, Journal of the Acoustical Society of America, volume 123, page 3123, 1994
- [5] RASAMIMANANA N. AND BEVILACQUA F., Effort-based analysis of bowing movements : evidence of anticipation effects. The Journal of New Music Research, 37(4): 339 ? 351, 2009
- [6] S. CORAZZA, L. M•UNDERMANN, A. CHAUDHARI, T. DEMATTIO, C. COBELLI, AND T. ANDRIACCHI. " A markerless motion capture system to study musculoskeletal biomechanics: Visual hull and simulated annealing approach" Annals of Biomedical Engineering, 34(6): 1019?1029, 2006
- [7] RAPTIS M., KIROVSKI D., HOPPE H., Real-Time Classification of Dance Gestures from Skeleton Animation. Eurographics/ In Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2011
- [8] BEVILACQUA, F., GUEDY, F., SCHNELL, N., FLETY E. and LEROY N., (2007). Wireless sensor interface and gesture-follower for music pedagogy. In Proceedings of the International Conference of New Interfaces for Musical Expression, New York, USA, pp 124-129

# **Αλγοριθμική σύνθεση και αυτόματη ηχοποίηση/ μουσικοποίηση βίντεο με χρήση Η/Υ**

Χρήστος Καραμήτσος<sup>a</sup>, Κωνσταντίνος Μπακογιάννης<sup>b</sup> & Γεώργιος Καμπουράκης<sup>c</sup>

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup>[kris.karamits@gmail.com](mailto:kris.karamits@gmail.com), <sup>b</sup>[kostas\\_bako@hotmail.com](mailto:kostas_bako@hotmail.com), <sup>c</sup>[gcamb@cs.ntua.gr](mailto:gcamb@cs.ntua.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Υπάρχει μια βαθιά εδραιωμένη αντίληψη, πως η διαδικασία της μουσικής σύνθεσης είναι μια πλήρως αυθόρμητη διαδικασία. Από την εποχή που η μουσική έπαψε να είναι αυτοσχεδιαστική, φαίνεται πως η αλήθεια απέχει αρκετά από αυτή την άποψη. Ειδικότερα, από την εποχή της ακμής για τη δυτική μουσική, περί τον 15<sup>ο</sup> αιώνα και μετά, οι συνθέτες έχουν καταστρώσει κι εφαρμόσει αναρίθμητες διαφορετικές αλγοριθμικές διαδικασίες, με σκοπό την απόκτηση συστηματικότερης προσέγγισης, αλλά και την επίτευξη πρωτότυπων αποτελεσμάτων.

Οι υπολογιστές προσέφεραν μια αλματώδη εξέλιξη στον τομέα αυτό στους συνθέτες του 20<sup>ου</sup> αι.. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η κατασκευή ενός υπολογιστικού προγράμματος, το οποίο κάνοντας χρήση της διαδικασίας του Video Sonification, ως μεθόδου αλγοριθμικής σύνθεσης, δημιουργεί μουσική σε πραγματικό χρόνο.

## ***Algorithmic composition and automated computer-based video sonification***

## **ABSTRACT**

*Although music composition has always been regarded as a purely spontaneous this is far from true. Throughout the years, especially since the rise of western music in the 15<sup>th</sup> century, composers have employed numerous algorithmic procedures in order to create music in a more consistent and systematic way. This procedures often included the use of mathematical statistical models, as well as elements that provided an extra chance factor. In that way, the result was not predetermined. Computers ofcourse proved to be of great aid to musicians of the 20<sup>th</sup> century.*

*This thesis is exploring one of the possible and most impressive algorithmic composition tools computers are able to provide to a composer, through the use of Video Sonification. The program created for the purpose of this thesis creates a musical piece in real-time for any video chosen by the user.*

## Εισαγωγή

Αυτή η εργασία πραγματεύεται την δημιουργία μουσικής μέσω της επεξεργασίας των παραμέτρων ενός οποιουδήποτε βίντεο. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, γίνεται χρήση ενός προγραμματιστικού περιβάλλοντος, το MAX/MSP μαζί με το συμπληρωματικό του εργαλείο Jitter, το οποίο είναι υπεύθυνο για το χειρισμό και την επεξεργασία εικόνων και βίντεο. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε κάνει χρήση των χρωματικών μεταβολών του βίντεο για κάθε καρέ σε πραγματικό χρόνο και δημιουργεί ένα μουσικό κομμάτι με χαλαρή δομή και ενδιαφέροντα μελωδικά και ρυθμικά μοτίβα, ανάλογα με τις παραλλαγές του εκάστοτε βίντεο. Αυτή η μορφή σύνθεσης, έχει το επιπρόσθετο πλεονέκτημα να δημιουργεί για τον ακροατή/θεατή ένα οπτικοακουστικό θέαμα. Επίσης, ο αλγόριθμος είναι μη-ντετερμινιστικός, κάνοντας χρήση στατιστικών μοντέλων, όπως αλυσίδες Markov. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της διαδικασίας είναι το MAX/MSP, ένα γραφικό προγραμματιστικό περιβάλλον ειδικά σχεδιασμένο για μουσική και πολυμέσα.

### 1. (Image / Video) Sonification

Πρόκειται για μια διαδικασία μετάδοσης πληροφορίας μέσω ήχων, που δεν περιέχουν ομιλία. Είναι μια σημαντικότερη επιστήμη που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μοτίβων σε μεγάλο όγκο δεδομένων, πράγμα που θα ήταν δυσκολότερα αντιληπτό από οπτική παρατήρηση.

Στην περίπτωση του Image Sonification, τα δεδομένα μας είναι εικόνες και είναι ένας από τους πιο ενδιαφέροντες και πρακτικούς τομείς του κλάδου, καθώς συνιστά εργαλείο για ανθρώπους με προβλήματα στην όραση. Γενικότερα, Image Sonification χρησιμοποιείται και σε άλλες πρακτικές περιπτώσεις, όπως ο παλμογράφος στα νοσοκομεία.

Εκτός από πρακτικές εφαρμογές όμως, Sonification μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για καλλιτεχνικούς σκοπούς. Αυτό είναι το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, σύνθεση μουσικής μέσω **video sonification**, δηλαδή η δημιουργία ενός μουσικού κομματιού κάνοντας χρήση ενός οποιουδήποτε βίντεο ως πηγή δεδομένων. Ο κλάδος αυτός του sonification βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, με πολλούς μουσικούς, αλλά και μηχανικούς να πειραματίζονται πάνω σε αυτόν.

### 2. Επεξήγηση Αλγορίθμου

Η αλγοριθμική σύνθεση που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάνει χρήση του Video Sonification. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο, ο οποίος για διαφορετικά βίντεο, παράγει μουσική που είναι συνυφασμένη κατά κάποιο τρόπο με το περιεχόμενό του. Ακόμα, όμως και με χρήση του ίδιου οπτικού υλικού, μπορούν να παρατηρηθούν διαφορές στο ηχητικό αποτέλεσμα, καθώς έχει εισαχθεί το στοιχείο της τυχαιότητας.

### *2.1. Επιλογή χρωματικού μοντέλου*

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται από το κάθε καρέ αφορούν το χρώμα και είναι οι Hue (χροιά), Saturation (κορεσμός), Lightness (φωτεινότητα). Γίνεται αντιληπτό, επομένως, πως για την επεξεργασία της εικόνας γίνεται χρήση του χρωματικού μοντέλου HSL. Παρόλο που το jitter αποθηκεύει τα δεδομένα σε RGB μορφή αρχικά, η μετατροπή σε HSL είναι αρκετά απλή.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HSL, είναι ότι οι συνιστώσες του μπορούν να συνδεθούν πιο άμεσα με έννοιες όπως χρώμα, φωτεινότητα, καθαρότητα χρώματος. Σε αντίθεση με το RGB, όπου π.χ. το ποσοστό του κόκκινου χρώματος σε μια εικόνα δεν έχει κάποια απτή σημασία. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο έγινε ευκολότερη η συσχέτιση τους με μουσικούς όρους όπως μουσικό φθόγγο (pitch), ένταση (volume), αλλά και ρυθμό (tempo).

### *2.2. Διαμόρφωση tempo*

Αρχικά ανιχνεύεται ο μέσος ρυθμός μεταβολής του βίντεο από καρέ σε καρέ και αυτή η τιμή αντιστοιχίζεται με την κατάλληλη τιμή για το tempo του μουσικού κομματιού. Το tempo ορίζεται ως ένα είδος μεταβλητής παγκόσμιας εμβέλειας (global range) για το patcher μας και με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να διαχειριστούμε το ρυθμικό αποτέλεσμα της μουσικής σε κάθε subpatcher.

### *2.3. Επιλογή δεδομένων ανάλυσης video προς εξαγωγή*

Στη συνέχεια, για κάθε καρέ λαμβάνονται οι μέσες τιμές για τα Hue, Saturation, Lightness, όχι όμως για όλα τα εικονοστοιχεία. Μέσω ενός είδος φίλτρου, επιλέγουμε αυτά τα οποία είναι είτε τα φωτεινότερα είτε τα σκοτεινότερα, ανάλογα με το που βρίσκεται η σημαντικότερη πληροφορία κάθε φορά. Ορίζοντας μια τιμή για το όριο επιθυμητής φωτοβολίας προηγουμένως, υπολογίζονται μόνο αυτά τα οποία έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη τιμή αντίστοιχα από το όριο.

### *2.4. Παραμετροποίηση της έντασης (volume)*

Ένα υποπρόγραμμα υπολογίζει τη μέση τιμή φωτοβολίας (luminosity) για τα εικονοστοιχεία που μας ενδιαφέρουν, η οποία χρησιμοποιείται αργότερα για την παραμετροποίηση της έντασης (volume).

### *2.5. Επιλογή «Τρόπου» (modus)*

Η τιμή των H,S,L στο MAX κυμαίνεται από 0-255, όπως και με τα R,G,B. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε διαφορετικές περιοχές στο χρωματικό κύκλο. Συγκεκριμένα όμως με βάση την εκάστοτε μέση τιμή του Hue έχουν επιλεγεί 5 διαφορετικές μουσικές κλίμακες, ή πιο συγκεκριμένα Τρόποι, οι οποίες αντιστοιχούν αριθμητικά σε 5 διαφορετικές περιοχές του χρωματικού κύκλου. Οι πέντε τρόποι είναι ο Σολ μιζολύδιος (Gmix), Ντο Λύδιος (Clyd), Σι ύφεση Λύδιος (Bblyd), Λα Δώριος (Ador) και Φα δίεση Φρύγιος (F#fug). Οι περιοχές τιμών του Hue στις οποίες αντιστοιχεί ο καθένας είναι 0-50, 51-101, 102-152, 153-203, 204-

255. Για τον κάθε τρόπο αντιστοιχούν δηλαδή 51 τιμές εκτός από την τελευταία όπου έχουμε 52.

Η επιλογή αυτής της αντιστοίχισης, βασίστηκε σε γενικές γραμμές στη γενική ψυχολογική επίπτωση που προκαλούν τα χρώματα της κάθε περιοχής, όπως και τη γενική αίσθηση που προκαλεί ο κάθε Τρόπος.

Τέλος για να γίνεται καλύτερα αντιληπτή η επιλογή Τρόπου και η χρωματική περιοχή στην οποία βρίσκονται τα σημαντικά εικονοστοιχεία του βίντεο, επιλέχθηκαν 5 ξεχωριστοί ήχοι για τη μελωδία του κάθε Τρόπου και 5 ήχοι για το μπάσο αντίστοιχα.

## 2.6. Διαμόρφωση βασικής μελωδίας

Αφού επιλεγθεί ο Τρόπος, οι μέσες τιμές H,S,L χρησιμοποιούνται για την επιλογή ενός μουσικού φθόγγου(pitch) που ανήκει στην κλίμακα αυτή μέσω μιας συναρτησιακής σχέσης 3 μεταβλητών.

$$\text{Pitch} = \text{Hue} - \text{Saturation} + 2 \cdot \text{Lightness} \quad (2.1)$$

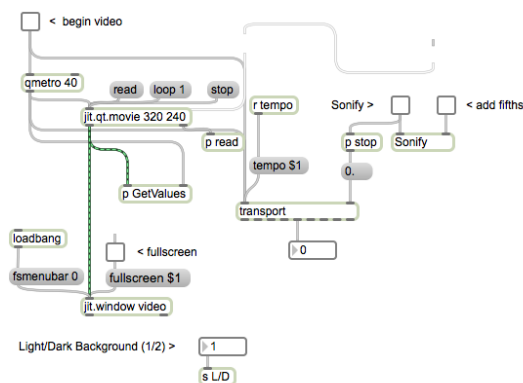
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το pitch λαμβάνει midi τιμές, οι οποίες όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, κυμαίνονται από 0-127. Στις τιμές του Hue γίνεται αντιστοίχιση (scaling) ώστε να κυμαίνονται από 0-30, του Saturation από 0-15 και του Lightness 0-10. Παρατηρούμε ότι για το Saturation (κορεσμός) η αντιστοίχιση είναι αντιστρόφως ανάλογη. Αυτό γιατί στην συνάρτηση όπου υπολογίζεται η τελική τιμή για το μουσικό φθόγγο (pitch) η τιμή του Saturation αφαιρείται σε αντίθεση με τις άλλες 2 που λειτουργούν προσθετικά. Έτσι, όσο "καθαρό" είναι ένα χρώμα, τόσο λιγότερη ποσότητα αφαιρείται και τόσο πιο υψίσυχνος φθόγγος επιλέγεται. Κατά τα άλλα, το Lightness πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή 2, κι έτσι για φωτεινότερα καρέ έχουμε πάλι πιο υψίσυχνους και ευδιάκριτους ήχους. Για κάθε ένα από τους 5 Τρόπους έχει οριστεί μια συγχορδία, έτσι ώστε να έχει μεγαλύτερη αρμονική συνοχή το αποτέλεσμα. Η τιμή του pitch χρησιμοποιείται για τη βασική μελωδία του ηχητικού αποτελέσματος. Ο χρήστης έχει την επιλογή να προστεθεί και μια δεύτερη μελωδική φωνή, η οποία βρίσκεται σε διάστημα 5ης από την πρώτη φωνή δημιουργώντας έτσι ένα πιο μοντέρνο ηχητικό αποτέλεσμα.

## 2.7. Διαμόρφωση μελωδικής κίνησης μπάσου και κρουστών

Επιπρόσθετα, έχουμε κίνηση του μπάσου, η οποία περιέχει ρυθμικές παραλλαγές, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από τυχαιότητα, αλλά και από τη συχνότητα αλλαγών χρωματικής περιοχής. Το υποπρόγραμμα το οποίο δημιουργεί τη μελωδική κίνηση του μπάσου δέχεται μια λίστα όπου θέτουμε τα ειδικά βάρη για μετάβαση από την κάθε κατάσταση σε οποιαδήποτε άλλη. Με αυτόν τον τρόπο με κάθε bang η έξοδος εξαρτάται από την προηγούμενη κατάσταση. Πρόκειται στην ουσία για προσομοίωση μοντέλου αλυσίδας Markov μηδενικής τάξης, 3 καταστάσεων.

Τέλος, υπάρχουν και κρουστά, τα οποία ενισχύουν το ρυθμικό κομμάτι του αποτελέσματος και περιέχουν κι αυτά τυχαιότητα με αντίστοιχο σκεπτικό με το μπάσο.

## 2.8. Συνοπτική παράθεση



## 2.1. Ολόκληρη η δομή του βασικού patcher

## 3. Αναφορές

- [1] Michael Edwards «Algorithmic Composition: Computational Thinking in Music» Communications of the ACM, Vol.54 No.7, pp 58-67
- [2] John A. Maurer «A Brief History of Algorithmic Composition» <https://ccrma.stanford.edu/~blackrse/algorithm.html> (1999)
- [3] John Bewley *Music Library Exhibit* May 24-Sept. 7, 2004
- [4] Ann Arbor *Algorithmic Composition: A Gentle Introduction to Music Composition Using Common LISP and Common Music* Michigan Publishing, University of Michigan Library (2003)
- [5] Savvas Kazazis «CREATIVE ASPECTS OF IMAGE SONIFICATION» 15th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-12), York, UK , September 17-21, 2012
- [6] Savvas Kazazis «Image Sonification (Shape, Color, Texture)» Diploma Thesis, Advisor: George Cambourakis, National Technical University, 2012
- [7] Ελευθέριος Σταμέλλος «Αυτόματη Ανάλυση Ρυθμικής Συμπεριφοράς Μουσικών Εκτελέσεων» διπλωματική εργασία, επιβλέπων Γεώργιος Καμπουράκης, HMMY ΕΜΠ 2014
- [8] Κυριακή Υψηλάντη «Αλγοριθμική Σύνθεση Ήχου και Μουσικής» διπλωματική εργασία, επιβλέπων Ανδρέας Φλώρος, Ιόνιο Πανεπιστήμιο 2009

# **Αξιοποίηση οικονομικών δεδομένων και δεικτών της ελληνικής κρίσης για μουσική σύνθεση μέσω αλγορίθμων σε Η/Υ**

Κωνσταντίνος Μπακογιάννης<sup>a</sup> & Γεώργιος Καμπουράκης<sup>b</sup>

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup>[kostas\\_bako@hotmail.com](mailto:kostas_bako@hotmail.com), <sup>b</sup>[gcamb@cs.ntua.gr](mailto:gcamb@cs.ntua.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην Ελλάδα την εποχή της κρίσης υπάρχει μια διάχυτη αντίληψη, ειδικά στα πληττόμενα στρώματα του ελληνικού λαού, ότι οι ανθρώπινες ζωές «ανταλλάσσονται» με αριθμούς, τους αριθμούς των οικονομικών δεικτών. Αυτή η κατάσταση οδήγησε στην ιδέα του να αξιοποιηθούν αυτοί οι αριθμοί αντιστρόφως, για να εκφράσουν δηλαδή τον ψυχισμό του λαού.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την παρουσίαση της διαδικασίας σύνθεσης ενός μουσικού κομματιού το οποίο προέκυψε εν πολλοίς από την επεξεργασία σε ηλεκτρονικό υπολογιστή κάποιων βασικών οικονομικών δεικτών. Ένα μουσικό έργο το οποίο προσεγγίζει φιλοσοφικά το ερώτημα του «Ποια είναι η μουσική της κρίσης». Είναι γραμμένο για σόλο πιάνο και για μουσική από Η/Υ (computer based synthesis).

## ***Computer aided algorithmic music composition with the use of financial data of Greek crisis***

## **ABSTRACT**

*Greece is under a major financial crisis. It is a common belief, or grievance, that Greek people are considered mostly as numbers in economic studies, rather than human beings. This, lead to the idea of using these numbers inversely: to express the psyche of people.*

*Therefore, this composition occurred by the computer based use of economic data for music creation. Considering the main theme of the conference, the idea of a Greek crisis sonification -what is the music of the numbers of the crisis?- meets philosophical aspects in an experimental way.*



## **Εισαγωγή**

Η μουσική σύνθεση, πέρα από τη φαινομενικά αυθαίρετη διαδικασία της έμπνευσης η οποία λανθασμένα θεωρείται ότι υπόκειται αποκλειστικά στη φαντασία του συνθέτη, στην πραγματικότητα είναι μία ορθολογική διαδικασία η οποία πηγάζει από την επεξεργασία των μικροδομών και μακροδομών των μουσικών μοτίβων τα οποίων επιλέγει ο συνθέτης και υπακούει στις μορφολογικές νόρμες που δανείζεται ή κατασκευάζει. Τις τελευταίες δεκαετίες, με την υπαγωγή των ανθρωπιστικών επιστημών (ανθρωπολογία, ιστορία, κοινωνιολογία, γλωσσολογία, ψυχολογία, παιδαγωγική κ.λ.π.) στη μεθοδολογία των θετικών επιστημών και στην αξιοποίηση των πορισμάτων τους, η μουσική επιστήμη εξελίχθηκε ραγδαία με τη χρήση των μαθηματικών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι παραπάνω δομές των μορφολογικές νόρμες αποπειράθηκε να προκύψουν με χρήση αλγορίθμων και μαθηματικών διεργασιών, πέρα από αυτές που συμβαίνουν στο μυαλό του συνθέτη, εγκαταλείποντας τον κλάδο της αλγοριθμικής μουσικής.

### **1. Μεθοδολογία**

#### *1.1. Μέρος σύνθεσης από Η/Υ*

Όσον αφορά τη μουσική από Η/Υ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MAX MSP, ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού. Ως πρωταρχικό υλικό χρησιμοποιήθηκε η βασική μελωδία, τόσο σε MIDI μορφή όσο και ηχογραφημένη, του «Πότε θα κάνει ξαστεριά» (παραδοσιακό κρητικό τραγούδι το οποίο εδώ και δεκαετίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις ελπίδες και τους αγώνες του ελληνικού λαού). Αυτό το πρωταρχικό υλικό τροποποιήθηκε ποικιλοτρόπως με τη χρήση οικονομικών δεικτών (χρέος, ΑΕΠ, ποσοστά ανεργίας, αυτοκτονιών κ.α.). Τα στοιχεία που τροποποιήθηκαν ήταν το τονικό ύψος, η διάρκεια, η ένταση, τα μουσικά διαστήματα. Συνελίχθησαν οι καμπύλες των μελωδικών γραμμών με τις καμπύλες των οικονομικών δεικτών και έγιναν ποικίλες διαμορφώσεις (am, fm, ring).

#### *1.2. Οικονομικοί δείκτες*

Τα στοιχεία για τους οικονομικούς δείκτες πάρθηκαν από επίσημες πηγές (ΔΝΤ, Ευρωπαϊκή Κεντρική Τράπεζα, ΕΛΣΤΑΤ, Τράπεζα της Ελλάδος) και αφορούν την πενταετία 2009-2013. Τα στοιχεία αυτά είναι μηνιαία επομένων προέκυψαν 60 αριθμοί (5 χρόνια επί 12 μήνες) οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ως δομικές μονάδες. Κάθε δομική μονάδα αντιστοιχεί σε 6,5 δευτερόλεπτα επομένως προέκυψε ένα έργο 6λεπτών και 30δευτερολέπτων (6,5 δευτερόλεπτα επί 60 δομικές μονάδες).

#### *1.3. Μέρος πιάνου*

Αναφορικά με το περιεχόμενο του σόλο πιάνου, η κεντρική ιδέα ήταν η συνοδεία του μέρους το οποίο προέκυψε από Η/Υ. Με χρήση των οικονομικών δεικτών, μετά από κανονικοποίησή τους, κατασκευάσαμε δώδεκα συγχορδίες οι

οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγία και υλικό ενός πιανιστικού αυτοσχεδιασμού. Το κομμάτι ολοκληρώνεται με το θέμα της μελωδίας του κρητικού τραγουδιού αναφοράς το οποίο συνηχεί με ένα αντίθεμα.

#### 1.4. Αισθητική και Φιλοσοφία

Όσον αφορά την αισθητική και τη φιλοσοφία του εν λόγω κομματιού, η αρχική ιδέα δεν ήταν η διαμόρφωση σαφών μελωδικών γραμμών, αντιθέτως η δημιουργία ηχοχρωμάτων και ατονικών μοτίβων, τα οποία να προσεγγίζουν την αισθητική αντίληψη του συνθέτη αναφορικά με το θέμα της σύνθεσης.

## 2. Παρουσίαση Αλγορίθμου

### 2.1. Ένταση κομματιού

Η ένταση διαμορφώνεται με μια κανονικοποίηση των τιμών του ΑΕΠ με βάση τον τύπο:

$$\text{Ένταση} = \text{ΑΕΠ} \cdot (-0,000019) + 1,7025$$

### 2.2. Ηχητική βάση

Το ηχογραφημένο τμήμα του «Πότε θα κάνει ξαστεριά» που έχουμε χρησιμοποιήσει περιλαμβάνει την εισαγωγή του κομματιού στην οποία κυριαρχεί η λύρα. Το τμήμα αυτό παίζεται επαναλαμβανόμενα με κυμαινόμενη ταχύτητα η οποία προκύπτει από κανονικοποίηση των δεδομένων για το χρέος με βάση τον τύπο:

$$\text{Ταχύτητα επανάληψης} = \text{Χρέος} \cdot (-0,000002) - 0,45$$

Η ταχύτητα αυτή είναι ιδιαίτερος αργή, δίνοντας στο ηχοχρώμα της λύρας ένα βαθύ μπάσο ύφους, αργόσυρτο, θυμίζοντας κόντρα μπάσο παιγμένο με δοξάρι.

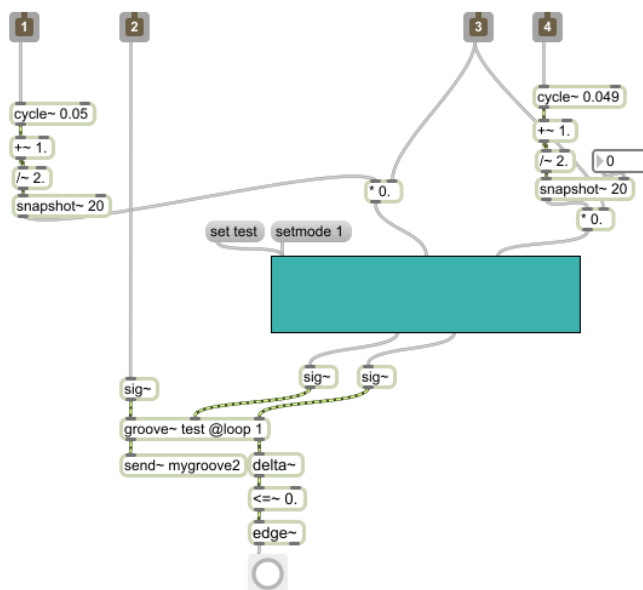
### 2.3. Μελωδία σε σφύριγμα

Στο ίδιο ηχογραφημένο κομμάτι με παραπάνω επιλέγουμε να δώσουμε μία άλλη υπόσταση. Από τη βαθειά, μπάσα, αργόσυρτη λειτουργία, σε μια υψίσυχη, και γρήγορα εναλλασσόμενη άτυπη μελωδία. Αυτό επιτυγχάνεται με αναπαραγωγή του μέρους αυτού με ταχύτητα 17 φορές μεγαλύτερη της κανονικής. Επίσης, η επανάληψη («λούπα») έχει μεταβαλλόμενα όρια αρχής και τέλους τα οποία μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με πολύ χαμηλή συχνότητα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.

### 2.4. Γραμμή μπάσου

Στο ύψος που διαμορφώνει η ηχητική βάση που περιγράφεται στην παράγραφο 2.2. σχεδιάστηκε και μια μελωδική κίνηση ενός μπάσου. Όπως αναφέραμε στη μεθοδολογία, η μελωδία του «Πότε θα κάνει ξαστεριά» αποτυπώθηκε και σε midi μορφή. Από τη βάση αυτή δεδομένων επιλέξαμε να επιλεγούν με τυχαίο τρόπο νότες, των οποίων η συχνότητα έγινε η είσοδος σε μια γεννήτρια ημιτόνου, το σήμα

αυτό ενισχύθηκε με μία δυναμική περιβάλλουσα της επιλογής με σχετικά αργό attack, ακόμα πιο αργό decay, χωρίς sustain και με αργό release (ώστε να προσομοιάζει μπάσο παιγμένο με δοξάρι). Το σήμα αυτό υπέστη πλάτους (amplitude modulation) βάση τα στοιχεία για την ανεργία διαιρούμενα κατά 8,9 φορές.



Εικόνα 2.1. Ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα όρια αναπαραγωγής «λούπας»

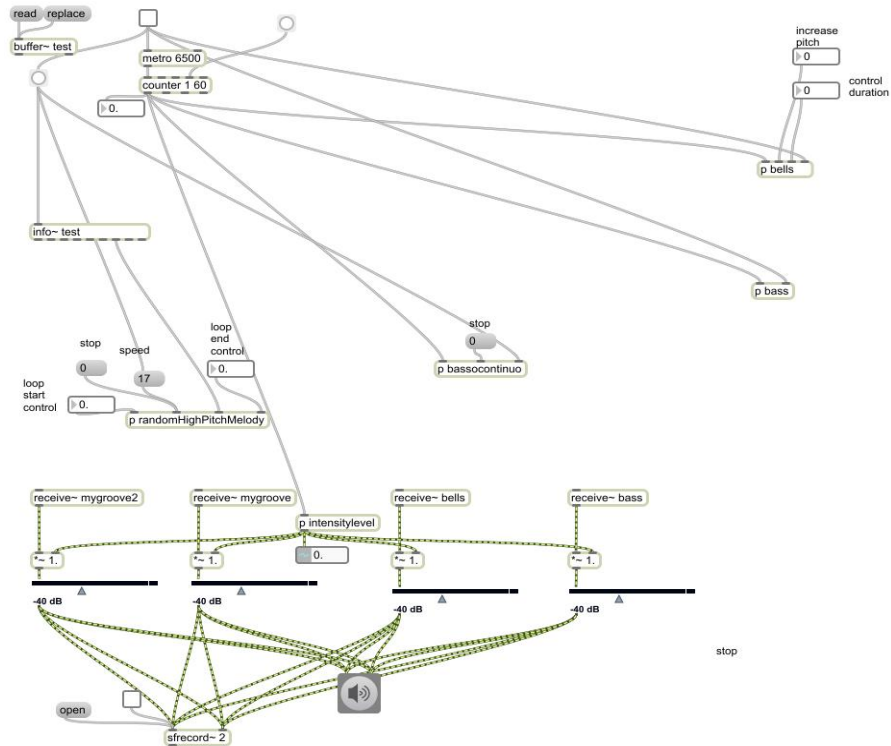
## 2.5. Καμπανάκια

Δυστυχές σημείο των καιρών μας είναι η δραματική αύξηση των αυτοκτονιών. Η ηχητική αποτύπωση αυτών έγινε με καμπανάκια, τα οποία τα κατασκευάσαμε μέσω της μεθόδου αθροιστικής σύνθεσης (additive synthesis). Από τη βάση δεδομένων της μελωδίας αποθηκευμένης σε midi μορφή εξάγονται πάλι με τυχαίο τρόπο νότες, των οποίων οι συχνότητες πολλαπλασιάζονται με τα δεδομένα αναφορικά με τις αυτοκτονίες, κανονικοποιούνται, και διαμορφώνουν την ταχύτητα με την οποία επιλέγονται οι νότες. Όσο αυξάνονται ο ρυθμός των αυτοκτονιών τόσο αυξάνεται η ταχύτητα της μελωδίας.

## 2.6. Πιανιστικό μέρος

Με γραμμική κανονικοποίηση των οικονομικών δεικτών που χρησιμοποιήσαμε προέκυψαν κάποιες συχνότητες, οι οποίες αντιστοιχήθηκαν στις νότες στις οποίες αποτελούν θεμέλιο, δημιουργώντας συγχορδίες. Αν η συχνότητα προσεγγίζει συχνότητα θεμελίου πραγματικής νότας συγκερασμένου συστήματος τότε επιλέγεται η νότα αυτή. Αν βρίσκεται στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο νοτών, τότε επιλέγονται και οι δύο νότες. Έτσι, προκύπτουν τετράφωνες έως, θεωρητικά,

οκτάφωνες συγχορδίες. Αυτές οι συγχορδίες αποτελούν τη βάση κατά την οποία ο μουσικός καλείται να χρησιμοποιήσει για να αυτοσχεδιάσει με βάση οδηγίες που του δίνονται κάθε φορά αναφορικά με τη δυναμική και την πυκνότητα στο παίξιμο, ενισχύοντας έτσι το βαθμό τυχαιότητας και το στοχαστικό χαρακτήρα της σύνθεσης (αλεατορική μουσική).



Εικόνα 2.2. Συνολική παρουσίαση προγράμματος (χωρίς τα υποπρογράμματα)

### 3. Αναφορές

- [1] Ταξιάρχης Διαμαντόπουλος, *Προγραμματισμός και Σύνθεση Ήχων*, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Εκδόσεις Έλλην, Αθήνα (2010)
- [2] Risset, J. -C. «Additive Synthesis of Inharmonic Tones» *Current Directions in Computer Music Research*, MIT press, pp. 159-163 (1989)
- [3] Moore, F.R. «Amplitude Modulation» *Elements of Computer Music*, Prentice Hall, pp 185 – 187 (1990)
- [4] Αναστασία Γεωργάκη, Σημειώσεις στο Μάθημα ΑΝΑΛΥΣΗ και ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΧΩΝ, Τμήμα Μουσικών Σπουδών ΕΚΠΑ, Αθήνα (2003).
- [5] Leontios Hadjileontiadis, *Music Composition & Mathematical Thinking: Formulation of the creative impetus*, LAP LAMBERT Academic Publishing (2013)

**FOR-EST:**  
***Η άλλη διάσταση του τοπίου –***  
***Η άλλη όψη του ηχητικού υλικού***

Βασιλική Τσεκουροπούλου<sup>1,a</sup>, Δημήτρης Β. Παπαδόπουλος<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Συνθέτρια – Παιδαγωγός, Στ. Σαράφη 3, Θεσ/νίκη

<sup>2</sup> Μουσικός – Ηθοποιός, Φαναρίου 15, Θεσ/νίκη

<sup>a</sup> [vtsekouropoulou@yahoo.gr](mailto:vtsekouropoulou@yahoo.gr), <sup>b</sup> [dimitrisath@yahoo.gr](mailto:dimitrisath@yahoo.gr)

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το συγκεκριμένο άρθρο σκοπό έχει την παρουσίαση ηχητικών καταστάσεων που λαμβάνουν χώρα σε ένα φυσικό τοπίο, όπως είναι το δάσος, (ιδιαίτερω παρουσιάζεται ένα οικοσύστημα σε ελάχιστα χιλιόμετρα απόσταση εκτός Θεσσαλονίκης, περιοχή Πλατανάκια του Πανοράματος) και παρουσιάζει την σύνδεση αυτούσιων ήχων συνδυασμένους με κατασκευασμένους ήχους, δηλαδή ήχους φτιαγμένους με ανθρώπινη παρέμβαση. Η όλη σύνθεση και παρουσίαση αποσκοπεί στην ενημέρωση, κέντρισμα του ενδιαφέροντος και επαγρύπνηση του κοινού, για καθημερινά θέματα οικολογίας, που συχνά είναι παραμελημένα ή αδιάφορα. Όλοι επιθυμούμε μια «άλλη» ποιότητα ήχου και φύσης, ας αναρωτηθούμε όμως αν την επιζητούμε πραγματικά. Εδώ, έγκειται και η πρωτοτυπία της εν λόγω έρευνας, στην απλότητα της και στη σπουδαιότητά της. Από τη μια η φύση έτοιμη να καλοδεχτεί όλους μας και απέναντι εμείς, όχι σαν δέκτες αλλά ως εισβολείς.*

**FOR-EST:**  
***Another dimension of the landscape –***  
***Another option of the sound***

**ABSTRACT**

*This specific paper targets in presenting sound situations that take place in natural landscapes, (particularly in the area Platanakia, Panorama in Thessaloniki). It also aims at connecting pure sounds from the environment with man-made ones. The whole project-composition wants to inform, intrigue and alert the public for environmental issues which on the one hand are really simple and common but on the other, neglected. It is true that we all need and desire a quality of nature and sound but are we actually doing something to achieve it? At this point, the researchers try to implicate man and nature and alert consciousness, since nature welcomes us all, we should be the assistants not the invaders.*

## 1. Εισαγωγή

Το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας αποτελεί η αναζήτηση, πάντα σε φυσικό τοπίο, πρωτόλειων ήχων, η χρήση των ήχων που κατασκευάστηκαν με ανθρώπινη παρέμβαση, έχοντας ως απώτερο σκοπό τον συνδυασμό τους, την περαιτέρω επεξεργασία και σύνθεσή τους, ώστε να παραχθεί ένα μουσικό έργο. Το μουσικό έργο που προέκυψε, ήταν το αποτέλεσμα αυτών των συνδυασμών και περιλαμβάνει πέραν των φυσικών ήχων, ήχο από υπολογιστή, ηχογραφημένο τσέλο, ζωντανό τσέλο επί σκηνής και οθόνη προβολής. Αποτελεί έναν συνδυασμό ηχητικών τοπίων, σιωπής- θορύβου, ανθρώπινων φωνών, απλής και σύνθετης μουσικής επεξεργασίας. Κατά την εκτέλεση υπάρχει προτζέκτορας, ηχεία και υπολογιστής.

Η δομή του εν λόγω άρθρου, ακολουθεί κατά προσέγγιση την διαδικασία της σύνθεσης μιας μουσικής φόρμας, δομημένη ανατρεπτικά όμως με έντονο το στοιχείο του αλεατορισμού, την τυχαιότητα στη μουσική με ανοιχτή μουσική φόρμα [1]. Αρχικά, θα εξηγηθεί πώς ξεκίνησε η ιδέα, πώς καταγράφηκε το υλικό- πώς έγινε η ηχογράφηση, και κατόπιν πώς πραγματοποιήθηκε η σύνθεση.

## 2. Αρχικός Σχεδιασμός

Η ομάδα σύνθεσης του Δημοτικού Ωδείου Καλαμαριάς, Δ. Παπαδόπουλος, Δ. Σιδερίδου, Ε. Τσανακτσίδης, υπό τη επίβλεψη της καθηγήτριας Β. Τσεκουροπούλου, στα πλαίσια μιας ομαδικής δουλειάς, δημιούργησε τις συνθήκες υλοποίησης ενός εργαστηρίου, ο σκοπός του οποίου ήταν να εκθέσει φυσικά τοπία, να συνθέσει νέους ήχους μουσικής, και να προβληματίσει, προβάλλοντας νέα ηχητικά δρώμενα. Η περιοχή μελέτης (δάσος του Πανοράματος Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα η περιοχή «Πλατανάκια»), επιλέχθηκε εσκεμμένα, για να γίνει αισθητή η εγγύτητα της φύσης στην πόλη και η άμεση πρόσβαση που μπορεί να έχει κανείς στο φυσικό περιβάλλον, κάτι που αγνοείται ή ξεχνιέται τις περισσότερες φορές.

Η πρωτοτυπία του έγκειται στο γεγονός ότι δημιουργήθηκε μουσικό ηχοτοπίο αυθόρμητα, από ερεθίσματα που προέκυψαν κατά την περιήγησή στο δάσος. Η ανάγκη της φυγής των μαθητών από την αίθουσα διδασκαλίας και από την παραδοσιακή μουσική φόρμα οδήγησε την ομάδα σύνθεσης σε ένα φυσικό περιβάλλον πλούσιο σε αυτούσιο ηχητικό υλικό. Ο συνεχής βομβαρδισμός ήχων της πόλης ώθησε τους συγγραφείς του άρθρου, στην εξερεύνηση έξω από τα τείχη και στην χρήση αυθεντικών ήχων, όχι αποκλειστικά από μουσικά όργανα και επιπλέον στην ένωση «θορύβου» και μουσικής. Σύμφωνα με τον Jacques Attali, υπάρχει ο «φυσικός» θόρυβος και ο «κατεργασμένος». Ο «φυσικός» μεταδίδει πληροφορίες όπως π.χ. κόρνες αυτοκινήτων ή κομπρεσέρ σε λειτουργία, και είναι ευνόητο ότι εξυπηρετεί την απεικόνιση της καθημερινότητας. Αν όμως συνδυαστεί και επεξεργαστεί, τότε υπάρχει εξομάλυνσή του και η πληροφορία που δέχεται το αυτί του κάθε ακροατή είναι φιλτραρισμένη, άρα οργανωμένη και επομένως αποτελεί μουσική πληροφορία [2].

Δίχως να απορρίπτεται το μουσικό όργανο, έγινε προσπάθεια συνδυασμού όλων των παραπάνω και η απόπειρα δημιουργίας ενός νέου ηχητικού πεδίου που συνδυάζει το φυσικό με το κατασκευασμένο και εν μέρει το τεχνολογικό.

### **3. Καταγραφή - Τεχνικά χαρακτηριστικά**

#### *3.1 Καταγραφή*

Η ηχογράφιση έλαβε χώρα στις 20/02/2014. Αρχικά ηχογραφήθηκε ο περιβάλλοντας χώρος του δάσους, ώστε αν χρειαστεί, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως «χαλί» (background music layer), καλύπτοντας μια έκταση τριών περίπου χιλιομέτρων. Η διάρκεια της ηχογράφησης ήταν μία ώρα και δέκα λεπτά. Ηχογραφήθηκαν συγκεκριμένοι ήχοι, στους οποίους δεν πραγματοποιήθηκε καμία μετέπειτα παρέμβαση, πιο συγκεκριμένα: ήχος τρεχούμενου νερού, θρόισμα φύλλων, τιτιβίσματα πουλιών, γαύγισμα σκύλων.

Παράλληλα, ηχογραφήθηκαν ήχοι οι οποίοι προκλήθηκαν με την παρέμβασή της ομάδας (χτυπήματα ξύλων διαφόρων διαστάσεων μεταξύ τους ή πάνω σε πέτρες, ανακάτεμα ξερών φύλλων, πέταγμα πετρών σε νερό από διάφορες αποστάσεις, βάδισμα και σύρσιμο πάνω σε φύλλα και κλαδιά). Η ηχογράφιση ολοκληρώθηκε με την προσθήκη φωνών (φράσεων, λέξεων, ήχων) που προέκυψαν αυθόρμητα, για να δηλωθεί η ανθρώπινη ύπαρξη ως σημαντική και κυρίαρχη στο τοπίο. Σε αυτή τη φάση της καταγραφής, υπήρξε η ανθρώπινη παρέμβαση, η αλλιώς επέμβαση στη φύση, επειδή ουσιαστικά «αλλοιώθηκε το ηχητικό σκηνικό» και δημιουργήθηκαν με υλικά της φύσης καινούργια ηχοτοπία.

#### *3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά*

Για την καταγραφή των ήχων χρησιμοποιήθηκε φορητός καταγραφέας ήχου, handy recorder H4n, μάρκας zoom. Στην επεξεργασία χρησιμοποιήθηκε το εφέ της αντήχησης (reverb) τα χαρακτηριστικά του οποίου έχουν ως εξής: Size – large, reverb time 1.00 second. Οι αποστάσεις από τις πηγές των ήχων ήταν: 0,3 m – 2 m (τρεχούμενο νερό, σταγόνες νερού, τρίψιμο ξερών φύλλων) 2 m – 5 m (βήματα, πτώση βράχων στο νερό, ρυάκι, ομιλίες) 5 m – 100 m (ομιλίες, θρόισμα φύλλων, ρυάκι, τιτιβίσματα πουλιών). Η καταγραφή κοντινών αποστάσεων αποσκοπούσε στην καλύτερη απόδοση του ήχου (πιο ισχυρό σήμα), ενώ η αντίστοιχη καταγραφή μακρινών στο να καλυφθεί ευρύτερο ηχητικό πεδίο (πιο απομακρυσμένοι ήχοι).

Για την επεξεργασία του ηχητικού υλικού χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα του Cubase sx. Όλα τα ηχητικά δείγματα περάστηκαν σε κανάλια τα οποία είχαν ακριβώς τις ίδιες ρυθμίσεις (compressor dynamic, reverb). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν αλλοιώθηκε με περαιτέρω εφέ κανένας άλλος ήχος. Χρησιμοποιήθηκαν στο σύνολό τους όπως ακριβώς ηχογραφήθηκαν, γιατί δεν ήταν θεμιτό να υπάρξει μεγάλη αλλοίωση του καταγεγραμμένου υλικού. Οι τεχνικές παρέμβασης που χρησιμοποιήθηκαν πάνω στο ηχητικό υλικό ήταν η τεχνική της αποκοπής πολύ μικρών αποσπασμάτων καθώς και η ένωσή τους με άλλα πολύ μικρά αποσπάσματα, έτσι ώστε να δημιουργείται καινούριο ηχητικό αποτέλεσμα.

### **4. Μουσική Σύνθεση**

Η επεξεργασία και η σύνθεση διαπλέκονται ως αλληλένδετες, αλλά ξεχωρίζουν επίσης όντας ανεξάρτητες η μία από την άλλη. Δεν ήταν στόχος να παρουσιαστεί απογυμνωμένη μουσική, δηλαδή μια μουσική σύνθεση για κάποια όργανα, ούτε από την άλλη τεχνολογία και μονόπλευρες τεχνικές καταστάσεις, παρά αντίθεση και

διαπλοκή. Έχοντας ένα σκεπτικό, τη φύση-δάσος, που λειτουργεί μεν από μόνο του, αλλά συγχρόνως εμπλουτίζεται με παρεμβατικούς ήχους, δημιουργήθηκε ένα μουσικό υλικό-μελωδία που στηριζόμενο στους φυσικούς ήχους και ταυτόχρονα ανεξαρτητοποιημένο από αυτούς, έδωσε ένα ολοκληρωμένο ηχητικό αποτέλεσμα. Στηριζόμενοι στον John Cage που μας χάρισε μια ηχητική κληρονομιά στηριγμένη στην ακαθόριστη μουσική κίνηση (fluxus), στο ατέρμονο παιχνίδι θορύβου-σιωπής, αλλά και στη δύναμη του τυχαίου [3], έγινε η προσπάθεια αναδημιουργίας μιας ανάλογης μουσικής σύνθεσης εμπλέκοντας φυσικά τοπία.

Ο Γιάννης Ξενάκης από την άλλη, προσπαθώντας να εφαρμόσει στη μουσική τους φυσικούς νόμους που διέπουν διάφορα φαινόμενα, όπως το θρόισμα των φύλλων ενός δέντρου, την οχλοβοή μιας διαδήλωσης, το τερέτισμα των τζιτζικιών, δημιούργησε τη μουσική «ηχητικών μαζών». Στο πρώτο έργο του «Μεταστάσεις» (1954) για 61 όργανα, χρησιμοποιεί μαζικά glissandi (κυλίσματα του ήχου προς μια κατεύθυνση), προς μίμηση των φυσικών ήχων [4]. Glissandi υπάρχουν, προς διάφορες κατευθύνσεις, και στο έργο, πάνω στο τσέλο, που αναπαριστούν άγριους φυσικούς ήχους, ενώ μετέπειτα επέρχεται μια ηρεμία με την εισαγωγή μιας μελωδικής γραμμής.

Το ρυθμικό στοιχείο του έργου αποτελείται από πραγματικά ηχητικά τοπία (πέντε ηχοτοπία: φυσικό τοπίο/πουλάκια-φωνές, νερό, γαυγίσματα) που συλλέχτηκαν κατά τη διάρκεια της ηχογράφησης (πέτρες που πέφτουν σε γκρεμό, χτύπημα ξύλων κλπ). Με την τεχνική της αποκοπής μέρους αυτών των ηχητικών τοπίων δημιουργήθηκε η εντύπωση ύπαρξης ρυθμικού μουσικού μοτίβου, που επαναλαμβάνεται ή διακόπτεται.

Το μεσαίο τμήμα του έργου υπηρετεί αυτό που ονομάστηκε όνειρο και είναι στην ουσία αυτό που ο καθένας μπορεί να φανταστεί ή να αισθανθεί μέσα σε ένα δάσος. Σε αυτό το τμήμα έχουμε την εμφάνιση ενός νέου, μη ηχογραφημένου ηλεκτρονικού ήχου, καθώς και μουσική σύνθεση για τσέλο. Η σύνθεση για τσέλο έγινε αφότου ολοκληρώθηκε η ηχογράφηση, και λειτούργησε ως ένα επιπλέον επίπεδο (layer) στο ήδη υπάρχον ηχητικό υλικό.

Η μουσική σύνθεση έχει διττό ρόλο, συμβαδίζει αλλά και συγχρόνως ανεξαρτητοποιείται από το καταγεγραμμένο υλικό. Είναι ένα συνεκτικό μουσικό κομμάτι που συνδυάζει θόρυβο, μελωδία, παρατεταμένους και αποσπασματικούς ήχους, με σαφείς αναφορές στο δάσος. Σε ότι αφορά στο θόρυβο, ο οποίος για τον John Cage αποτελούσε μουσική, ενώ η απόλυτη σιωπή δεν υφίστατο [5], αποτελεί απαραίτητο στοιχείο του έργου κατά αντιστοιχία με τα θορυβώδη περιβάλλοντα της πόλης που μας κατακλύζουν καθημερινά. Είναι μια απελευθέρωση της μουσικής από τη αρμονία και μια ένωσή της με τον μουσικό ήχο και το περιβάλλον.

Ας μην ξεχνιέται πως ο θόρυβος προϋπάρχει του ήχου και είναι αυτό που δέχεται το αισθητήριο της ακοής ως πρώτο ερέθισμα. Από το θόρυβο λοιπόν, φτάνουμε στη μουσική (αφού οργανωθεί) και η μουσική αυτή οργάνωση του θορύβου κατά επέκταση καθρεφτίζει τη δομή της κοινωνίας [6]. Αν γίνει δεκτό ότι υπάρχει ο «φυσικός» θόρυβος και ο «κατεργασμένος» τότε ίσως μπορέσει να γίνει κατανοητή η χρήση του στη μουσική. Αν ο «φυσικός» θόρυβος μεταδίδει πληροφορίες όπως π.χ. κόρνες αυτοκινήτων ή κομπρεσέρ σε λειτουργία, είναι ευνόητο ότι εξυπηρετεί την απεικόνιση της καθημερινότητας. Αν όμως είναι συνδυασμένος και επεξεργασμένος θόρυβος τότε υπάρχει η εξομάλυνσή του και η πληροφορία που δέχεται το αυτί του κάθε ακροατή είναι φιλτραρισμένη, άρα οργανωμένη και επομένως είναι μουσική πληροφορία.



Η ιδέα ωστόσο παραμένει στο να μην υπάρχει εξάρτηση μεταξύ ζωντανού ηχητικού υλικού και ηχογραφημένου, ώστε ο ηχογραφημένος ήχος και η σύνθεση για τσέλο, να μπορούν να εκτελεσθούν σαν δύο ανεξάρτητες μουσικές συνθέσεις, όμως ταυτόχρονα να εκτελούνται και μαζί ως ολοκληρωμένες σε συνάφεια με την αρμονία και την ισορροπία της φύσης. Επιπλέον ηχογραφήθηκε ως δεύτερο βήμα και το σόλο τσέλο και περάστηκε πάνω από τα υπάρχοντα στοιχεία στο Cubase sx., με συνέπεια να έχουμε δύο εκδοχές του “For-est” με ηχογραφημένο τσέλο και χωρίς.

Στην περίπτωση της καταγραφής που περιλαμβάνει και το ηχογραφημένο τσέλο, εκτελείται ζωντανά η μουσική σύνθεση από τσελίστα που εκτελεί τη μουσική σύνθεση με διαφορά φάσης –χωρίς να είναι δεσμευτικό το πόση θα είναι η διαφορά φάσης- από το ηχογραφημένο τσέλο, δίνοντας την αίσθηση της παρέμβασης, κάνοντας αναφορά στην παρέμβαση στη φύση-δάσος από τον άνθρωπο. Η πρωτοτυπία της εκτέλεσης ανάγεται στο γεγονός ότι κάθε φορά η εκτέλεση μπορεί να είναι διαφορετική, αφού ναι μεν υπάρχει καταγεγραμμένη παρτιτούρα και δεδομένη διαφορά εισόδου από το ηχογραφημένο τσέλο, αλλά ο εκτελεστής είναι ελεύθερος να λειτουργήσει όπως εκείνος-η επιθυμεί και να ξεκινήσει σε διάφορα σημεία του έργου ή να κάνει μεγαλύτερες παύσεις, δίνοντας έτσι πολλαπλές εκδοχές μιας μόνο μουσικής σύνθεσης. Ο μουσικός δεν είναι αποστασιοποιημένος από το φυσικό-ηχητικό τοπίο, επειδή παίζοντας αντικατοπτρίζει τον εαυτό του μέσα σε αυτό και συνδέεται νοερά με το δάσος ενώ βρίσκεται μέσα σε μια συναυλιακή αίθουσα.

Η συνάφεια του εγχειρήματος με τις απροσδόκητες καταστάσεις που λαμβάνουν χώρα στη φύση είναι εμφανής. Όπως η νηνεμία, η ησυχία, ακολουθείται απρόσμενα από μια καταιγίδα αναφορικά και στις μελωδίες συμβαίνει το ίδιο, χωρίς συγκεκριμένες ενδείξεις και προγραμματισμό, οι αργές κρατημένες νότες ακολουθούνται από πολύ δυνατές κάθετες δοξαριές που προσομοιάζουν το θόρυβο. Συνακόλουθα ενεργοποιούνται διαφορετικά τα αισθητήρια όργανα και γίνονται αντιληπτά ηχητικά πεδία που δεν μπορούν να συνειδητοποιηθούν ή να αναγνωριστούν από πριν.

## **5. Συμπεράσματα**

Σιωπή, τυχαιότητα, περιβαλλοντικοί ήχοι, θόρυβος, ηλεκτρονικά και οπτικά μέσα, εγκατάλειψη κάθε παραδοσιακής φόρμας, έγιναν τα νέα πρότυπα, που οδήγησαν το μουσικό αποτέλεσμα σε διάφορες εκδοχές εκτέλεσης μιας μόνο παρτιτούρας, δημιουργώντας έτσι νέα ηχητικά δεδομένα.

Όπως προαναφέρθηκε, η εργασία ήταν ομαδική και το τελικό αποτέλεσμα έδωσε έναυσμα, ώστε οι ηχογραφήσεις αυτές να αποτελέσουν μουσικό υλικό και να εξελιχθεί η συγκεκριμένη μουσική για να αφορά το σύνολο των εμπλεκόμενων, είτε ως κοινό, είτε ως παρατηρητές του περιβάλλοντος χώρου. Η τεχνολογία, δεν υπήρξε δεσμευτική, αλλά απαραίτητη (είναι άλλωστε ζητούμενο η παρουσία της), θα μπορούσε να λεχθεί ότι η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε στην υπηρεσία της τέχνης. Στόχος είναι να συνεχιστεί και να επεκταθεί το συγκεκριμένο έργο διάρκειας 6.40’’, φτάνοντας σε ένα δεύτερο επίπεδο συντονισμού μουσικής και φυσικού ηχητικού τοπίου. Σε μια πρώτη παρουσίαση που έγινε στις 15/05/2014, το κοινό είχε την ευκαιρία να βιώσει τη μεταφορά ενός ηχητικού τοπίου μέσα σε ένα συναυλιακό

χώρο και να αντιληφθεί το ατούσιο του τοπίου, να λάβει ερεθίσματα και να κατανοήσει τη σπουδαιότητα της συνύπαρξης του με τον ήχο και τη φύση.

## **6. Αναφορές**

- [1] Machlis J., Η απόλαυση της Μουσικής, Εισαγωγή στην Ιστορία- Μορφολογία της Δυτικής Μουσικής, μετάφραση Πυργιώτης Δ., εκδόσεις fagotto, Αθήνα (1993).
- [2] Attali Z., *Θόρυβοι-Προβλήματα του Καιρού μας*, μετάφραση Ανδριτσάνου Ντ., εκδόσεις Κέδρος, Αθήνα (1978).
- [3] Machlis J., Η απόλαυση της Μουσικής, Εισαγωγή στην Ιστορία- Μορφολογία της Δυτικής Μουσικής, μετάφραση Πυργιώτης Δ., εκδόσεις fagotto, Αθήνα (1993).
- [4] Kennedy M., *The concise Oxford Dictionary of Music*, Oxford University Press, New York (1980).
- [5] Cage J., *Writer, selected texts*, edited and introduced by Kostelanetz R., Cooper Square Press, New York (2000).
- [6] Attali Z., *Θόρυβοι-Προβλήματα του Καιρού μας*, μετάφραση Ανδριτσάνου Ντ., εκδόσεις Κέδρος, Αθήνα (1978).

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά τον κύριο Χάρη Πάλλα για την πολύτιμη συμβολή του στο εικαστικό μέρος του εγχειρήματος.

# ***On the Sound of Urban Centres: EU COST Action TD0804 “Soundscape of European Cities and Landscapes”***

K. Chourmouziadou<sup>1,a</sup> & K. Sakantamis<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Architect Engineer, 5 Omirou str., Thessaloniki

<sup>2</sup> School of Architecture, A.U.Th

<sup>a</sup> [k.chourmouziadou@windowslive.com](mailto:k.chourmouziadou@windowslive.com), <sup>b</sup> [k.sakantamis@live.com](mailto:k.sakantamis@live.com)

## **ABSTRACT**

*Soundscape research represents a paradigm shift as it firstly counts on human and social sciences (e.g. psychology, sociology, architecture, anthropology, medicine) and then on physics, but also accounts for the diversity of soundscapes across countries and cultures. This paper presents the 4-year collaboration and outcomes of research groups and experts working on various aspects of soundscape, of 23 European countries, who joined efforts to set up the EU COST Action TD0804 ‘Soundscape of European Cities and Landscapes’ in late 2008, in order to collect data, harmonise concepts, optimise results and develop tools that could be used by different professions for the improvement of the sonic environment in urban and rural areas.*

## ***Περί ήχου αστικών κέντρων: Ευρωπαϊκή Δράση EU COST ACTION: TD0804 “SOUNDSCAPE of EUROPEAN CITES and LANDSCAPES”***

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η έρευνα του ηχοτοπίου βασίζεται αρχικά στις κοινωνικές και ανθρωπιστικές επιστήμες (ψυχολογία, ανθρωπολογία, αρχιτεκτονική και ιατρική) και έπειτα τη φυσική, καθώς επίσης εξετάζει την ποικιλομορφία ηχοτοπίων μεταξύ διαφορετικών χωρών και πολιτισμών. Η εργασία αυτή παρουσιάζει την τετραετή συνεργασία ερευνητικών ομάδων και ακαδημαϊκών με διαφορετικές προσεγγίσεις στην έρευνα του ηχοτοπίου, 23 Ευρωπαϊκών χωρών, μέσω της προτεινόμενης Ευρωπαϊκής δράσης EU COST Action TD0804 ‘Soundscape of European Cities and Landscapes’, η οποία ξεκίνησε το 2008 με στόχο την συλλογή υλικού, την εναρμόνιση εννοιών, την βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων και την δημιουργία εργαλείων για την βελτίωση του ηχητικού περιβάλλοντος των πόλεων και της επαρχίας.*

## **Introduction**

Soundscape is an increasing topic of investigation among researchers, acousticians, psychologists, anthropologists, sociologists and architects, as its research involves much more than reducing the sound level, which is the main focus of EU environmental noise policy. Noise control does not necessarily lead to improved quality of life in urban/rural areas and a new multidisciplinary approach was essential.

This paper presents the 4-year collaboration of the research groups and experts working on various aspects of soundscape, initially of 18 European countries, who joined efforts to set up the EU COST Action TD0804 'Soundscape of European Cities and Landscapes' in late 2008, in order to collect data, harmonise concepts, optimise results and develop tools that could be used by different professions for the improvement of the sonic environment in urban and rural areas. The Action, aiming at providing the underpinning science and practical guidance in soundscape, created a vibrant/productive international network of finally 52 participants from 23 COST countries and 10 participants outside Europe. Collaborations with other international and national networks EU projects and networks and EU COST Actions were achieved.

### **1. Organisation of the Action**

Action TD0804 was formed due to the need of an interdisciplinary and international collaboration on soundscape research. The proposal, including aims and objectives, scientific program, work plans, benefits and outcomes, organisation and coordination plans, was submitted in the form of a Memorandum of Understanding (MoU) [1].

The Management Committee (MC) consisted of up to 2 representatives from each participating COST country, including early-stage researchers. A Steering Group (SG) within MC was formed, consisting of the MC Coordinator (Chair) and the Working Group (WG) leaders. Five WGs were formed, each with a Leader and a Co-Leader, assisted by a WG Committee consisting of 4-8 MC members. The activities (e.g. workshops) were normally organised by the WG Committee, but designated experts could also be used if appropriate, therefore WG Committees could have short-term members/advisers. The MC was responsible for coordinating the Action, with particular attention in choosing the topics of various activities, in COST country balance and in gender balance. The Action promoted exchange visits, namely Short Term Scientific Missions (STSM) for early-stage researchers.

### **2. Working Group Reports and Outcomes**

Five working themes were proposed by the Action, supported by five WGs respectively. This section presents parts of the final reports of these WGs [2], mainly focusing on research that was carried on during the Action's timescale, conclusions of conference special sessions, think tanks, workshops and soundscape practices and examples.

## *2.1 WG1 - Understanding and Exchanging*

This report attempts to relate the concept of “soundscape” to findings from psycho-physics, psychology, hearing system physiology, and auditory cognition [3].

Soundscape is evoked by the physical sound environment (sonic/acoustic environment), but it is not equal to it and cannot be measured using classical sound measurement equipment alone. Soundscape is formed within a context, shaped by all sensory stimulations – of which visual observations are most important [4] – and by the knowledge people have accumulated about the space, its use, its purpose, its cultural meaning, their motivations, the associated activities, etc. The quality of the soundscape in some parts of the living environment can nevertheless have long term effects on the quality of life [5] and health [6] of the population.

Listening is a complex process which involves multi-leveled attention and higher cognitive functions, including memory, template matching, foregrounding (attentive listening) and backgrounding (holistic listening) [7-8]. Attentive listening is mostly important in the construction of the soundscape, although holistic listening or even simply hearing are mediators in creating mood and appraisal of the sonic environment. One of the first tasks of the auditory system, referred to as auditory scene analysis (ASA) involves decomposing a complex mixture of incoming sounds, originating from different sources, into individual auditory streams, using different auditory, but also visual and other cues [9]. In general a sonic environment where various auditory streams can easily be formed is appreciated as a high-fidelity soundscape. More complex situations that cannot easily be “read” by the average listener may be mentally stressing, while single auditory streams may be perceived as boring. Like in the Attention Restoration Theory (ART) the associated “fascination” urban environments, with too complex stimulations, could be a source of attention fatigue [6].

Through meaning production, an acoustic stimulation can be at the same time an individual experience as well as a shared one. This accounts for very different preference amongst different cultures or communities. Soundscape thus has to be evaluated taking into account the corpus of the population involved, and the psychological context of people. However, expectations, interpreted as the events that the cognitive system predicts given its familiarity with the place, may play a role at another level in the appraisal process. If this prediction matches the events that actually occur, the learning brain is rewarded. A sonic environment that results in rewards – contains expected sounds – will lead to a more pleasant experience [3].

## *2.2 WG2 - Collecting and Documenting*

The original plans of this group were to collect and document methods and procedures used in soundscape studies, as an emergent field within the acoustic communities but enlarged to other scientific domains. An initial questioning pointed to the diversity of approaches. In this report WG2 attempts to create an inventory of both the procedures and results, aiming at the physical description and the human evaluations of soundscape.

Unlike environmental noise studies, most reports on soundscapes suffer from a lack of a good physical description. A soundscape is usually, but not always, associated with a “place” (physical location), and it is possible to construct an

imaginary border around the area that represents it and distinguish between sound sources located within the "soundscape area" (water fountain) and sounds coming from sources outside this area (traffic). A report on a soundscape study should comprise information about the acoustic properties of the soundscape for all relevant listening positions, like diurnal patterns of hourly sound level distribution, list and characteristics of sound sources, level distribution, audibility times, masking, dominating sources and background noise. Commonly used binaural and video recordings can only be used for in close coupling with psychological data.

Through definitions of *soundscape* among COST participants, in order to more precisely identify the semantic contours of the concept of soundscape (from physical as well as human sciences, from different European cultures and countries), the interpretations of soundscape were (a) the acoustic correspondence to *landscape*, i.e. a 2D conception of perception where humans are "observers" facing an (common and shared) objective world (as identified and measured by physical sciences), (b) as *environment*, which refers to a 3D conceptualization and (c) as *ambiance*, referring to a global multisensory experience of the world by humans, where the acoustic stimulations are just part of the whole setting, where the "remaining" part needs to be identified more precisely than an undefined "context" [10]. Moreover, soundscape is regularly addressed as a *sonic/acoustic/physical* phenomenon, as a *perceptual, experiential, cognitive, mental* one, and as an *effect*, involving a judgment. As stated by W. Yost, the challenge may be developing soundscape research within "Ecological Psychoacoustics" [11].

### 2.3 WG3 - Harmonising

The majority of people in EU is exposed to environmental sound between 50 and 60 dBA<sub>Lden</sub> [12], where non-acoustic factors play an important role in this range. Same intensity sounds can vary widely in terms of annoyance, which is not considered in standard acoustic assessments. In environmental health impact assessments (airports, rail tracks, roads) only the upper health limits of exposure are addressed. During the last 20 years, noise exposure spread from urban centers to suburban and rural areas, and from day to nighttime [13], reducing the options for restoration, undisturbed communication, and impairing health related and environmental quality of life. Recent strategy papers, guidelines and directives have stressed to change noise policy and administration towards more perception oriented and sustainable assessments, including the protection of quiet and sensitive areas and times [14-15].

WG3 attempted to reconcile and integrate classical and soundscape oriented means ("harmonising"), and link those with quality of life and health related outcomes in order to find appropriate strategies at different scales of assessment and implementation. The operational task of WG-3 was therefore renamed to "Linking QoL and health to soundscape". We divided our task into 5 sub-tasks, namely (1) soundscape definitions and types, (2) appropriate soundscape indicators, (3) health and quality of life (QoL) outcome indicators, protecting/promoting the environment that decreases the probability of getting ill later in life, enhances well being and health and ensures opportunities for restoration, (4) methodological issue triangulation – questionnaire survey, narrative interview and sound analysis and (5)

towards soundscape methods standardisation and harmonization – conceptual model of environmental experience including health and QoL [16].

#### *2.4 WG4 - Creating and Designing*

The activities of Working Group 4, Creating and Designing, were mostly focussed on practical implementation, on bridging the gap between theory and practice. The effectiveness of design changes, in terms of planning, landscape, architectural elements, and sound components, on the creation and improvement of soundscape, considering not only the acoustic changes but also people's perception, were examined. Good practices for the implementation of soundscape research were pursued and discussed.

The group also supported the activities within the ISO/TC43/SC1/WG54 "Perceptual assessment of soundscape quality" which seemed essential for a common language and understanding of the soundscape concept. The first part ISO 12913-1 "Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework" [17] is expected to be published in 2015. WG54 has reached the conclusion that soundscape is a process of perceiving an acoustic environment and has now turned its focus to developing the second part of the ISO 12913 series of standards, with minimum requirements for reporting the results of a soundscape study.

WG4 organised conferences and think tanks resulted in considering soundscape an environmental resource that must be creatively planned and designed, taking into account the activities that may be enabled at a place. It is an important aspect of quality of life and may promote or impede psychological restoration, as well as daily activities, like speech, sleep, and recreation. Soundscape practice must develop through both small-scale and large-scale case studies, while its planning must be implemented through applied research in urban planning, in close cooperation with municipalities and other stakeholders, and with the support of basic research and other scientific disciplines.

Soundscape will help provide a sense of place, since it relates with the social territory and contributes to our overall perception of the outside. Awareness about soundscape must be raised on citizens, town planners and decision makers (existing networks should be used). Local authorities should be encouraged to adopt soundscape strategies and guidelines in accordance and in parallel with their municipal land use plans or urban design and planning guidelines [18].

Guidelines for soundscape cannot be thought globally: the specific place must always be taken into consideration. A number of paths for designing the soundscape of historic places can be followed: (i) preserve existing soundscapes, (ii) improve existing one, or (iii) design a new one to be coherent with the context;

Soundscape can lead to an increase in the value of the land; therefore it can be seen as an investment. Quiet areas, considered as zones where one may find pleasant soundscapes, and not just quiet, are opportunities to preserve the natural and cultural contents of the places and to provide restoration. In applications, coherence should be sought between all senses, correlating landscape with soundscape and with others. Cities live of the balance between quiet and vivacious areas and some mechanical sounds (transport, equipment) will be perceived by citizens as a reflection of activity and of the cultural or economic dynamics of the city (during daytime). A place with an interesting soundscape has an increased value for the user,

in a similar way when it features a good landscape (architecture, landscape design), and is usually more frequented and desirable. Therefore, soundscape cost-benefit can be found to be quite interesting, given the added value in property, in human health, and generally and foremost in wellbeing and quality of life [19].

### *2.5 WG5 - Outreaching and Training*

WG5 was completely devoted to implement the activities, and in particular to create awareness and promote communication concerning urban soundscapes and quiet areas amongst the general public, stakeholders and policy makers and to provide training for early-stage researchers, strengthen the links between them and established experts in the field.

WG5 organised three training schools.

- “Summer School for Young Acousticians”, Ljubljana, Slovenia, September 2010 – EAA EuroRegio Conference (132 young acousticians, 69 for the didactic module dedicated to Soundscape).
- “Soundscape – Measurement, Analysis, Evaluation”, Aachen, Germany, 22-26 March 2010, 11-15 July 2011, 16-20 July 2012.
- “Synergies between Environmental Noise Control and Soundscape Approach”, EAA Hot Topic Courses, AIA/DAGA and EAA EuroRegio, Merano, Italy, March 2013.

The COST TD0804 project supported the STSMs of 14 young researchers, Workshops and Think tanks, the Travelling Exhibition (see Section 3), structured sessions and special issues in international journal and books.

## **3. Activities and Final Conference**

Within the action a series of workshops and think tanks have been organised, in cooperation with city councils, opened by city officials and attended by practitioners. In total these activities were attended by over 1000 people, regarding

1. Workshop on Hot Topics in Soundscapes, Edinburgh, UK, 2009.
2. Workshop on Soundscape and Community Noise, Berlin, Germany, 2010.
3. Workshop on Understanding, Modelling and Measuring Soundscapes, Gent, Belgium, 2010.
4. Conference on Soundscape Support to Sustainable Development, Stockholm, Sweden, 2010.
5. Workshop on Sounding Brighton I – Exploring Practical Approaches towards Better Soundscapes, Brighton, UK, 2011.
6. Think Tank- Soundscape – A Part of the Cultural Heritage, Capri, Italy, 2011
7. EAA Conference Special Session on Soundscape of European Cities and Landscapes, Alborg, Denmark, 2011.
8. Workshop on Collecting and Documenting Soundscape: Documenting Perceptual Aspects of soundscapes: Collecting and Processing Psychological and Linguistic Data, Nantes, France, 2012.



9. Workshop on Sounding Brighton II – Exploring Practical Approaches towards Better Soundscapes, Brighton, UK, 2012.

10. Workshop on Soundscape: Heritage for the Urban Futures: From Noise Control to Soundscape, Vitoria-Gasteiz, Spain, 2012.

11. Final Conference on Soundscape of European Cities and Landscapes, Merano, Italy, 2013.

The Action has trained over 150 young researchers and practitioners, through 14 STSM (Short Term Scientific Mission) and 5 training schools, including 3 Soundscape and Psychoacoustic Training Schools in Aachen, Germany, 2010-2012; a Summer School on Soundscape in Lubljana, Slovenia, 2010; and Winter School on Soundscape, Merano, Italy, 2013.

The Action has influenced national and international policy and practice, through involvement with and support from international and national policy bodies, such as EU and UK DEFRA, and through a number of soundscape projects, including the famous Brighton white night project, and furthermore, projects in Sweden, Germany, UK, Spain, Belgium, and Portugal. The impact of the Action is on promoting health and sustainability, attracting investment, conveying cultural uniqueness/diversity and enhancing quality of life.

#### **4. Outcomes, Collaboration with other Networks, E-book & Travelling Exhibition**

The outcomes of the Action also provide:

(1) scientific papers in a special issue of JASA, a Taylor Francis book entitled ‘Soundscape and the Built Environment’, and over 300 journal and conference papers across the world;

(2) soundscape design framework, design principles, design tools, design parameters and indicators;

(3) research basis for ISO/TC 43/SC 1/WG 54 - Perceptual Assessment of Soundscape Quality;

(4) good soundscape examples;

(5) a moveable soundscape exhibition, which can be used beyond the Action’s life, exhibited in city halls and opened to the general public, which have been reported by media.

Collaborations with other networks, including the Global Sustainable Soundscape Network (GSSN) funded by the USA National Science Foundation, 4 other COST Actions, a number of EU projects including HOSSANA and SONORUS, EU networks such as ENNAH, and national networks such as UK Noise Future network, were achieved.

The Action recently published an e-book, supported by COST. The book reflected its results, the outcomes of the Final Conference of the Action, held in Merano, Italy, on 22 March 2013, as well as conference papers in a series of special sessions organised by this COST Action at the AIA/DAGA/EUROREGIO Conference, in Merano, on 18-21 March 2013 ([www.aia-daga.eu](http://www.aia-daga.eu)).

Moreover, the e-book includes the list and web-links of the other outcomes of the Action as mentioned above (<http://soundscape-cost.org>).

## 5. References

- [1] <http://soundscape-cost.org/documents/MoU-full.pdf> (accessed 3 September 2014)
- [2] J. Kang et al ed. *COST TUD Action TD0804: Soundscape of European Cities and Landscapes*, Soundscape COST, Oxford, (2013).
- [3] D. Botteldooren et al «Soundscape of European Cities and Landscapes - Understanding» in [2], pp 34-43 (2013).
- [4] R. J. Pheasant et al «The importance of auditory-visual interaction in the construction of 'tranquil space'» *J. Environ. Psych.*, **30** (4), pp 501-509 (2010).
- [5] D. Botteldooren and B. De Coensel «A model for long-term environmental sound detection» in *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 1-8, pp. 2017-2023 (2008).
- [6] S. R. Payne «The production of a Perceived Restorativeness Soundscape Scale» *Applied Acoustics*, **74**, pp. 255-263 (2013).
- [7] J. J. Alvarsson et al., «Stress Recovery during Exposure to Nature Sound and Environmental Noise», *Int. J. Environ. Res. Pub. Health*, **7**, pp. 1036-1046 (2010).
- [8] O. Axelsson et al «A principal components model of soundscape perception» *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, pp. 2836-2846 (2010).
- [9] A. S. Bregman *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1994).
- [10] T. Gjestland and D. Dubois «Soundscape of European Cities and Landscapes – Collecting and Documenting» in [2], pp 88-94 (2013).
- [11] J. G. Neuhoff *Ecological Psychoacoustics*, Elsevier Acad. Press (2004).
- [12] EEA «Good practice guide on noise exposure and potential health effects», Copenhagen (2010).
- [13] P. Lercher «Environmental noise: A contextual public health perspective» in *Noise and its effects*, edited by L.M. Luxon and D. Prasher. John Wiley & Sons, London, pp. 345–377 (2007).
- [14] CEC «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», *Official Journal of the European Communities L* **189** (2002).
- [15] CALM «Research for a quieter Europe in 2020. Updated strategy paper of the CALM Network», Brussels (2004).
- [16] P. Lercher and B. Schulte-Fortkamp «Soundscape of European Cities and Landscapes – Harmonising» in [2], pp 118-127 (2013).
- [17] ISO.: ISO/DIS 12913-1 «Acoustics – Soundscape – Part 1: Definition and conceptual framework» International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland (2013).
- [18] K. Chourmouziadou and K. Sakantamis «Soundscape: Investigation and application of an innovative urban design parameter» in *International Conference on “Changing cities”: Spatial, morphological, formal and socio-economic dimensions*. (2012).
- [19] J. L. Bento Coelho et al «Soundscape of European Cities and Landscapes – Creating and Designing» in [2], pp. 148-157 (2013).

# ***Χρόνο-Σφαίρες: μελέτη του αστικού Οσμο-Ηχο-τοπίου της Θεσσαλονίκης***

Κ. Σακαντάμης<sup>1,a</sup> & Κ. Χουρμουζιάδου<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Αρχιτεκτόνων, ΑΠΘ

<sup>2</sup> Αρχιτέκτονας Μηχανικός, Ομήρου 5, Θεσσαλονίκη

<sup>a</sup> [k.sakantamis@live.com](mailto:k.sakantamis@live.com), <sup>b</sup> [k.chourmouziadou@windowslive.com](mailto:k.chourmouziadou@windowslive.com)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η εργασία παρουσιάζει την πρόοδο της ερευνητικής δραστηριότητας του προγράμματος: «Περπατώντας στην πόλη της Θεσσαλονίκης», Δεκέμβριος 2013-2014. Η έρευνα εκπονείται στο Τμήμα Αρχιτεκτόνων της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ, και χρηματοδοτείται μέσω του Προγράμματος Υποτροφιών Μεταδιδακτορικής Αριστείας '12-'13, Α.Π.Θ. Επίσης, η έρευνα πραγματοποιείται με την αρωγή του ArchSix Architecture Studio και του Πανελληνίου Συνδέσμου Τυφλών Π.Ε.Κ.Μ. Το θέμα της έρευνας επικεντρώνεται στην αντίληψη του σύγχρονου αστικού τοπίου της Θεσσαλονίκης και στον τρόπο που αυτή διαμορφώνεται από τον ήχο, και την οσμή.*

## ***Chrono-Speres: a study of Thessaloniki's urban Sound-Smell-scape***

### **ABSTRACT**

*The paper presents the progress of the research project: "Walking in the city of Thessaloniki", December 2013-2014. The research is undertaken at the Department of Architecture, Polytechnic School, AUPh, and is part-funded by the Post-doctoral Fellowship Program of Excellence '12-'13, AUPh. Research activities are supported by ArchSix Architecture Studio and the Panhellenic Association of the Blind. The research focuses on how the perception of Thessaloniki's cityscape is shaped through hearing, vision and smell.*

### **Εισαγωγή**

Η έρευνα επικεντρώνεται στην αντίληψη του αστικού τοπίου της Θεσσαλονίκης και στον τρόπο που αυτή διαμορφώνεται από την αντίληψη ήχων και οσμών. Η έρευνα βασίζεται στην παραδοχή ότι η αντίληψη του αστικού τοπίου είναι μία διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων στην οποία εμπλέκονται άμεσα αισθήσεις και πολιτισμικό περιβάλλον. Το παρόν άρθρο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της α' φάσης (σχεδιασμός μεθοδολογίας) και πρώτα αποτελέσματα από την ανάλυση

μέρους των δεδομένων της β' φάσης (έρευνα πεδίου), της δωδεκάμηνης διάρκειας του προγράμματος.

## 1. Θεωρητικό Υπόβαθρο: Σφαίρες και Δυαδικότητα

Στο δοκίμιο με τίτλο «*On Phenomenological Discourse in Architecture*» [1], ο R. Shirazi εντοπίζει την ανυπαρξία μιας συνεκτικής σχολής ή μεθοδολογίας για την εφαρμογή της φαινομενολογίας στην αρχιτεκτονική. Εντούτοις, εντοπίζει μία κοινή αφετηρία, για αρχιτέκτονες που την εφαρμόζουν, που έγκειται στη δυναμική που παρέχει η φαινομενολογία για την κατανόηση της αρχιτεκτονικής ως πράξη και ως βίωμα. Η κοινή αυτή αφετηρία, έχει και κοινό στόχο: τον εμπλουτισμό της τρισδιάστατης πληροφορίας που χειριζόμαστε, ως αρχιτέκτονες (μετρήσιμος χώρος), με τις πληροφορίες που οι αισθήσεις μας επεξεργάζονται και που πολλές φορές είναι οι κύριοι φορείς νοήματος σε ένα τόπο: μία δυαδική μεθοδολογία.

Ένα σύγχρονο θεωρητικό ανάλογο για την αναζητούμενη μεθοδολογική δυαδικότητα παρουσιάζεται στο έργο του P., Sloterdijk: *Bubbles: Spheres I* [2]. Παραφράζοντας τον J. D. Ebert [3]: «ο Sloterdijk βρίσκεται στον αντίποδα της έννοιας της ύπαρξης στον χρόνο (*Being and time* [4]) και αναφέρεται στον χώρο – στο χωρικό δοχείο της σφαίρας. Ο όρος "σφαίρες" ανάγεται σε ένα μακρο-σφαιρικό ανοσοποιητικό σύστημα, χτισμένο από τα σύμβολα, μύθους και νόημα, που περιλαμβάνουν και εγκιβωτίζουν την ανθρώπινη ύπαρξη σε ατομικό και κοινωνικό επίπεδο, σε όλη την ιστορία. ... από τη μήτρα, στο σπίτι, στο πολιτιστικό περιβάλλον, όλα είναι ανοσολογικές προεκτάσεις του εαυτού.»

Τα παραπάνω προσφέρουν στην αρχιτεκτονική έρευνα του αστικού τοπίου ένα μοντέλο ανάλυσης: όραση, όσφρηση, και ακοή αποτελούν επιστημολογικά διακριτές σφαίρες. Η σφαίρα της όρασης περικλείει ή περικλείεται από τη σφαίρα της όσφρησης και της ακοής ενώ η απτική σφαίρα είναι συνήθως πολύ μικρότερη (ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες). Η δυαδική μελέτη των παραπάνω (κατ' αντιστοιχία της αρνητικής γυναικολογίας του Sloterdijk [2]), τόσο μέσω της καταγραφής μετρήσιμων δεδομένων, όσο και μέσω της καταγραφής της εμπειρίας, μπορεί να μας δώσει στοιχεία για τις μακρο-σφαίρες που τις περικλείουν, τον τρόπο που ένα γενικότερο σύστημα αξιών επηρεάζει και διαμεσολαβεί στη σχέση μας με την πόλη.

Για την παρούσα έρευνα, η κατάλληλη εξειδίκευση του παραπάνω θεωρητικού μοντέλου μπορεί να βρεθεί στην *αλληλοπεριχώρηση* των σφαιρών *soundscape* και *smellscape*, που ως μέρη του *landscape*, οργανώνονται στο έργο του Porteous [5], μαζί με τις υπόλοιπες εκφάνσεις του τοπίου *allscapes*, *landscapes*, *dreamscapes*, *Godscapes*, *noisescapes*, *tastescapes*, *touchscapes*, *sexscapes*, κ.α.

## 2. Δυαδική μεθοδολογία έρευνας Ηχοτοπίου και Οσμοτοπίου

Ο όρος *soundscape* εισήχθη στη βιβλιογραφία από τον Southworth [6] και αργότερα ορίστηκε από τον Schafer [7], ως «...*any acoustic field of study*». Σήμερα, ο όρος καταδεικνύει μία προσέγγιση - *soundscape approach* - βασικό χαρακτηριστικό της οποίας είναι ο συνολικός χειρισμός του ήχου (ως παραμέτρου του σχεδιασμού), με έμφαση στο ευ ζην [8]. Για την παρούσα έρευνα, η αντίληψη του ορισμού από τον L. Brown [9] εμπεριέχει μία χρήσιμη δυαδικότητα: (παραφράζοντας) «το ηχοτόπιο υφίσταται μέσα από την ανθρώπινη αντίληψη αλλά

ταυτόχρονα πρέπει να είμαστε ανεκτικοί με τη χρήση του όρου (από αρχιτέκτονες, πολεοδόμους, το κοινωνικό σύνολο) για να χαρακτηρίσει το ηχητικό περιβάλλον ενός τόπου». Ο όρος *smellscape*, οσμοτοπίο, εμφανίζεται για πρώτη φορά στο έργο του Porteous [5]: ο ορισμός του από την Henshaw [10] (ελεύθερη μετάφραση) είναι: «το συνολικό οσφρητικό τοπίο, που περιλαμβάνει μεμονωμένες, αναμειγμένες οσμές και τη συνολική οσμή φόντου (*background smell*)». Αυτοί οι ορισμοί, εμπεριέχουν την κατηγοριοποίηση ήχων και οσμών, με κριτήρια ανεξάρτητα των ιδιαιτεροτήτων κάθε τόπου.

Κατά τις δύο προσεγγίσεις, η αντίληψη ήχου και οσμής - σε ατομικό ή κοινωνικό επίπεδο - εξαρτάται από τη σχέση ατόμου / κοινωνίας και περιβάλλοντος [9], [10]. Μεθοδολογικά, και οι δύο προσεγγίσεις επικεντρώνονται στην χρήση των περιπάτων *Sensewalk* [6] για τη μέτρηση της αντίληψης ήχου και οσμής, αντίστοιχα, που αντιπαραβάλλουν με κλιματικά δεδομένα, μετρήσεις ηχητικής πίεσης, βιντεοσκοπήσεις και ηχογραφήσεις, με σκοπό την τριγωνοποίηση, (*triangulation*) [11] μεταξύ ποιοτικών και ποσοτικών μετρήσεων, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ο συνδυασμός των μεθοδολογικών εργαλείων της παρούσας έρευνας έχει ως αφετηρία την κοινή παράμετρο του περιπάτου στην πόλη - *sensewalk*, πάνω σε ορισμένη διαδρομή. Το ερωτηματολόγιο που συντάχθηκε αποτελεί συνδυασμό του *Swedish Soundscape Quality Protocol* [12] και της ιδέας του *DIY Manchester Smellwalk* [13]. Το πρώτο έχει προκύψει από διεπιστημονική προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της ηχητικής αντίληψης στο περιβάλλον και έχει αναπτυχθεί για χρήση από μη-ειδικούς στην ακουστική (αρχιτέκτονες – πολεοδόμους). Το *SSQP* έχει ήδη εφαρμοστεί σε διεθνές επίπεδο [14], [15], επικυρώνοντας την καταλληλότητά του ως εργαλείο που θα μπορούσε να έχει ευρεία εφαρμογή. Κατά το *SSQP*, οι ηχητικές πηγές κατηγοριοποιούνται: α) κυκλοφοριακός θόρυβος, β) μηχανολογικός θόρυβος, γ) άλλες πηγές θορύβου, δ) ανθρωπογενής δραστηριότητα, ε) φυσικοί ήχοι, και βαθμολογούνται ως το ποσοστό της αντίληψής τους στο χώρο: καθόλου, ελάχιστα, μέτρια, αρκετά, κυρίαρχος ήχος. Επιπλέον, οι συμμετέχοντες καλούνται να επιλέξουν το βαθμό συμφωνίας τους (συμφωνώ απόλυτα, αρκετά, μέτρια, ελάχιστα, καθόλου) με το κατά πόσο το ηχητικό περιβάλλον είναι: ευχάριστο, χαοτικό, ενδιαφέρον, αδιάφορο, γαλήνιο, ενοχλητικό, ποικιλόμορφο, ή μονότονο. Τέλος, το ηχητικό και το οπτικό περιβάλλον βαθμολογούνται (κλίμακα 5 σημείων: πολύ καλό, καλό, ούτε καλό – ούτε κακό, κακό, πολύ κακό) ενώ ζητείται και η κρίση των συμμετεχόντων για την καταλληλότητα του ηχητικού περιβάλλοντος (ναι / όχι – αν όχι γιατί). Σημαντικό στοιχείο είναι ότι οι συμμετέχοντες καταγράφουν την αντίληψή τους σε στάσεις που ορίζονται κατά τη διαδρομή.

Κατά την κίνησή, από τη μία στάση στην άλλη, οι συμμετέχοντες καλούνται να εστιάσουν στην όσφρησή τους, συμπληρώνοντας ένα απλούστερο ερωτηματολόγιο που συνίσταται από έναν χάρτη και ένα ευρετήριο. Κάθε οσμή καταγράφεται πάνω στο χάρτη με αύξοντα αριθμό και καταχωρείται στο αντίστοιχο ευρετήριο με την ονομασία της (πχ. λεμόνι) και τη βαθμολογία της (διακύμανση 1-5 / 1 για την οσμή που πραγματικά απεχθάνονται, 5 για την οσμή που τους αρέσει πολύ).

Για την τριγωνοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιείται η βιντεοσκόπηση της διαδρομής, κυρίως στην περίπτωση ομαδικών περιηγήσεων, με παράλληλη αμφιωτική ηχογράφηση. Ταυτόχρονα, σε κάθε στάση, πραγματοποιούνται μετρήσεις ηχητικής πίεσης. Επιπλέον, για κάθε εποχή του χρόνου που μελετάται δημιουργείται ένα ψηφιακό ανάλογο στη μορφή ενός δια-δραστικού χάρτη που

περιλαμβάνει λεπτομερείς πανοραμικές απεικονίσεις των στάσεων (οπτικές σφαίρες με τον παρατηρητή στο κέντρο) και ηχητικά δείγματα από κάθε στάση (η παράμετρος του χρόνου) [16]. Το ψηφιακό ανάλογο - *χρονοσφαίρα*- θα χρησιμοποιηθεί, σε επόμενη φάση της έρευνας, σε εργαστηριακές συνθήκες (πειραματική διάταξη κατά Guastavino et al [17]).

Η επιλεγμένη διαδρομή, χαρακτηριστική (για τους συγγραφείς) της πόλης της Θεσσαλονίκης, ορίζεται μεταξύ επτά στάσεων: 1) Πλατεία Δικαστηρίων, 2) πέταλο Πλ. Αριστοτέλους, 3) Καπάνι, 4) Λουλουδάδικα, 5) Τσιμισκή και Αριστοτέλους (συμβολή), 6) Τσιμισκή (μεταξύ Κ. Ντήλ και Αγ. Σοφίας) και 7) πεζόδρομος οδού Αγ. Σοφίας. Αυτή επιλέχθηκε γιατί εκθέτει τους συμμετέχοντες σε μία πληθώρα οσφρητικών και ηχητικών ερεθισμάτων, σε διαφορετικές κλίμακες του αστικού ιστού, επιτρέποντας τη μελέτη σύγχρονων επεμβάσεων στην πόλη – πειραματική πεζοδρόμηση Αγ. Σοφίας – με την μελέτη παραδοσιακών ανοικτών αγορών, όπως το Καπάνι, σε αντιδιαστολή με τον εμπορικό δρόμο της Τσιμισκή, ενώ αντιπαραβάλλει και το ανώτερο τμήμα της Αριστοτέλους με το κέντρο της πόλης (συμβολή Τσιμισκή και Αριστοτέλους).

Το ειδικό χαρακτηριστικό της έρευνας που παρουσιάζεται εδώ εντοπίζεται στην επιλογή του πληθυσμού. Συμμετοχή στην έρευνα αναζητείται, αφενός, στους φοιτητές του τμήματος αρχιτεκτονικής (ΑΠΘ, ΔΠΘ), και στο ευρύ κοινό χρησιμοποιώντας μέσα κοινωνικής δικτύωσης [16], [18], [19]. Αφετέρου, με τη συνεργασία του Π.Ε.Κ.Μ., η έρευνα διεξάγεται, μέσω προσωπικών συνεντεύξεων – περιηγήσεων με τη συμμετοχή ατόμων με μειωμένη αντίληψη της όρασης. Αυτή η παράμετρος επιτρέπει την αντιπαραβολή της αντίληψης ηχητικών και οσφρητικών ερεθισμάτων στην ύπαρξη και ανυπαρξία της όρασης, στοχεύοντας στην ενσωμάτωση, στην έρευνα, του προτύπου του σχεδιασμού για όλους (inclusive design).

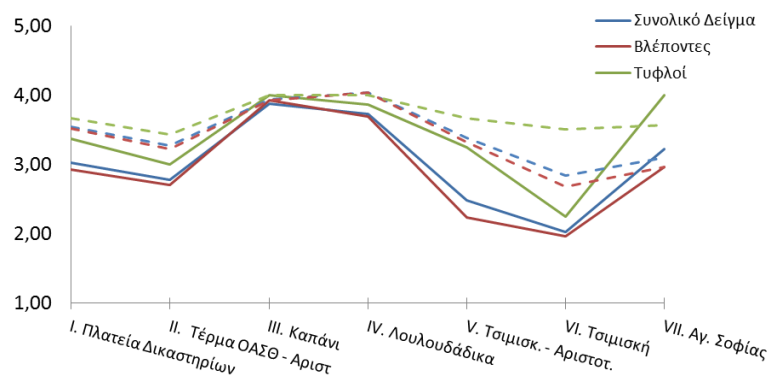
Η έρευνα της αντίληψης του τοπίου, με αυτή τη μεθοδολογία, συνοδεύεται και από περιορισμούς. Τόσο η Henshaw [10] όσο και ο Ttuax [20] συμφωνούν ότι υπάρχουν διακριτές καταστάσεις στην αντίληψη της οσμής και του ήχου αντίστοιχα: *passive state – receptive state (smelling in search)*, για την οσμή, και *listening in search – listening in readiness – background listening*, για τον ήχο. Ο περιορισμός έγκειται στο ότι η αντίληψη του ήχου και της οσμής, στην καθημερινότητα, είναι διαφορετική από αυτή που καταγράφεται κατά τον ηχο-οσμο-περίπατο. Ο Sacks [21] προσφέρει μία σταχυολόγηση των διαφορετικών τρόπων που τυφλοί μεταχειρίζονται για την επεξεργασία τόσο ηχητικών όσο και άλλων ερεθισμάτων για να διαμορφώσουν μία συνολική (διαφορετική ο καθένας) «εικόνα» για το περιβάλλον. Η πρόσφατη έρευνα με συμμετοχή τυφλών, στο πεδίο των ηχοτοπίων [22], [23], υποδεικνύει πως η αντίληψη του τοπίου μέσω echolocation (ηχοεντοπισμός), είναι – πολλές φορές εν αγνοία τους – κοινός τόπος για τους τυφλούς, ενώ ερεθίσματα όπως ο κυκλοφοριακός θόρυβος (τόσο η κατεύθυνση, όσο και η θέση του) αποτελούν πληροφορία που μεταχειρίζονται ενεργά για τον προσανατολισμό τους, στο αστικό τοπίο. Η ιδιότητα αυτή δεν είναι μόνο φυσικό επόμενο της τύφλωσης και καλλιεργείται ενεργά κατά την εκπαίδευσή τυφλών.

### **3. Ανάλυση πρώιμων δεδομένων**

Η ανάλυση, που ακολουθεί, εστιάζει στα ποιοτικά δεδομένα που συλλέχθηκαν

για τα ηχοτοπία που εξετάζονται, κατά τις περιηγήσεις που έγιναν την άνοιξη και το καλοκαίρι του '14. Όσο η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη, η ανάλυση αυτή προσφέρει ένα πρώτο δείγμα για την αποδοτικότητα του μεθοδολογικού μοντέλου του ηχητικού τμήματος της έρευνας, σε σύγκριση και με τις αντίστοιχες εφαρμογές του [16].

Οι ομαδικές και ατομικές (με τυφλούς) περιηγήσεις έλαβαν χώρα κατά την προδιαγεγραμμένη διαδρομή, από το Μάρτιο ως τον Ιούνιο του '14, και κατά πρωινές ώρες (λειτουργία εμπορικών καταστημάτων). Για πρακτικούς λόγους, η διαδρομή δεν πραγματοποιήθηκε με βροχή ή ισχυρό άνεμο. Το συνολικό δείγμα που εξετάζεται αποτελείται από τις απαντήσεις 35 εθελοντών: 27 βλέποντες, 8 τυφλοί (23% συνολικού δείγματος). Ο ηλικιακός μέσος όρος του συνολικού δείγματος είναι 32 ( 59 max, 17min), ενώ τα ποσοστά ανδρών-γυναικών είναι 37%-63%. Τόσο οι τυφλοί όσο και οι βλέποντες ήταν εξοικειωμένοι με την πόλη της Θεσσαλονίκης.



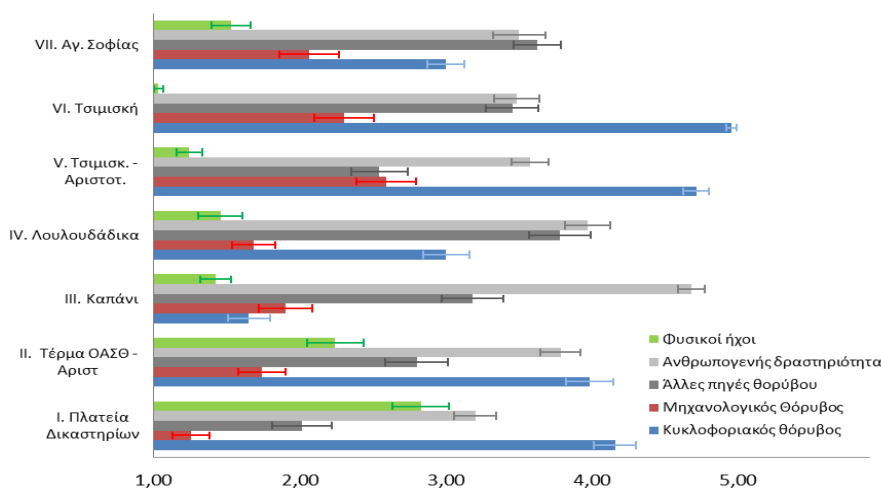
Σχήμα 3.1. Αντίληψη ποιότητας Ηχητικού και Οπτικού / Συνολικού (για τους τυφλούς) περιβάλλοντος (συνεχής γραμμή: ηχητικό, διακεκομμένη: «οπτικό»)

Στα σχήματα 3.1 και 3.2 απεικονίζεται μικρό μέρος των δεδομένων της έρευνας. Στο σχήμα 3.1 αντιπαραβάλλονται οι απαντήσεις βλέπόντων και τυφλών ως προς την αντίληψη ποιότητας ηχητικού και οπτικού περιβάλλοντος (για τους βλέποντες) και συνολικής αντίληψης (για τυφλούς). Η γραφική παράσταση επιβεβαιώνει πως η ηχητική αντίληψη είναι συσχετισμένη με την οπτική αντίληψη, ή την συνολική αντίληψη του τόπου, αντίστοιχα.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.2 αναλύθηκαν για να εξεταστούν οι λόγοι για τη διακύμανση στην αντιληπτή ποιότητα του τοπίου και του ηχο-τοπίου ανάμεσα στις στάσεις. Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA, significance level 0.05) έγινε θεωρώντας τις στάσεις I-VII ως ανεξάρτητες μεταβλητές και τις κατηγορίες των ηχητικών πηγών ως εξαρτημένες (συνολικά πέντε αναλύσεις). Η ανάλυση διακύμανσης για κάθε κατηγορία επιβεβαιώθηκε με *post hoc* t-test (σύγκριση σε ζεύγη / *Bonferroni Correction* = 0,007142857). Οι αναλύσεις διακύμανσης δείχνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές στη σύνθεση του ηχητικού περιβάλλοντος σε κάθε στάση. Τα αποτελέσματα των t-test παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες.

### 3.1 Κυκλοφοριακός Θόρυβος

Υπάρχει στατιστικά ασήμαντη διακύμανση μεταξύ των στάσεων I και II (όψεις του ίδιου νομίσματος: σε ίδια σχεδόν απόσταση από τον κύριο άξονα της οδού Εγνατία). Η διακύμανση είναι στατιστικά αποδεκτή μεταξύ των πρώτων δύο (I,II) και των στάσεων III, IV, και V (και μεταξύ τους), ενώ η διακύμανση μεταξύ των V, VI, βρίσκεται στα όρια του στατιστικού λάθους. Επίσης, υπάρχει σημαντική μείωση στην αντίληψη του κυκλοφοριακού θορύβου μεταξύ VI και VII. Τέλος, δεν υπάρχει σημαντική διακύμανση στην αντίληψη κυκλ. Θορύβου μεταξύ των IV και VII.



Σχήμα 3.2. Σύνθεση Ηχητικών πηγών / στάση (1=καθόλου / 5= κυρίαρχος ήχος)

### 3.2 Μηχανολογικός Θόρυβος

Η αντίληψη του μηχανολογικού θορύβου παρουσιάζει στατιστικά σημαντική αύξηση μεταξύ των στάσεων I (Πλατεία Δικαστηρίων) και III (Καπάνι) και μεταξύ των IV και V. Οι τρεις τελευταίες στάσεις, V, VI, και VII παρουσιάζουν στατιστικά ασήμαντη διακύμανση μεταξύ τους.

### 3.3 Άλλες Πηγές Θορύβου

Υπάρχουν στατιστικά ασήμαντες διαφορές στην καταγεγραμμένη αντίληψη των άλλων πηγών (π.χ. κατασκευαστική δραστηριότητα, ήχοι μηχανημάτων - δυνατής μουσικής, κλπ.) μεταξύ των στάσεων I, II, και V. Κατά την ομαλή αύξηση στην αντίληψη, που παρατηρείται στο Σχ 3.2, μεταξύ των στάσεων I και IV, στατιστικά σημαντικές διαφορές καταγράφονται ανάμεσα σε I - III και II - IV. Η διακύμανση μεταξύ των: IV και V, καταγράφεται ως στατιστικά σημαντική μείωση. Επίσης, η διαφορά μεταξύ των στάσεων V και VI συνιστά στατιστικά σημαντική άνοδο, ενώ οι στάσεις VI και VII παρουσιάζουν στατιστικά ασήμαντες διαφορές μεταξύ τους.



### 3.4 Ανθρωπογενής Δραστηριότητα

Η αντίληψη ήχων που οφείλονται στην ανθρωπογενή δραστηριότητα έχει καταγραφεί με ευδιάκριτη διακύμανση μεταξύ των στάσεων. Κατά τη διαδρομή από την I στην II και III στάση, καταγράφεται σταθερή στατιστικά σημαντική άνοδος στην διακύμανση μέσης τιμής. Επίσης, η μείωση από την στάση III στην IV, είναι στατιστικά σημαντική. Για τις στάσεις V, VI, και VII η διακύμανση της αντίληψης είναι στατιστικά ασήμαντη. Συνολικά μπορούν να διακριθούν: η κατώτατη στάθμη μέτρησης (στάση I, Πλατείας Δικαστηρίων), μέσες μετρήσεις (στάσεις II, IV, V, VI, VII-) και η ανώτατη στάθμη στη στάση III.

### 3.5 Φυσικοί Ήχοι

Η αντίληψη φυσικών ήχων παρουσιάζει στατιστικά σημαντική διακύμανση μεταξύ των στάσεων. Η ανάλυση υποδεικνύει πως η στάθμη αντίληψης φυσικών ήχων είναι παρόμοια για τις στάσεις I και II (όψεις του ίδιου νομίσματος πάλι: max). Επίσης, η ανάλυση δείχνει ότι οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αντίστοιχων τιμών για τις στάσεις III, IV, V, και VII βρίσκονται εντός των ορίων του στατιστικού λάθους, και επομένως αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως παρόμοιες επίσης (μέση στάθμη). Τέλος, στατιστικά σημαντική διαφορά υπάρχει μεταξύ του καταγεγραμμένου min αντίληψης φυσικών ήχων (στάση VI, Τσιμισκή) και των υπόλοιπων στάσεων, πλην της γειτονικής της V, Τσιμισκή και Αριστοτέλους.

## 4. Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Η ανάλυση υποδεικνύει τη συσχετισμένη διακύμανση της ηχητικής και οπτικής ποιότητας, ανά στάση, για τους βλέποντες. Επίσης, η ανάλυση διακύμανσης της αντίληψης των ηχητικών πηγών εμφανίζει στατιστικά σημαντικές διαφορές από τη μία στάση στην άλλη. Η ακρίβεια του ερωτηματολογίου και της μεθοδολογίας ανάλυσης υποδηλώνεται από το γεγονός ότι οι στάσεις I και II έχουν βρεθεί να διαφέρουν στατιστικά μόνο ως προς την παράμετρο της ανθρωπογενούς δραστηριότητας ( σ.σ. οι στάσεις αυτές βρίσκονται εκατέρωθεν της Εγνατίας οδού ) η οποία ενδέχεται να οφείλεται στην ορατή πύκνωση της δραστηριότητας από την στάση II, στην είσοδο του Καπάνι. Τέλος, από την ανάλυση υποδηλώνεται πως το ηχοτόπιο με την καλύτερη βαθμολογία (Καπάνι), όπου η ηχητική – οπτική ή συνολική αντίληψη, και καταλληλότητα συμπίπτουν για το σύνολο του πληθυσμού, διακρίνεται ως προς τα υπόλοιπα τοπία ως προς τον χαμηλό κυκλοφοριακό θόρυβο και την έντονη ανθρωπογενή δραστηριότητα. Η περαιτέρω συλλογή αποτελεσμάτων θα συνοδευτεί από ανάλυση της πλήρους κλίμακας των δεδομένων και στον συσχετισμό τους με τα υπόλοιπα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα.

## 5. Αναφορές

- [1] M.R., Shirazi, «On Phenomenological Discourse in Architecture», Environmental & Architectural Phenomenology Newsletter, [http://www.arch.ksu.edu/seamon/shirazi\\_phenomenological\\_discourse.htm](http://www.arch.ksu.edu/seamon/shirazi_phenomenological_discourse.htm) (accessed 3 September 2014)
- [2] P. Sloterdijk, & W. Hoban, *Bubbles: Spheres I*. Semiotexte/Smart Art. (2011).

- [3] J. D. Ebert, «“Theory is Dead”: On Sloterdijk’s New Book», © 2014 John David Ebert | Webmaster: [jbQ Web & SEO](http://jbQWeb.com) (2010), <http://cultural-discourse.com/theory-is-dead-on-sloterdijks-new-book/> (accessed 3 September 2014)
- [4] M. Heidegger, *Being and time*. New York: Harper. (1962).
- [5] J. D. Porteous, *Landscapes of the mind: Worlds of sense and metaphor*. Toronto: University of Toronto Press. (1990).
- [6] M., Southworth, «The sonic environment of cities» *Environment and Behavior* **1**, pp 49–70. (1969).
- [7] R.M., Schafer, & World Soundscape Project. *The Vancouver soundscape*. Burnaby, B.C: World Soundscape Project, Sonic Research Studio, Dept. of Communication, Simon Fraser University. (1978).
- [8] J. Kang et al ed. COST TUD Action TD0804: *Soundscape of European Cities and Landscapes*, Soundscape COST, Oxford, (2013).
- [9] A. L. Brown, «The sounds people might hear in a place? Describing sources in the acoustic environment, and their role in the perception of soundscape.» in [8]
- [10] V. Henshaw, *Urban smellscapes: understanding and designing city smell environments*. New York : Routledge/Taylor & Francis Group. (2014)
- [11] P. Lercher and B. Schulte-Fortkamp «Soundscape of European Cities and Landscapes – Harmonising» in [8], pp 118-127 (2013).
- [12] O. Axelsson et al., «A principal components model of soundscape perception» *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, pp. 2836-2846 (2010).
- [13] <http://smellandthecity.wordpress.com/2012/04/03/diy-manchester-smellwalk-2/> (accessed 3 September 2014)
- [14] Jambrosic et al «Assessment of urban soundscapes with the focus on an architectural installation with musical features», *J. Acoust. Soc. Am.*, **134** (1), Pt. 2, pp. 869-879 (2013).
- [15] O. Axelsson et al «Validation of the Swedish soundscape quality protocol», *J. Acoust. Soc. Am.*, **131**(4):3474 (2012)
- [16] <http://thessensescapes.blogspot.gr> (accessed 3 September 2014)
- [17] C. Guastavino et al «Ecological Validity of Soundscape Reproduction» *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, **91** pp. 333 – 341 (2005)
- [18] [https://www.facebook.com/events/627001204065000/?ref\\_dashboard\\_filter=past](https://www.facebook.com/events/627001204065000/?ref_dashboard_filter=past).
- [19] <https://www.facebook.com/MathainoApoThnPolhMoy?fref=ts>
- [20] B. Truax, *Acoustic Communication*, Norwood, NJ: Ablex Publishing. (1984)
- [21] O. Sacks, *The mind's eye*. New York: Vintage Books. (2013).
- [22] M., Rychtáriková et al «Towards more inclusive approaches in soundscape research» *INTER- NOISE 2012. International Conference on Noise Control Engineering*; (2012)
- [23] J. Herssens, «Listening in the Absence of Sight: The Sound of Inclusive Environments», <http://include11.kinetixevents.co.uk/>

# **Αναπαράσταση των ηχοτοπίων της Θεσσαλονίκης του 1912**

Δάφνη Ψαρρά<sup>1,a</sup>, Χρήστος Γούσιος<sup>1,b</sup> & Αιμιλία Καραποστόλη<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Κινηματογράφου, Α.Π.Θ.

<sup>2</sup> Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [Dafni.psarra@gmail.com](mailto:Dafni.psarra@gmail.com), <sup>b</sup> [cgoussios@hotmail.com](mailto:cgoussios@hotmail.com), <sup>c</sup> [emiliearch@gmail.com](mailto:emiliearch@gmail.com)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στη παρούσα εργασία γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση και ένας εκτενής σχολιασμός των επιμέρους ζητημάτων, αλλά και των προκλήσεων που δημιουργούνται από την προσπάθεια αναπαράστασης των ηχοτοπίων της Θεσσαλονίκης του 1912. Η ανασύνθεση παρελθοντικών ηχοτοπίων, αλλά και αρχιτεκτονικών περιβαλλόντων γενικότερα, είναι ένα θέμα που απασχολεί ευρέως το σύγχρονο κινηματογράφο αλλά και την ίδια την τέχνη. Η αναβίωση της εμπειρίας μιας πόλης που έχει πια χαθεί μέσα στο χρόνο δημιουργεί όχι μόνο πληθώρα τεχνικών δυσκολιών, αλλά και αφθονία θεμάτων επικοινωνίας που έχουν να κάνουν με τη θέση και το ρόλο του σύγχρονου θεατή/ακροατή ενός κινηματογραφικού έργου και του δημιουργού του. Τρεις διαφορετικές περιοχές της Θεσσαλονίκης γίνονται τα πεδία πειραματισμού και μελέτης έχοντας ως στόχο την κινηματογραφική ανάγνωση μιας πόλης που δεν υπάρχει πια.

## ***Recreation of Thessaloniki's 1912 soundscapes***

### **ABSTRACT**

*This paper is consisted of a detailed analysis and a thorough discussion of various issues and numerous challenges created by the recreation of the old soundscapes of Thessaloniki in 1912. Recreation of past soundscapes, and architectural environments in general, is a widespread issue in contemporary cinema and art in general. The revival of the experience of a city that has been lost in time creates not only a vast amount of technical difficulties, but also communication issues that have to do with the place and the role of the contemporary viewer/listener of a film and its creator. Three different areas of Thessaloniki have become the fields of experimentation and study in order to read cinematically a city that no longer exists.*

## **1. Εισαγωγή**

Στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας που εκπονήθηκε το 2012 στο τμήμα Κινηματογράφου Α.Π.Θ. με θέμα «Ο ήχος της πόλης – Σχεδιασμός ηχοτοπίων της Θεσσαλονίκης 100 χρόνια πριν»[1], πραγματοποιήθηκε απόπειρα αναπαράστασης των ηχοτοπίων ορισμένων από τις πιο ιστορικές γειτονιές, ή αλλιώς τοπόσημα, της Θεσσαλονίκης που μεσουρανούσαν έναν αιώνα πριν, δηλαδή την περίοδο της ενσωμάτωσής της πόλης στο ελληνικό κράτος. Οι περιοχές αυτές ήταν το λιμάνι, η Άνω πόλη και η οδός Βενιζέλου, που αποτελούσε τη βασική αγορά της πόλης.

Σκοπός είναι να παρουσιαστεί, αρχικά, η ερευνά που πραγματοποιήθηκε για την ανασυγκρότηση των χαμένων αυτών ηχοτοπίων. Η πρώτη προσέγγιση αφορούσε τις καθημερινές πρακτικές των κατοίκων σε κάθε μία συγκεκριμένη περιοχή της πόλης, έχοντας πάντοτε ως σημείο αναφοράς τον ήχο. Σε αυτή την έρευνα πρωταγωνίστησαν κυρίως βιβλιογραφικές και φωτογραφικές πηγές για την επικείμενη δημιουργία επιμέρους τεχνητών ηχητικών αντικειμένων [2], με στόχο τη συνολική ανασύνθεση των αντίστοιχων ιστορικών ηχοτοπίων. Ο σκοπός της πτυχιακής εργασίας ήταν η χρήση των τεχνητών αυτών ιστορικών ηχοτοπίων στο κινηματογραφικό αφήγημα στην κινηματογραφική αφήγηση. Στο συγκεκριμένο άρθρο πραγματοποιείται μια αξιολόγηση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε και ένας σχολιασμός των συμπερασμάτων και της προβληματικής τους που απασχολούν πληθώρα επιστημονικών και καλλιτεχνικών πεδίων, καθώς και διαφορετικές προοπτικές και πεδία εφαρμογής.

## **2. Αναπαράσταση των ηχοτοπίων του παρελθόντος**

Η ιστορικότητα του ηχητικού περιβάλλοντος, αποτελεί έναν μεγάλο τομέα στην επιστημονική έρευνα. Η ιστορία των αναπαραστάσεων του χώρου και του συλλογικού φαντασιακού δεν μπορεί πλέον να παραμελεί την ηχητική αντίληψη [3]. Τα ιστορικά ηχοτοπία δημιουργούν πολλά ενδιαφέροντα ζητήματα που αφορούν όχι μόνο τον θεατή και ακροατή ενός κινηματογραφικού έργου, αλλά κυρίως τη μετάφραση και τη μελέτη τους από το σύγχρονο μελετητή [4]. Όπως γίνεται κατανοητό είναι εξ ορισμού αδύνατον ο εκάστοτε ακροατής να διακατέχεται από την ίδια κουλτούρα ακρόασης διαχρονικά και να έχει παρόμοιο πολιτισμικό υπόβαθρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό της πρακτικής της προσπάθειας ανασύστασης των ηχοτοπίων του παρελθόντος στο σήμερα, με τη χρήση λεπτομερούς σύνθεσης.

Στην παρούσα εργασία υποστηρίζεται πως η αναπαράσταση των ιστορικών ηχοτοπίων, με σκοπό τη χρήση τους στην κινηματογραφική αφήγηση, είναι μια καλλιτεχνική κατά βάση διαδικασία που διέπεται από ιστορικές αλήθειες γεγονότα, ντοκουμέντα, αναπαραστάσεις και ιστορική πραγματικότητα, αλλά επί το πλείστον απευθύνεται στο σύγχρονο παρατηρητή και σκοπό έχει να επικοινωνήσει συγκεκριμένα στοιχεία με γνώμονα όχι τη ρεαλιστική ιστορική μεταφορά, αλλά την προσωπική μετάφραση του κινηματογραφιστή.

### 3. Μεθοδολογία

Όντας στις αρχές του εικοστού αιώνα και συγκεκριμένα το 1912, όπου ο νέος ηλικιακά σιωπηλός κινηματογράφος ήταν γεμάτος με κινούμενες εικόνες, αλλά χωρίς ήχο [5], υπήρξε έντονη η σκέψη πως θα είχε ενδιαφέρον εάν ο θεατής/ακροατής μιας κινηματογραφικής ταινίας, εκτός από το να δει, θα είχε την ευκαιρία και να ακροαστεί τη Θεσσαλονίκη με τους κατοίκους της [6], τα αστικά της περιβάλλοντα, αλλά και τα κτίριά της. Ποικίλες γλώσσες, θρησκείες και πολιτισμοί συνομιλούσαν και διασταυρώνονταν στη συγκεκριμένη πόλη [7],[8]. Οι άνθρωποι που συνυπάρχουν στον ίδιο τόπο, πολλές φορές συν-δημιουργούν χωρίς συγκρούσεις, αλλά αρκετές είναι και οι φορές που κυριαρχεί η καχυποψία και οι εντάσεις [9]. Τα κτίρια ήταν κατασκευασμένα με διαφορετικό τρόπο από το σημερινό, με άλλα υλικά, διαφορετική αρχιτεκτονική και άλλο πολεοδομικό σχεδιασμό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να συντελέσουν και αυτά με τη σειρά τους στη σύνθεση μιας άλλης ακουστικής και ενός ηχοτοπίου αρκετά διαφορετικού από το σύγχρονο.

#### 3.1. Αρχικό στάδιο της έρευνας

Για την αναδημιουργία των ηχοτοπίων πραγματοποιήθηκε αρχικά βιβλιογραφική έρευνα ιστορικών, κοινωνιολογικών, γλωσσικών στοιχείων με τη βοήθεια φωτογραφιών της εποχής και μαρτυριών, στοχευμένη κυρίως στην εύρεση ηχητικών στοιχείων που να μπορούν να αναπαραχθούν σήμερα και να χρησιμοποιηθούν στην τελική σύνθεση. Τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους της έρευνας ήταν καθοριστικά για την πραγματοποίηση των αρχικών ηχογραφήσεων πεδίου, σε πραγματικούς χώρους, και τη μετέπειτα σύνθεσή τους.

#### 3.2. Δεύτερο στάδιο της έρευνας

Ακολούθησε εξωτερική ηχογράφιση μεγάλης διάρκειας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας και του εξωτερικού, όπως η Βουλγαρία και η Τουρκία. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα καταγραφικό χειρός. Σύμφωνα με το «δόγμα του '95» [10], προτιμήθηκαν φυσικές πηγές ήχου, στον αντίστοιχο τόπο εκφοράς τους, όπως η λαϊκή αγορά της Ξάνθης με σκοπό να καταγραφούν τα πομάκια και η ελληνική γλώσσα όπως εκφέρονταν από άτομα μεγάλης ηλικίας στον αντίστοιχο αρχιτεκτονικό χώρο χαμηλής δόμησης και χαμηλού επιτρεπόμενου ύψους κτιρίων.

Αρκετές ηχογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν στο πομακοχώρι «Ωραίο» της Ξάνθης, με σκοπό την ηχητική αποτύπωση οικόσιτων ζώων, όπως μικρά γαϊδούρια και κοκόρια, του καλέσματος σε προσευχή από το μουεζίνη, καθώς όμως και την καταγραφή του συνολικού αγροτικού, υψηλής πιστότητας (hi fi) ηχοτοπίου [11]. Στα αγροτικά ηχοτοπία παρατηρείται πιστότητα ήχων, χαμηλός περιβαλλοντικός θόρυβος και απουσία πολλών μηχανών, το οποίο είναι και το ζητούμενο για τη σύνθεση παρελθοντικών ηχητικών περιβαλλόντων. Επιπλέον, ηχογραφήσεις έγιναν στο Σαντάνσκι της Βουλγαρίας, για την καταγραφή αυθεντικών βουλγάρικων ομιλιών, και στο λιμάνι της Καβάλας, για την ηχογράφιση πλοίων. Το λιμάνι της Καβάλας επιλέχθηκε λόγω της ιδιαίτερης ακουστικής του, δηλαδή της αμφιθεατρικής διάταξης του οικοδομικού ιστού γύρω από το λιμάνι σε συνδυασμό με τη συνήθη απουσία ανέμων.

Το λιμάνι της Καβάλας έχει την πλεονεκτική θέση να βρίσκεται σε έναν φυσικό όρμο ο οποίος σχηματίζεται στις δυτικές ακτές της χερσονήσου και βλέπει προς τα ανατολικά, σε μία πλαγιά της πόλης όπου τα σπίτια είναι χαμηλά και αμφιθεατρικά χτισμένα, ενώ από την δυτική πλευρά ο όρμος έχει αρκετό ύψος ώστε να αποτρέπει το σχηματισμό έντονων ανέμων. Το λιμάνι διαθέτει μια μεγάλη αποβάθρα με μικρούς και μεγάλους μόλους που με όλα τα παραπάνω στοιχεία συντελούν στην δημιουργία ενός μοναδικού ηχοτοπίου, που με φυσικό τρόπο αποφεύγει τους έντονους θορύβους και δημιουργεί ιδιαίτερες ακουστικές συνθήκες, κυρίως αναφορικά με την επίδρασή τους στους ήχους που παράγονται στο λιμάνι, όπως λ.χ. τις κόρνες των πλοίων [12].

### *3.3. Τελικό στάδιο της έρευνας*

Στο τελικό στάδιο της έρευνας έγινε η επεξεργασία των ηχογραφήσεων και η τελική σύνθεση με σκοπό την τελική ανασύνθεση των ηχοτοπίων των τριών διαφορετικών περιοχών της Θεσσαλονίκης:

Α. Βενιζέλου/Αγορά, Β. Άνω πόλη και Γ. Λιμάνι.

Η επεξεργασία των ηχητικών τεκμηρίων πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα «adobe premiere» και «adobe audition» [13] και η ηχητική σύνθεση περιελάμβανε τρία κανάλια ήχου: ανθρώπινη ομιλία, ατμόσφαιρα και μεμονωμένες λεπτομέρειες. Η περαιτέρω επεξεργασία των ηχητικών γραφημάτων είναι πολύ μικρή, χωρίς προσθήκη ειδικών εφέ και φίλτρων, εκτός από τα καθιερωμένα cross-fade, fade in και fade out. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας ήταν η δημιουργία τριών ηχοτοπίων διάρκειας πέντε έως επτά λεπτών. Η αναπαραγωγή τους πραγματοποιήθηκε με τη συνοδεία εικόνων της εποχής, χωρίς να υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση ήχου και εικόνας, με σκοπό την ανασύσταση του ηχητικού περιβάλλοντος αλλά συγχρόνως και την καλλιτεχνική απόδοσή τους.

## **4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων της έρευνας**

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας έγινε με την αναπαραγωγή των τριών ηχοτοπίων σε συνδυασμό με την προβολή, σε συνεχή ροή, μιας σύνθεσης εικόνων, οι οποίες και επιλέχθηκαν από την σχετική βιβλιογραφία. Τα τρία ηχοτοπία αναπαράχθηκαν ταυτόχρονα και σε επανάληψη μέσω υπολογιστών και οι εικόνες προβλήθηκαν στους τρεις τοίχους ενός άδειου σκοτεινού δωματίου. Έτσι, ο θεατής/ακροατής μπορούσε να περιφερθεί στο χώρο του δωματίου, να αφουγκραστεί τους ήχους αλλά και να παρατηρήσει λεπτομερειακά τις παλιές φωτογραφίες, κάνοντας μια εικονική περιήγηση στο παρελθόν. Σε κάθε περιοχή υπήρχε η έννοια της αυτοτέλειας, αλλά επιπλέον πραγματοποιήθηκε η προσπάθεια παρουσίασης της πόλης ως σύνολο: Τα ηχοτοπία των τριών περιοχών αναπαράγονταν ανεξάρτητα, αλλά συγχρόνως συνυπήρχαν ως σύνολο, ως στοιχεία των πολλαπλών ταυτοτήτων της Θεσσαλονίκης του 1912.

## **5. Συμπεράσματα**

Κάποια από τα ποικίλα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω έρευνα είναι και τα ακόλουθα:

1. Στη Θεσσαλονίκη, σημαντικό αστικό κέντρο και το 1912, ο αστικός θόρυβος έκανε αισθητή την παρουσία του διαχρονικά.[14] Ωστόσο το τι θεωρείται θόρυβος μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή και τον τόπο αναπαραγωγής του, και ορίζεται τις περισσότερες φορές ως ο ανεπιθύμητος ήχος. Η υποκειμενικότητα του τι ορίζεται επιθυμητός και το τι ανεπιθύμητος ήχος ανήκει σχεδόν εξ ολοκλήρου στο υποκείμενο. Στην καθημερινότητα βέβαια, συντάσσονται νομοθεσίες που ορίζουν συγκεκριμένους ήχους με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως θόρυβο, κυρίως για τις αρνητικές επιδράσεις του στον άνθρωπο. Οι διαφορετικές κουλτούρες της ακρόασης και ο τρόπος με τον οποίο το εκάστοτε κοινωνικοπολιτικό πλαίσιο του ακροατή ερμηνεύει ένα ηχοτοπίο είναι αδύνατο να ελεγχθούν και ανασυσταθούν. Οπότε η ακριβής ιστορικά ανασύσταση ενός ηχοτοπίου που έχει πια χαθεί είναι εξ ορισμού ανέφικτη.

2. Το όλο εγχείρημα της αναβίωσης του παρελθοντικού ηχητικού περιβάλλοντος είναι μια υποκειμενική μετάφραση με σκοπό την καλλιτεχνική δημιουργία. Η γενίκευση που πραγματοποιήθηκε, αφού ήταν αδύνατο να υπάρξει ρεαλιστική μεταφορά της εποχής, ήταν αναπόφευκτη διότι αυτό που ενδιέφερε ήταν να επικοινωνήσει στοιχεία του προηγούμενου αιώνα σύμφωνα με το κοινωνικοπολιτικό πλαίσιο και την κουλτούρα ακρόασης του σύγχρονου θεατή.

3. Η θεωρία της ακουστικής οικολογίας αναγνωρίζει δύο ειδών ηχοτοπία: τα υψηλής πιστότητας (hi fi) ηχοτοπία, που κυρίως συναντώνται στις περιοχές εκτός πόλης και στα οποία οι ήχοι είναι πιο αναγνωρίσιμοι λόγω της πιστότητας του ηχητικού σήματος, και στα χαμηλής πιστότητας (low fi) ηχοτοπία, που βιώνονται καθημερινά στις μεγάλες πόλεις και όπου η αναγνωσιμότητα του ηχητικού σήματος, λόγω της υψηλής στάθμης του περιβαλλοντικού θορύβου, είναι σχεδόν αδύνατη [11]. Οι επιστημονικές μελέτες συμφωνούν πως ο αυξημένος περιβαλλοντικός θόρυβος είναι υπεύθυνος για πολλά ιατρικά και ψυχολογικά νοσήματα. Η παρούσα μελέτη φιλοδοξεί να αποτυπώσει στην πράξη τη μεταβατική πορεία της πόλης από μία αγροτική ουσιαστικά περιοχή με ένα υψηλής πιστότητας (hi fi) ηχοτοπίο στη σύγχρονη μορφή της με το αντίστοιχο χαμηλής πιστότητας (low fi) ηχοτοπίο. Ο θόρυβος του παρελθόντος γίνεται, στην πράξη, η μουσική του παρόντος, μέσω της κινηματογραφικής αναπαράστασης.

4. Η προτεινόμενη μεθοδολογία της αναπαράστασης ηχοτοπίων που έχουν πια χαθεί, και αφορά κυρίως τη χρήση υπαρχόντων ηχοτοπίων αλλά και ηχογραφήσεων πεδίου, έχει ως στόχο την ευρεία εφαρμογή της στη δημιουργία αντίστοιχων ταινιών τεκμηρίωσης ή μυθοπλασίας, που αφορούν επί το πλείστον το κοντινό παρελθόν.

## **6. Μελλοντικές εργασίες και εφαρμογές**

Η εδραίωση της προηγούμενης διαδικασίας θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση περαιτέρω ειδικού εξοπλισμού ηχογραφήσεων, με σκοπό την εκτενή και λεπτομερή αποτύπωση των συγκεκριμένων ηχητικών φαινομένων και τεκμηρίων. Οι ηχογραφήσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε μια πληθώρα άλλων τόπων εκτός Ελλάδας, όπως η δυτική Τουρκία, χωριά της Βουλγαρίας, Πορτογαλία και Ισραήλ, όπου υπάρχουν επιπλέον ηχητικές ομοιότητες με αυτές που προσπαθούν να αναπαρασταθούν στην εν λόγω εργασία. Γενικότερα, η εκτεταμένη έρευνα σε αυτούς τους τόπους, που με την αντίστοιχη ιστορία θα δίνονταν έμφαση στα ηχητικά σήματα και τα ηχητικά φαινόμενα, θα είχε ως αποτέλεσμα τη ζητούμενη αντιστοίχιση. Είναι θεμιτό να σημειωθεί πως η προτεινόμενη έρευνα δεν

περιορίζεται μόνο σε φωτογραφικά τεκμήρια αλλά σε λογοτεχνικά και ιστορικά κείμενα, καθώς και σε άλλα τεκμήρια όπως οι συνεντεύξεις και οι ηχογραφήσεις, που με τη βοήθεια ειδικών επιστημόνων είναι δυνατόν να γίνουν κατανοητά και να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση των παρελθοντικών ηχοτοπίων.

Η παραπάνω μεθοδολογία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στην κινηματογραφική διαδικασία αλλά και στο ηχητικό περιβάλλον των μουσείων, των χώρων τέχνης αλλά και συγκεκριμένων μνημείων και αρχαιολογικών χώρων. Η χρήση του ήχου ως μέσο ενδυνάμωσης της εμπειρίας αλλά και της εκπαιδευτικής μεθόδου έχει έρθει στο προσκήνιο και διεκδικεί δυναμικά τη θέση που της αναλογεί. Η διαδεδομένη δημιουργία καλλιτεχνικών, αρχιτεκτονικών αλλά και εκπαιδευτικών περιβαλλόντων φέρνει το ανεκμετάλλετο ηχητικό περιβάλλον στο προσκήνιο.

## 6. Αναφορές

- [1] Ψαρρά Δ., «Ο ήχος της πόλης – Σχεδιασμός ηχοτοπίων της Θεσσαλονίκης 100 χρόνια πριν», Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Κινηματογράφου, Σ.Κ.Τ., Α.Π.Θ., Ιούνιος 2011
- [2] Wikipedia (on line), [http://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_object](http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_object) (επίσκεψη 15 Σεπτεμβρίου 2014).
- [3] Corbin A., *Village Bells. Sound and meaning in the Nineteenth – century French Countryside*, Columbia University Press, London (1998).
- [4] Bull M. & Les Back, «Histories of Sound» στο *The Auditory culture Reader*, Berg, Oxford, σελ. 115-116 (2003).
- [5] Βαλούκος Στ., *Ιστορία του Κινηματογράφου, Α Τόμος*, Αιγόκερω, Αθήνα, σ.173 (2003).
- [6] Βαφόπουλος Γ. Θ., *Το παραμύθι της Θεσσαλονίκης*, εκδόσεις Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, σ.47 (1992).
- [7] Αναστασιάδου Μ., *Θεσσαλονίκη 1830 – 1912 – Μία μητρόπολη την εποχή των Οθωμανικών μεταρρυθμίσεων*, Βιβλιοπωλείον της Εστίας, Αθήνα, σ. 403 (2008).
- [8] Κουζινόπουλος Σπ., *Το μεγάλο άλμα. Η απελευθέρωση της Θεσσαλονίκης*, Καστανιώτης, Αθήνα, σ. 32 (1997).
- [9] Τομανάς Κ., *Δρόμοι και γειτονιές της Θεσσαλονίκης*, εκδόσεις Νησίδες, Σκόπελος σ. 112,114,122,123 (1997).
- [10] Wikipedia (on line), [http://en.wikipedia.org/wiki/Dogme\\_95](http://en.wikipedia.org/wiki/Dogme_95), (Επίσκεψη 15 Σεπτεμβρίου 2014).
- [11] Schafer R.M., *The Soundscape. Our sonic environment and the tuning of the world*, Destiny Books, Βερμόντ (1977,1994).
- [12] Jean – Francois Augoyard & Henry Torgue, *Sonic experience. A guide to everyday sounds*, McGill-Queen’s University Press, Κεμπέκ σελ.99-123 (2005).
- [13] Διαδικτυακός τόπος της εταιρίας Adobe <http://www.adobe.com/eeurope/products/premiere.html>, (Επίσκεψη 15 Σεπτεμβρίου 2014).
- [14] Μαζάουερ Μ., *Τα Βαλκάνια*, εκδ. Πατάκη, Αθήνα, 2002.



## **Τα ηχητικά «μυστήρια» που καθιστούν την καθημερινότητα στη σύγχρονη Θεσσαλονίκη μοναδική**

Αιμιλία Καραποστόλη<sup>a</sup> & Νικόλαος Π. Τσινίκας<sup>b</sup>

Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Α.Π.Θ.

<sup>a</sup>[emiliearch@gmail.com](mailto:emiliearch@gmail.com), <sup>b</sup>[tsinikas@arch.auth.gr](mailto:tsinikas@arch.auth.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Το άρθρο που ακολουθεί αποτελεί μια πρωτότυπη προσέγγιση και μια ξεχωριστή ανάγνωση της σύγχρονης Θεσσαλονίκης έχοντας ως γνώμονα το ηχητικό της περιβάλλον. Τα ηχητικά αντικείμενα, τα ηχητικά φαινόμενα, αλλά και τα ηχοτοπία της πόλης δημιουργούν ένα παλίμνηστο από σύμβολα, υφές, περιβάλλοντα, ηχητικές πρακτικές των κατοίκων, ηχητικές επικράτειες, αλλά και αρχιτεκτονικές οικολογίες που συνθέτουν την πολύπλοκη και πολυδιάστατη ηχητική Θεσσαλονίκη. Οι συγγραφείς δημιουργούν μια μεθοδολογία που επικοινωνεί τα παραπάνω στοιχεία, αλλά έχει και ως απώτερο σκοπό την ευρεία χρήση του ήχου στην αρχιτεκτονική δημιουργία, καθώς και την αρχιτεκτονική επέμβαση στο υπάρχον ηχητικό αστικό περιβάλλον.*

### ***The sonic “mysteries” of Thessaloniki; fabrication of a unique everyday life***

### **ABSTRACT**

*The following article consists of an original approach and a unique reading of contemporary Thessaloniki, having as a pillar the notion of the sonic environment. The sound objects, sound effects and city soundscapes create a palimpsest of symbols, textures, environments, sound practices of residents, acoustic territories and architectural ecologies that make up the complex and multidimensional sounding Thessaloniki. The writers of this article aim to create a methodology that communicates the information above and aims not only to the widespread use of sound in architectural planning and design, but also to the creative architectural interference with the existing sonic urban environment.*

## 1. Εισαγωγή

Ο αρχιτεκτονικός χώρος, σύμφωνα με τους φαινομενολόγους, αρχιτέκτονες, πολεοδόμους και άλλους ειδικούς, γίνεται αντιληπτός όχι ως αφηρημένος και ουδέτερος, αλλά ως βιωμένος χώρος. Η φαινομενολογία προσφέρει ένα μοντέλο για τη βαθύτερη κατανόηση του κόσμου μέσω της προσωπικής εμπειρίας. Αλλά εκεί βρίσκεται και η αδυναμία της, ως ένα επί το πλείστον αυτοαναφορικό σύστημα με αμφισβητήσιμο βαθμό επιστημονικότητας [1]. Η εμπειρία του χώρου δεν περιορίζεται μόνο στην ηγεμονία της όρασης, αλλά επεκτείνεται και σε άλλες αισθήσεις, όπως η ακοή, που έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στην παρούσα μελέτη.

Σε αυτό το άρθρο οι συγγραφείς, αποφεύγοντας την παγίδα ενός κλειστού συστήματος αναφοράς, προσεγγίζουν την ακουστική επιστήμη με μια ποιητική διάθεση και αναλύουν τα ηχητικά φαινόμενα της πόλης με απώτερο σκοπό την ευρεία χρήση του ήχου στην αρχιτεκτονική δημιουργία, πέρα από την αποκλειστική χρήση της στο σχεδιασμό ειδικών κτιρίων, όπως χώροι για μουσικές και θεατρικές παραστάσεις.

Ο T. Cox, αναγνωρισμένος καθηγητής ακουστικής, κάνει μια παρόμοια προσέγγιση στο τελευταίο του βιβλίο “The Sound Book” [2]. Έχοντας ως στόχο την ευρεία διάδοση της ακουστικής επιστήμης, ταξιδεύει στις πέντε ηπείρους και παρουσιάζει εκτενώς μοναδικά ακουστικά και ηχητικά φαινόμενα από ολόκληρη την επικράτεια του αντιληπτού κόσμου. Από την πυραμίδα των Μάγια που κελαηδά στο Μεξικό, μέχρι τους ήχους από το λιώσιμο των πάγων στη λίμνη Βαϊκάλη της Σιβηρίας, ο αναγνώστης ταξιδεύει μαζί του, κατανοεί την εμπειρία συγκεκριμένων ηχητικών και ακουστικών φαινομένων και ανακαλύπτει τι κρύβεται πίσω από αυτά τα «μυστήρια», κάποια από τα οποία βιώνει και στην καθημερινή του ζωή.

Επεκτείνοντας την αρχική θέση των συγγραφέων, όσον αφορά την αρχιτεκτονική θεωρία και πρακτική, η απλή επιστροφή στη φαινομενολογία δεν επαρκεί. Η μελέτη, καθώς και η επέμβαση στο αστικό ηχητικό περιβάλλον, σύμφωνα με τους συγγραφείς, οφείλει να πραγματοποιείται με βάση το σύνολο των αστικών περιβαλλόντων και συμπεριφορών [3], αλλά και με βάση την πληθώρα των αρχιτεκτονικών οικολογιών [4] που συνυπάρχουν και συνδιαλέγονται στη συνολική περιφέρεια της πόλης.

Στο συγκεκριμένο άρθρο αναλύεται η καθημερινή ζωή στη Θεσσαλονίκη με κύριο γνώμονα τα ηχητικά φαινόμενα και την ηχητική εμπειρία, αποκαλύπτοντας με αυτό τον τρόπο έναν ηχητικό χάρτη από ευμετάβλητες υπαρξιακές επικράτειες [5] οι οποίες σπάνια γίνονται συνειδητά αντιληπτές. Οι συγγραφείς αναζητούν τις ηχητικές ταυτότητες και τις ηχητικές πρακτικές των κατοίκων της πόλης που συνιστούν τον ηχητικό χάρτη της Θεσσαλονίκης, αποτελούμενο από ηχητικά αντικείμενα [6], ηχητικά φαινόμενα [7], αλλά και ηχοτοπία [8].

## 2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που προτείνεται είναι ένα σύστημα από τρεις ξεχωριστές επιστημονικές και καλλιτεχνικές προσεγγίσεις που έχουν να κάνουν με τη μουσική σύνθεση, την ακουστική και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Πιο αναλυτικά οι τρεις κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

### *2.1. Συγκεκριμένη μουσική και ακουστική οικολογία (μουσική)*

Η έννοια του ηχητικού αντικειμένου, όπως εισήχθη από τον P. Schaeffer [9], χρησιμοποιείται ευρέως στην προτεινόμενη μεθοδολογία για να επιτευχθεί η κατηγοριοποίηση των ηχητικών πηγών, αλλά και των ίδιων των ήχων. Η ακουστική οικολογία από την άλλη, η οποία ερευνά με διεπιστημονικό τρόπο τις κοινωνικές, πολιτιστικές και οικολογικές πτυχές του συνολικού ηχητικού περιβάλλοντος [10], αποτελεί το βασικό πυλώνα αυτής της μεθόδου. Η ιδέα του ηχοτοπίου, η διαδεδομένη ελληνική μετάφραση του αγγλικού όρου *soundscape*, καθιερώθηκε από το μουσικοσυνθέτη R. M. Schafer και χρησιμοποιείται για τη μελέτη του συνόλου των ηχητικών αντικειμένων και ηχητικών φαινομένων του εκάστοτε κτιρίου, ροής ή περιοχής μελέτης.

### *2.2. Ακουστική, ηχητικά φαινόμενα και μεθοδολογία CRESSON (ακουστική)*

Σε αντίθεση με την ακουστική οικολογία που εμμένει σε μια πιο «ρομαντική» προσέγγιση του ηχητικού περιβάλλοντος, αποκηρύττοντας το σύγχρονο αστικό ηχοτόπιο ως «θόρυβος» το οποίο οι ειδικοί οφείλουν να εξαλείψουν, το Κέντρο Έρευνας του Αστικού Ηχητικού περιβάλλοντος, *Centre de recherche sur l'espace sonore et l'environnement urbain – Cresson*, στη Γκρενόμπλ της Γαλλίας, υιοθετεί μια διαφορετική στάση [11]. Η στρουκτουραλιστική μεθοδολογία του CRESSON συμπληρώνει αρχιτεκτονικές και ακουστικές προσεγγίσεις με σκοπό τη διεπιστημονική μελέτη του αστικού ηχοτοπίου και την ευρεία χρήση του στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, αντιμετωπίζοντας το θόρυβο όχι σαν ανεπιθύμητο ήχο, αλλά ως βασικό δομικό στοιχείο της σύγχρονης πόλης [12]. Κύριο στοιχείο της παρούσας μεθοδολογίας είναι η έννοια του ηχητικού φαινομένου, *sonic effect*.

*2.3 Η πολεοδομική ανάλυση του K. Lynch, τα σύμβολα του G. Bachelard, οι χωρικές υφές του H. Lefebvre, οι ηχητικές επικράτειες του B. LaBelle, οι πρακτικές του A. Rapoport και οι οικολογίες των J. Deleuze και F. Guattari (αρχιτεκτονική)*

Η πολεοδομική ανάγνωση της πόλης από τον K. Lynch και η διάρθρωση του αστικού περιβάλλοντος σε μονοπάτια, όρια, περιοχές, κόμβους και τοπότητα, σχηματίζουν, σύμφωνα με τον ίδιο, την εικόνα της πόλης [13]. Τα σύμβολα και η ποιητική ανάγνωση των αρχιτεκτονικών «αντικειμένων» από τον G. Bachelard συμπληρώνουν αυτήν την αρχική κατηγοριοποίηση με αρχέτυπα, τα οποία συναντώνται στα βάθη του συλλογικού ασυνείδητου [14]. Οι χωρικές υφές [15], οι ηχητικές πρακτικές των κατοίκων της πόλης και τα αρχιτεκτονικά περιβάλλοντα [16], αλλά και οι αρχιτεκτονικές οικολογίες [17], σε συνάρτηση με τις ηχητικές επικράτειες [18] που συνυπάρχουν μέσα στην πόλη, συμπληρώνουν αυτό το πολυδιάστατο παλίμψηστο.

## **3. Κατηγορίες**

Η ανάγνωση και ανάλυση του αστικού ηχητικού περιβάλλοντος πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ακόλουθου δομικού συστήματος αναφοράς. Λόγω της μικρής έκτασης του άρθρου θα ακολουθήσει μια επιγραμματική αναφορά

στις κατηγορίες που συγκροτούν την προτεινόμενη μεθοδολογία [19] και θα μελετηθούν διεξοδικά με την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής της συγγραφέα:

### 3.1. Κτίρια

Στην πρώτη κατηγορία πρωταγωνιστούν ήχοι, ηχητικά φαινόμενα και ηχοτοπία που έχουν να κάνουν με την ακουστική κλειστών χώρων, την κατοικία, αλλά και κάποια ειδικά κτίρια που συνοδεύουν τις αντίστοιχες ηχητικές πρακτικές των κατοίκων της Θεσσαλονίκης.

A) Τα πιο ήσυχα μέρη στην πόλη:

Αυτή η υποκατηγορία εξετάζει μια πληθώρα άδειων κτιρίων, λόγω της οικονομικής κρίσης, και αναλύει πώς αυτά τα άδεια αρχιτεκτονικά κελύφη επηρεάζουν την ηχητική πραγματικότητα της πόλης. Επιπλέον, έχει να κάνει με τις κατοικίες, οι οποίες αποτελούν τα ησυχαστήρια των κατοίκων και συνδέονται κυρίως με χαμηλής όχλησης ηχοτοπία και ήπιες ηχητικές πρακτικές.

B) Ψίθυροι από παντού:

Η δεύτερη υποκατηγορία εξετάζει πώς βιώνεται η ακουστική των δημόσιων κτιρίων με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική, όπως τα κυκλικά κτίρια της Θεσσαλονίκης. Η Ροτόντα, ο Λευκός Πύργος και το κτίριο που φιλοξενεί το παιδαγωγικό τμήμα του Α.Π.Θ, γίνονται φορείς ιδιαίτερων ηχητικών φαινομένων, όπως συνηχήσεις, ψιθυρισμοί και ηχητικές σκιές [20], και ηχητικών πρακτικών των κατοίκων που έχουν άμεση σχέση με την ακουστική τους.

Γ) Η ακουστική του μεγαλείου:

Η τρίτη υποκατηγορία μελετά τις βυζαντινές εκκλησίες που βρίσκονται μέσα στα όρια της σύγχρονης πόλης, αλλά και τα ειδικά κτίρια για μουσικές και θεατρικές παραστάσεις. Τα ηχοτοπία αυτών των αρχιτεκτονημάτων είναι γεμάτα από ξεχωριστούς ήχους που γεννιούνται μέσα στους αιώνες. Οι συγγραφείς αναλύουν την ηχητική κουλτούρα του παρελθόντος και τον τρόπο με τον οποίο μεταφράζονταν η ακουστική εμπειρία τότε σε αντίθεση με το παρόν [21].

### 3.2. Ροές και στάσεις

Η δεύτερη κατηγορία ασχολείται κυρίως με ήχους και ηχητικές πρακτικές μεγάλου αριθμού ανθρώπων που συνωστίζονται σε στάση ή σε κίνηση, είτε βρίσκονται στο επίπεδο του δρόμου, είτε σε κάποιο ύψος πάνω από το επίπεδο της γης, είτε κάτω από αυτή. Τα ακουστικά και ηχητικά φαινόμενα των ανοιχτών χώρων και τα ιδιαίτερα ηχοτοπία αυτών των περιοχών εμπλουτίζονται από ήχους που ποικίλουν ανάλογα την εποχή του χρόνου και τη γεωγραφία.

A) Τα οικοδομικά τετράγωνα της σύγχρονης πόλης :

Η πρώτη υποκατηγορία καταπιάνεται με ακουστικά και ηχητικά εφέ που λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα αλλά και στις όψεις του οικοδομικού τετραγώνου λόγω του συνεχούς συστήματος δόμησης, όπως το *grand canyon* εφέ [22]. Επιπλέον, οι απέναντι όψεις γειτνιαζόντων κτιρίων δημιουργούν ακουστικές κοινότητες [23] που μοιράζονται παρόμοιες ηχητικές πληροφορίες.

B) Οι πέτρες που κροταλίζουν :

Η δεύτερη υποκατηγορία αναλύει πώς οι ανασκαφές, τα εγκαταλελειμμένα στρατόπεδα αλλά και οι μεγάλες πολεοδομικές επεμβάσεις, όπως αυτή της Νέας

Παραλίας, συνθέτουν τα αναγκαία κενά, ανάσες στον αστικό ιστό. Κάποιες από αυτές είναι γεμάτες με αρχαία λείψανα, άλλες με σύγχρονα καλλιτεχνικά περιβάλλοντα και άλλες συνθέτουν αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις, που αποτελούν τις αναγκαίες ακουστικές ασυνέχειες του αστικού ηχητικού περιβάλλοντος. Οι ηχητικές πρακτικές των κατοίκων ποικίλουν, αλλά διακρίνονται από χαμηλής όχλησης ηχοτοπία που ενισχύονται από την έλλειψη των συνεχών βόμβων, προερχόμενων από τις μηχανές των αυτοκινήτων, drone εφέ [24].

Γ) Το σύγχρονο ποτάμι :

Σύμφωνα με το μουσικό καλλιτέχνη J. Cage, το σύγχρονο ποτάμι, ανέκαθεν απαραίτητο στοιχείο μιας πόλης, αντικαθίσταται από το δρόμο και από τις ροές μεγάλο αριθμού ανθρώπων. Οι δρόμοι αναλύονται ως φυσικά ποτάμια που παράγουν παρόμοια ηχητικά φαινόμενα. Το κελάρυσμα του νερού υποκαθίσταται από τη συνεχή κίνηση των αυτοκινήτων και από τις ροές των ανθρώπων στους αστικούς κόμβους.

### 2.3. Περιοχές και κοινότητες

Η τελευταία κατηγορία έχει να κάνει με περιοχές όπου το συγκεκριμένο σύστημα δόμησης έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μιας ιδιαίτερης ηχητικής ταυτότητας, αλλά και με τα ιδιαίτερα φυσικά στοιχεία που συνθέτουν μοναδικά ηχητικά αντικείμενα.

A) Η φύση που δεν παραδίνεται:

Το δάσος του Σειχ Σου και ο Θερμαϊκός κόλπος αποτελούν τα τελευταία ψήγματα αδόμητου περιβάλλοντος στην πόλη. Τα υψηλής πιστότητας, hi fi ηχοτοπία [25] αυτών των περιοχών και η χαμηλή στάθμη του περιβαλλοντικού θορύβου καθιστούν δυνατή την ακρόαση bio και geo ήχων [26] που εξαφανίζονται μέσα στη σύγχρονη πόλη.

B) Το χωριό μέσα στην πόλη:

Οι συγγραφείς υποστηρίζουν την ηχητική σύνδεση του διατηρητέου οικισμού της Άνω πόλης με το αγροτικό αρχιτεκτονικό περιβάλλον. Η αντιπαράθεση της συγκεκριμένης περιοχής με την παραπάνω υποκατηγορία των σύγχρονων οικοδομικών τετραγώνων είναι απαραίτητη. Οι ήχοι διαδίδονται απευθείας, τα μικρά φιδωτά δρομάκια και η χαμηλή πυκνότητα δόμησης αποκλείουν τις συνεχείς ανακλάσεις και την κυριαρχία της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης στο ηχοτοπίο της περιοχής.

## 4. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα, που θα δημοσιευτούν αναλυτικά στη διδακτορική διατριβή της συγγραφέα, φιλοδοξούν να συνθέσουν μια μοναδική ανάγνωση, αλλά και ακρόαση της πόλης και συγκεκριμένα της Θεσσαλονίκης. Η μεταμόρφωση της αστικής βιωματικής εμπειρίας, αλλά και η ευαισθητοποίηση των πολιτών σε ζητήματα περιβαλλοντικού αστικού θορύβου και η χρήση του ηχητικού περιβάλλοντος ως μίαν ανεκμετάλλευτη πρώτη ύλη για αρχιτεκτονικές, πολεοδομικές και εικαστικές παρεμβάσεις, είναι μόνο κάποια από αυτά.

## 5. Αναφορές

- [1] Neil Lych, *Rethinking Architecture. A reader in cultural theory*, Routledge, Νέα Υόρκη, σελ. 80 (1997).
- [2] Trevor Cox, *The Sound Book*, W.W. Norton & Company, Νέα Υόρκη (2014).
- [3] Amos Rapoport, «On 'The invisible in Architecture': An Environment – Behaviour Studies Perspective» στο *The invisible in architecture* επεξεργασία από Ole Booman και Roemer van Toom, St. Martin Press, Λονδίνο, σελ.66-73 (1994).
- [4] Verena Andermatt Conley, «The ecological relation» στο *Relational Architectural Ecologies. Architecture, nature and subjectivity* επεξεργασία από Peg Rawes, Routledge, Νέα Υόρκη, σελ.275-287 (2013).
- [5] ό.π.
- [6] Brian Kane, «L' Objé Sonore Maintenant: Pierre Schaeffer, sound objects and the phenomenological reduction» *Organised Sound*, 12(1), σελ. 15-27 (2007).
- [7] Jean – Francois Augoyard & Henry Torgue, *Sonic experience. A guide to everyday sounds*, McGill-Queen's University Press, Κεμπέκ (2005).
- [8] R. Murray Schafer, *The Soundscape. Our sonic environment and the tuning of the world*, Destiny Books, Βερμόντ (1977,1994).
- [9] Brian Kane, ό.π.
- [10] Επίσημος διαδικτυακός τόπος του Παγκόσμιου Φόρουμ Ακουστικής Οικολογίας (on line), <http://wfae.proscenia.net/> (επίσκεψη 11/09/2014).
- [11] Jean – Francois Augoyard & Henry Torgue, ό.π.
- [12] Björn Hellström, *Noise Design. Architectural Modelling and the Aesthetics of Urban Acoustic Space*, Διδακτορική διατριβή, Royal Institute of Technology-KTH, Στοκχόλμη (2003).
- [13] Kevin Lynch, *The Image of the City*, The M.I.T. Press, Μασαχουσέτη (1960).
- [14] Gaston Bachelard, *Η ποιητική του χώρου*, μτφ. Ελένη Βέλτσου & Ιωάννα Δ. Χατζηνικολή, εκδόσεις Χατζηνικολή, Αθήνα (1957, 1982).
- [15] Henri Lefebvre, *The production of space*, μτφ. Donald Nicholson-Smith, Basil Blackwell, Μασαχουσέτη (1974, 1991).
- [16] Amos Rapoport, *The meaning of the built environment. A nonverbal communication approach*, The University of Arizona Press, Τάκσον (1982, 1990).
- [17] Verena Andermatt Conley, ό.π.
- [18] Brandon LaBelle, *Acoustic Territories. Sound Culture and everyday life*, Continuum, Νέα Υόρκη (2010).
- [19] Aimilia Karapostoli & Nikolaos P. Tsinikas, «Sounding Thessaloniki; Architectural Representation of an Invisible City», στο *Invisible Places. Sounding Cities*, Πορτογαλία (2014).
- [20] Νίκος Τσινίκας, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 51 (1990).
- [21] Deborah Howard & Laura Moretti, *Sound and Space in Renaissance Venice*, Yale University Press, China (2009).
- [22] Carl Swason, *The Canyon Effect*, on line, <http://nymag.com/nymetro/urban/features/noise/9461/>, (επίσκεψη 12/09/2014).

- [23] Will Schrimshaw, The Acoustic Community, on line,  
<http://willschrimshaw.net/subtractions/the-acoustic-community/>, (επίσκεψη  
2/9/14).
- [24] Jean – Francois Augoyard & Henry Torgue, ό.π., σελ. 40-46.
- [25] R. Murray Schafer, ό.π., σελ. 43.
- [26] B. C. Pijanowski, L. J. Villanueva - Rivera, S. L. Dumyahn, A. Farina, B. L.  
Krause, S. H. Gage, και N. Pieretti, «Soundscape ecology: The science of  
sound in the landscape», Bioscience, τεύχος 61, σελ. 203-216 (2011).

# Κατασκευή και αξιολόγηση μικροφώνου ηχητικού πεδίου

Κ.Θ. Γκάλιος<sup>1,a</sup>, Χ. Α. Δημούλας<sup>1,b</sup> & Γ. Μ. Καλλίρης<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε., Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε., Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [kgalios@hotmail.com](mailto:kgalios@hotmail.com), <sup>b</sup> [babis@eng.auth.gr](mailto:babis@eng.auth.gr), <sup>c</sup> [gkal@jour.auth.gr](mailto:gkal@jour.auth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου κατασκευής ενός μικροφώνου ηχητικού πεδίου (*soundfield*). Τα χαμηλού κόστους ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της κυκλωματικής διάταξης αποτελούν μια ιδιαιτερότητα σχετικά με το συγκριτικά ποιοτικό αποτέλεσμα της κατασκευής. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του συστήματος είναι ο σωστός τρόπος της τοποθέτησης των μικροφωνικών καψών σε τετράεδρο σχηματισμό.

Επιπλέον, μέρος της μελέτης αποτελεί και η διεξαγωγή πολυκαναλικών ηχογραφήσεων, οι οποίες οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ποιότητα της ηχογράφησης και την καταγραφή της χωρικής πληροφορίας με χρήση του μικροφώνου ηχητικού πεδίου

## *Construction and evaluation of a soundfield microphone*

### ABSTRACT

*The study of the soundfield microphone's construction is the main objective of this thesis. The low cost electronic components, which were used for the construction of electronic circuit, are rather distinctive in comparison with the qualitative result. The prerequisite for the proper function of the system is to place correctly the microphone capsules in tetrahedron formation.*

*The recordings are part of this study leading us to find additional conclusions about the acoustic conditions which should be known when we record a sound with a soundfield microphone.*

### Εισαγωγή

Τα μικρόφωνα ηχητικού πεδίου (**soundfield microphones**) αποτελούν διατάξεις τεσσάρων «καρδιοειδών μεμβρανών», που τοποθετούνται στις τέσσερις έδρες ενός κανονικού τετραέδρου, παρέχοντας τη δυνατότητα καταγραφής της διεύθυνσης του ηχητικού κύματος, χωρίς ωστόσο να ενδιαφέρει ο εντοπισμός της ηχητικής πηγής, αλλά κυρίως η δημιουργία της κατάλληλης «στερεοφωνικής εικόνας» [1], [2].



Χρησιμοποιούν τις τέσσερις συνιστώσες (X, Y, Z, W) του προτύπου B (B-format), όπου W είναι το ακουστικό σήμα πίεσης που θα λάμβανε ένα πανκατευθυντικό μικρόφωνο, ενώ οι αξονικές συνιστώσες X, Y, Z αντιστοιχούν στα σήματα ταχύτητας (velocity), δηλαδή τα σήματα «βαθμωτού πίεσης» (gradient pressure) που θα λάμβαναν τρία δικάτευθυντικά (figure of 8) μικρόφωνα σε κάθε βασικό άξονα [3], [4].

Οι τέσσερις έξοδοι από τις ισάριθμες κάψες των soundfield μικροφώνων, ονομάζονται soundfield (ή A-format) σήματα και μετατρέπονται από τον DSF-2 (Digital Soundfield Format) επεξεργαστή σε σήματα B-format [5].

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός μικροφώνου ηχητικού πεδίου (soundfield). Παρουσιάζονται τα στάδια υλοποίησης του μικροφωνικού συστήματος όπου περιλαμβάνονται η σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος (προενισχυτική μονάδα), ο τρόπος κατασκευής του και η τοποθέτηση των μικροφωνικών καψών σε τετράεδρο σχηματισμό.

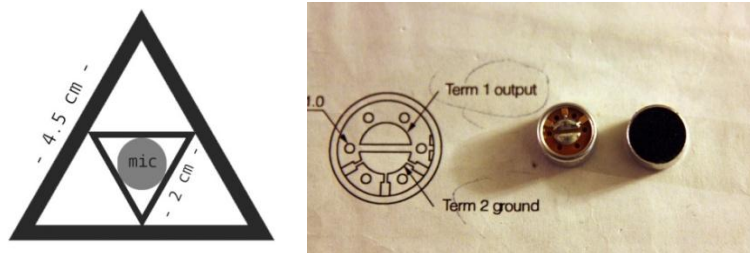
Η παρουσίαση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν αφορούν κυρίως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Τα δείγματα των μετρήσεων αυτών χρησιμοποιήθηκαν για ένα παράδειγμα μετατροπής των A-format σημάτων σε B-format. Επιπρόσθετα παρουσιάζονται παραδείγματα πολυκάναλης ηχογράφησης ομιλίας και ενός ακουστικού μουσικού οργάνου.

## 1. Υλοποίηση κατασκευής

Από τις πρώτες σκέψεις για τον σχεδιασμό & την κατασκευή ενός τετράεδρου μικροφώνου ήταν η επιλογή της μικροφωνικής κάψας. Απαραίτητη ήταν η ύπαρξη μιας προενισχυτικής μονάδας για την ενίσχυση της στάθμης του σήματος από την κάψα και την αποκοπή πιθανών παρασιτικών θορύβων.

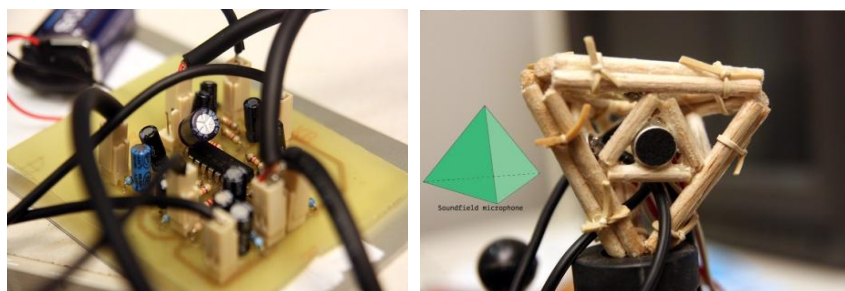
Σχετικά με την επιλογή της κάψας, έγινε με βάση τα θεωρητικά βασικά χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε για την κατασκευή ενός μικροφώνου ηχητικού πεδίου (soundfield), δηλαδή το πολικό διάγραμμα (καρδιοειδές) και την ευαισθησία για την "γενική" χρήση που επιδιώκεται στη ηχογράφηση ακουστικών πηγών σε χώρο.

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερις μικροφωνικές κάψες όπου είναι τοποθετημένες σε τετράεδρο σχηματισμό σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η κάψα που χρησιμοποιείται είναι electret unidirectional (cardioid) για γενική χρήση της Panasonic όπου  $V_s=1.5V$ ,  $RL=680\Omega$  [6].



Εικόνα 1.1 Αριστερά, οι διαστάσεις της κάθε πλευράς του τετράεδρου, δεξιά η μικροφωνική κάψα που χρησιμοποιείται.

Ο προενισχυτής αποτελείται από ένα T.E (τελεστικό ενισχυτή) τεσσάρων εισόδων-εξόδων το IC TLO74. Είναι κατάλληλος για δυναμικά και electret μικρόφωνα και βασίζεται στη σχεδίαση ενός μη αναστρέφων ενισχυτή [7], [8], [9].



Εικόνα 1.2 Αριστερά, η πλακέτα του προενισχυτή, δεξιά η τετράεδρη τοποθέτηση των μικροφωνικών καψών.

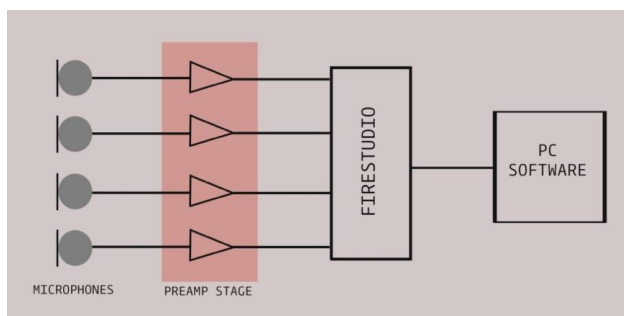
## 2. Εφαρμογές - αποτελέσματα

Στα πλαίσια ελέγχου λειτουργίας και βαθμονόμησης του μικροφωνικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν ηχογραφήσεις ροζ θορύβου (pink noise) [9].

Αρχικά έγινε έλεγχος στις μικροφωνικές κάμες σχετικά με τις θεωρητικές ιδιότητες του πολικού διαγράμματος που έχουν και την τετράεδρη τοποθέτησή τους. Οι τέσσερις ηχογραφήσεις από την ίδια μικροφωνική κάμα αλλά από διαφορετικό σημείο αναπαραγωγής του ροζ θορύβου μας δίνει την δυνατότητα ελέγχου των ιδιοτήτων τους σχετικά την τετράεδρη τοποθέτησή τους και την κατευθυντικότητα.

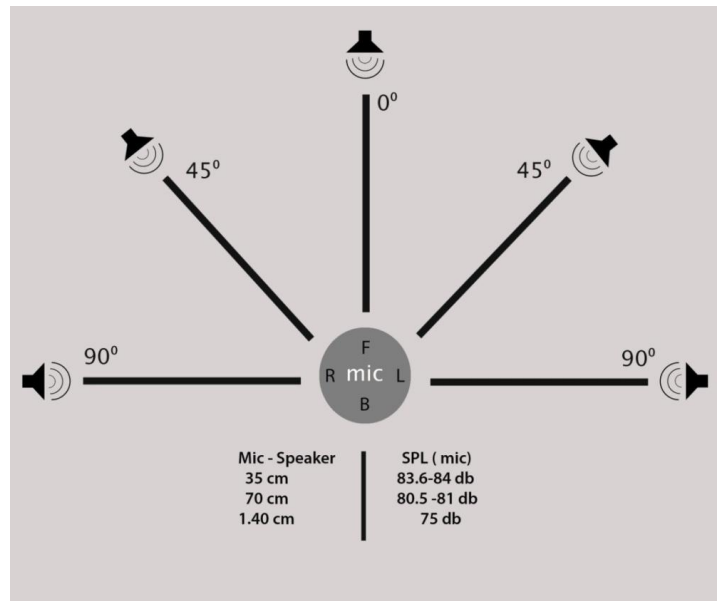
Ο έλεγχος λειτουργίας ολοκληρώθηκε με την ηχογράφηση της αναπαραγωγής ροζ θορύβου στο χώρο από ένα ηχείο σε απόσταση 1,5m περίπου από το μικροφωνικό σύστημα .

Ο σκοπός της μέτρησης αυτής, σε συνθήκες διάχυτου πεδίου, είναι η ισοστάθμιση των τεσσάρων καναλιών του προενισχυτή. Κατά αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε την ορθότητα του μετρούμενου μεγέθους (βαθμονόμηση).



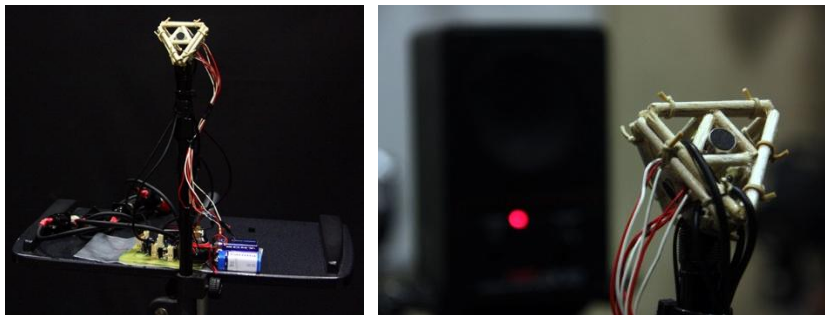
Εικόνα 2.1 Μπλοκ διάγραμμα της συνδεσμολογίας του κυκλώματος.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο, χωρίς την παρουσία ανακλώμενου ηχητικού πεδίου. Η στάθμη θορύβου του χώρου μετρήθηκε στα 33 dBA.



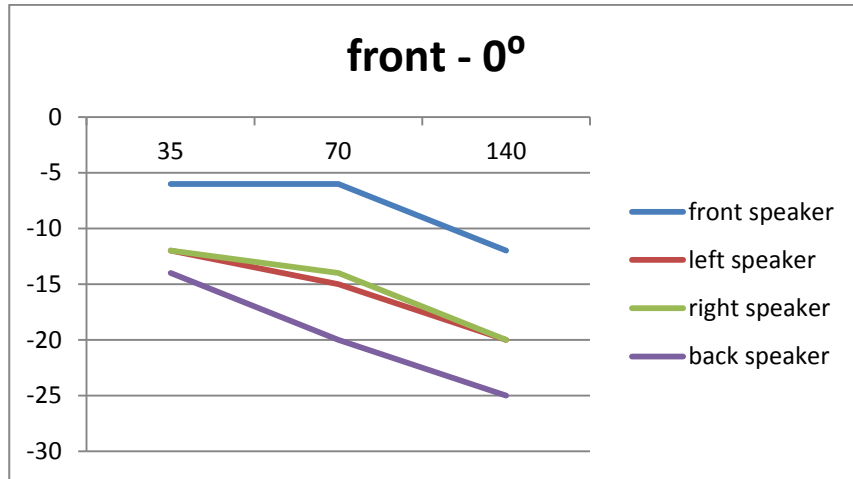
Εικόνα 2.2 Περιγραφή των πειραματικών μετρήσεων.

Ηχείο αναπαράγει ροζ θόρυβο αρχικά ακριβώς στην ευθεία ( $0^\circ$ ) με το μικρόφωνο. Στη συνέχεια έγιναν ηχογραφήσεις για τις  $45^\circ$  και τις  $90^\circ$ . Τα δείγματα του ροζ θορύβου που ηχογραφήθηκαν είναι διάρκειας 30 δευτερολέπτων. Επίσης έγιναν ηχογραφήσεις με το ηχείο σε 35cm απόσταση από το μικρόφωνο, στην συνέχεια τοποθετήθηκε στα 70cm από το μικρόφωνο και στα 140cm.



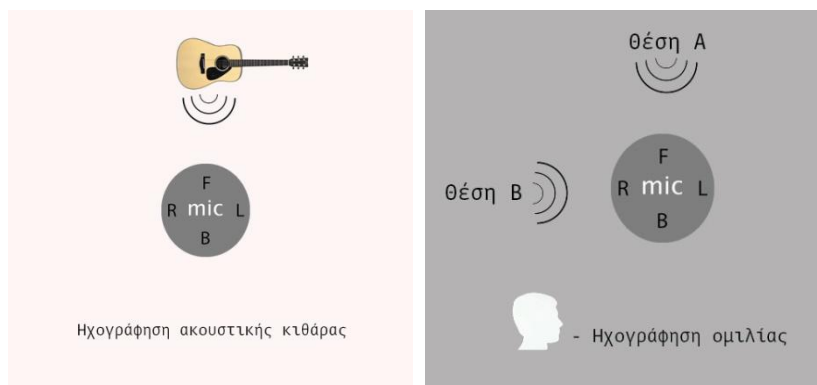
Εικόνα 2.3 Η εγκατάσταση του μικροφωνικού συστήματος κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

Κατά την διάρκεια των ηχογραφήσεων παρατηρείται σχεδόν ανάλογη πτώση της στάθμης σήματος με την αύξηση της απόστασης μικροφώνου και ηχείου. Το συγκεκριμένο στοιχείο είναι μια πληροφορία για την αξιολόγηση του χώρου σχετικά με τις ακουστικές συνθήκες ηχογράφησης.



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα ηχογράφησης ροζ θορύβου (y:db, x:cm) όπου το ηχείο είναι στην ευθεία από το μικρόφωνο (0°).

Εκτός από τις πειραματικές μετρήσεις δηλαδή τις πολυκαναλικές ηχογραφήσεις ροζ θορύβου που έγιναν για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του μικροφωνικού συστήματος, πραγματοποιήθηκαν ηχογραφήσεις ενός ακουστικού οργάνου (κιθάρα) και ηχογραφήσεις ομιλίας [10]. Η ένδειξη της "συμπεριφοράς" του μικροφωνικού συστήματος δηλαδή η συχνотική απόκριση του συστήματος σε αυτού του είδους ηχητικών πηγών είναι ο σκοπός των ηχογραφήσεων.



Εικόνα 2.4 Επεξηγηματικά σχέδια πολυκανάλων ηχογραφήσεων.

### 3. Συμπεράσματα

Σχετικά με την υλοποίηση της κατασκευής του μικροφωνικού συστήματος μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι παρόλο που δημιουργήθηκε με ηλεκτρονικά στοιχεία σχετικά χαμηλού κόστους το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό αφού πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία ο έλεγχος της λειτουργίας του και οι πειραματικές μετρήσεις. Άρα γενικότερα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κόστος μιας κατασκευής δεν είναι απαραίτητα ανάλογο του ποιοτικού αποτελέσματος. Βέβαια το μικροφωνικό σύστημα της παρούσας εργασίας δεν συγκρίνεται με το κόστος της τελικής σχεδίασης των προϊόντων που υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο. Τα ανθεκτικά υλικά που χρησιμοποιούνται από πολλούς κατασκευαστές ηλεκτροακουστικών διατάξεων για την ύπαρξη σκελετού ή κουτιού είναι ένας από τους λόγους της αύξησης του κόστους. Επίσης η έλλειψη θωράκισης του κυκλώματος του προενισχυτή κάνει πιο δύσκολη την εφαρμογή του καθώς υπάρχει η πιθανότητα να παρουσιαστεί παρασιτικός θόρυβος λόγω των "εκτεθειμένων" επαφών των ηλεκτρονικών στοιχείων.

Στις πειραματικές μετρήσεις παρατηρήθηκαν διαφορές στις στάθμες μεταξύ των τεσσάρων σημάτων και μπορούμε να αξιολογήσουμε τις μικροφωνικές κάψες σχετικά με τις κατευθυντικές τους ιδιότητες.

### 4. Αναφορές

- [1] Γ. Καλλίρης & Χ. Δημούλας, «Τεχνικές Στερεοφωνικής Ηχογράφησης & 3D ήχου», διδακτικές σημειώσεις για το μάθημα *Τεχνικές λήψης, επεξεργασίας και διαχείρισης ήχου*, Διαπανεπιστημιακό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Προηγμένα Συστήματα Υπολογιστών και Επικοινωνιών" (2008).
- [2] Χ. Α. Δημούλας, Γ. Μ. Καλλίρης, Γ. Β. Παπανικολάου, «Τεχνικές προσομοίωσης μικροφώνων ηχητικού πεδίου (soundfield microphones) και σχεδιασμού περιφερικού-τριδιάστατου ήχου στην παραγωγή οπτικο-ακουστικών έργων», πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου «Ακουστική 2008», σελ. 59-68 (2008).
- [3] Benjamin E. and Chen T, «The Native B-Format Microphone», in proceedings of the 119<sup>th</sup> AES Convention, Preprint 6621(2005).
- [4] John Eargle, *Handbook of Recording Engineering*, 4<sup>th</sup> Ed., Kluwer Academic Publishers (2003).
- [5] "Soundfield DSF-2 Broadcast Microphone System User Guide", (version 2.0), online: [http://www.tslproducts.com/wp-content/uploads/2013/05/dsf2\\_man.pdf](http://www.tslproducts.com/wp-content/uploads/2013/05/dsf2_man.pdf) (last access, 15/9/2014).
- [6] <http://na.industrial.panasonic.com> (last access, 15/9/2014).
- [7] [http://www.datasheetcatalog.com/info\\_redirect/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXvwqq.pdf.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/info_redirect/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXvwqq.pdf.shtml) (last access, 15/9/2014).
- [8] Γ. Μπάμνιος, «*Ηλεκτρονικά II*», διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης (1996).
- [9] Κ. Γκάλιος, «Κατασκευή μικροφώνου ηχητικού πεδίου (soundfield) & μετρήσεις ηχητικού εντοπισμού», *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία* (επιβλ.

Γ. Καλλίρης), Διαπανεπιστημιακό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Προηγμένα Συστήματα Υπολογιστών και Επικοινωνιών", *εργασία*: <http://www.lib.auth.gr/>, παρουσίαση: <http://kostasgalioswork.wordpress.com> (2014).

- [10] Κ. Γκάλιος, «Ηχογραφήσεις μικροφώνου ηχητικού πεδίου», online ηχητικό υλικό: <https://soundcloud.com/soundfield-recs> (last access, 15/9/2014).

# Ακουστική-Μηχανική Σύζευξη Πιεζοηλεκτρικών Στοιχείων Με Ακουστικά Πεδία

Χαράλαμπος Παπαδάκος  
Έρευνητής  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών,  
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504, Ρίο  
papadakos@upatras.gr

Ιωάννης Μουρτζόπουλος  
Καθηγητής  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών,  
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504, Ρίο  
mourjor@upatras.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία μελετάται ως προς τη δυνατότητα αυτών να παράγουν ηλεκτρική ισχύ από ακουστική ισχύ. Η μελέτη επικεντρώνεται στην επίδραση του πιεζοηλεκτρικού υλικού και της γεωμετρίας ενός τέτοιου στοιχείου στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ υπό άμεση ακουστική διέγερση, καθώς επίσης και στην αντίσταση του φορτίου προσαρμογής που απαιτείται για τη μεγιστοποίησή της. Η ανάλυση πραγματοποιείται για τις χαμηλές συχνότητες, θεωρώντας ότι το ακουστικό μέσο είναι ο αέρας και ότι το στοιχείο διεγείρεται κατά μήκος του άξονα πολικότητάς του. Αναδεικνύεται η αναποτελεσματικότητα της άμεσης σύζευξης για παραγωγή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ισχύος και προτείνεται μία νέα μέθοδος έμμεσης σύζευξης μέσω ενός ενδιάμεσου μηχανισμού για την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

## Acoustical-Mechanical coupling between piezoelectric elements and sound fields

### ABSTRACT

*Acoustical-mechanical coupling between piezoelectric elements and sound fields is studied with respect to the potential of such elements to generate electric power from acoustic power. The study focuses on the effect of the piezoelectric material and the geometry of such an element to the generated electric power under direct acoustic excitation, as well as on the matching load resistance required for maximizing such power. The analysis is realized for the low frequencies, assuming that the acoustic medium is air and the element is excited along*

*its poling axis. The ineffectiveness of direct coupling for generating useable electric power is highlighted and a novel coupling method through an intermediate mechanism for amplifying the generated electric power is proposed.*

## Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή μικρής κλίμακας ηλεκτρικής ισχύος από ακουστική ισχύ. Παράλληλα στο συγκεκριμένο χώρο, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κερδίζουν συνεχώς έδαφος [1]-[4]. Τέτοια στοιχεία είναι εγγενώς αδύνατο να παράγουν αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ισχύ υπό άμεση ακουστική διέγερση και γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η ακουστική-μηχανική σύζευξη τους με τα ακουστικά πεδία [5].

Στην Ενότητα 1 αυτής της εργασίας παρουσιάζονται επιμέρους πτυχές που αφορούν στην άμεση ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία. Ειδικότερα, εξετάζεται η επίδραση του υλικού και της γεωμετρίας τέτοιων στοιχείων στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, καθώς επίσης και το φορτίο προσαρμογής που απαιτείται για τη μεγιστοποίησή της. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, θεωρούμε ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο απλής γεωμετρίας, το οποίο διεγείρεται από το ακουστικό πεδίο κατά μήκος του άξονα πολικότητάς του. Στην Ενότητα 2 προτείνεται μία νέα μέθοδος για την ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία, μέσω της οποίας η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Στην Ενότητα 3 παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα.

### 1 Άμεση σύζευξη

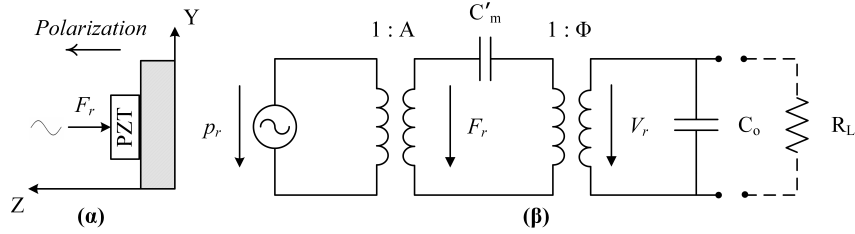
Για τη μελέτη που ακολουθεί, συμβολίζουμε την ενεργό τιμή της ακουστικής πίεσης στη θέση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου με  $p_r$  (Pa) και εστιάζουμε σε περιπτώσεις που το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο διεγείρεται κατά μήκος του άξονα πολικότητάς του. Επίσης, θεωρούμε ότι το ακουστικό μέσο είναι ο αέρας. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί μία πιεζοηλεκτρική πλάκα μικρού μεγέθους, η οποία είναι σταθερά τοποθετημένη σε έναν επίπεδο, άκαμπτο τοίχο και διεγείρεται άμεσα από το ακουστικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του πάχους της, όπως φαίνεται στο Σχ. 1 (α). Γι' αυτή την περίπτωση, στις χαμηλές συχνότητες και για ημιτονοειδή διέγερση, η σύζευξη του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου με το ακουστικό πεδίο αναπαρίσταται σε κύκλωμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1 (β).

Σε αυτό το κύκλωμα, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αντιπροσωπεύεται από τις χωρητικότητες  $C'_m$ ,  $C_o$  και το λόγο μετασχηματισμού  $\Phi$  [6], το ακουστικό πεδίο αναπαρίσταται σαν γεννήτρια πίεσης  $p_r$  και η ακουστική-μηχανική σύζευξη μεταξύ τους πραγματοποιείται μέσω της επιφάνειας  $A$  (m<sup>2</sup>) του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Γι' αυτό το κύκλωμα:

$$C'_m = s_{33}^E \frac{t_h}{A} \quad (m/N) \quad (1)$$

$$C_o = \varepsilon_{33}^T \frac{A}{t_h} - \frac{d_{33}^2}{C'_m} \quad (F) \quad (2)$$





Σχήμα 1. (α) Σχηματική αναπαράσταση μιας πιεζοηλεκτρικής πλάκας σταθερά τοποθετημένης σε επίπεδο, άκαμπτο τοίχο, η οποία διεγείρεται από το ακουστικό πεδίο κατά μήκος του άξονα πολικότητάς της, (β) κύκλωμα σύζευξης.

$$\Phi = -\frac{C'_m}{d_{33}} \quad (V/N) \quad (3)$$

όπου  $t_h$  (m) είναι το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου,  $d_{33}$  (C/N) η πιεζοηλεκτρική σταθερά,  $s_{33}^E$  ( $m^2/N$ ) η ενδοτικότητα υπό σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και  $\epsilon_{33}^T$  (F/m) η επιτρεπτότητα υπό σταθερή μηχανική τάση. Ο δείκτης 33 υποδεικνύει ότι το στοιχείο διεγείρεται κατά τη διεύθυνση τους πάχους του [6], [7].

Για να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ στην περίπτωση της άμεσης σύζευξης, θεωρούμε ένα αμιγώς ωμικό φορτίο  $R_L$  ( $\Omega$ ) συνδεδεμένο στους ακροδέκτες εξόδου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχ. 1(β). Από αυτό το κύκλωμα εξάγουμε την παραγόμενη ενεργό ηλεκτρική ισχύ σε φορτίο αντίστασης ως εξής,

$$P_L = \left| \frac{A\Phi/\sqrt{R_L}}{1 + \Phi^2 Z_M(Z_E + R_L)/(Z_E R_L)} p_r \right|^2 \quad (W) \quad (4)$$

όπου  $Z_M$  και  $Z_E$  αντιστοιχούν στην εμπέδηση της  $C'_m$  και της  $C_o$  αντίστοιχα.

### 1.1 Επίδραση πιεζοηλεκτρικού υλικού

Για να αξιολογήσουμε την εξ. (4), θεωρούμε αρχικά ένα σύνολο εμπορικών πιεζοηλεκτρικών υλικών, τα οποία εξετάζουμε ως προς τη δυνατότητά τους να παράγουν ηλεκτρική ισχύ υπό δεδομένη ακουστική διέγερση. Τα υλικά αυτά διακρίνονται σε μαλακά (855, PZT5H1, PIC151, Pz27, C5) και σκληρά (840, PZT401, PIC181, Pz28, C21) [8]-[12]. Τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται τυπικά σε εφαρμογές αισθητήρων, ενώ τα σκληρά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος.

Στο σημείο αυτό, υποθέτουμε ότι η πιεζοηλεκτρική πλάκα του Σχ. 1(α) έχει 2 cm ύψος  $h$ , 2 cm πλάτος  $w$  και 1 cm πάχος  $t_h$  και η ακουστική πίεση στην επιφάνειά της είναι 130 dB, η οποία αντιστοιχεί σε ενεργό τιμή 63.25 Pa. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανάλυση είναι εγχυρότερη στις χαμηλές συχνότητες, εξομοιώνουμε την εξ. (4) για όλα τα προηγούμενα υλικά. Στο Σχ. 2(α) φαίνεται ενδεικτικά το άνω (855) και το κάτω (PIC181) όριο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα εξεταζόμενα υλικά στη συχνότητα των 500 Hz, απ' όπου γίνεται φανερό ότι τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά υπερτερούν έναντι των σκληρών στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος υπό ακουστική διέγερση. Ωστόσο, ακόμη και υπό εξαιρετικά

ισχυρή ακουστική διέγερση όπως αυτή που θεωρήθηκε, ένα τέτοιο στοιχείο άμεσα συζευγμένο με το ακουστικό πεδίο μπορεί να παράγει ηλεκτρική ισχύ μόλις μερικά δέκατα του nW, ανεξαρτήτως του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο.

### 1.2 Επίδραση γεωμετρίας

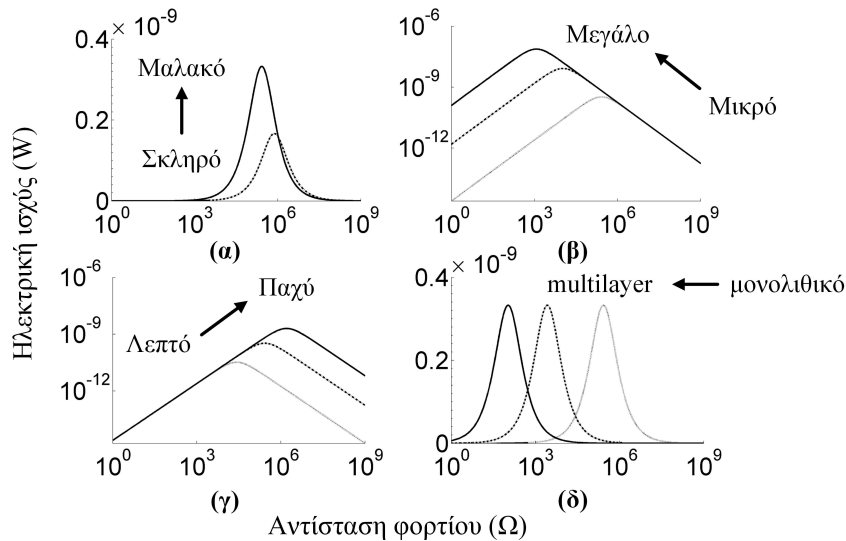
Θεωρούμε εκ νέου τώρα την πιεζοηλεκτρική πλάκα του Σχ. 1(α) και εξετάζουμε την επίδραση της γεωμετρίας του στοιχείου στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Με βάση όσα προέκυψαν νωρίτερα, θεωρούμε εδώ ότι η πιεζοηλεκτρική πλάκα είναι κατασκευασμένη από το μαλακό πιεζοηλεκτρικό υλικό 855. Για το συγκεκριμένο υλικό και για τις ίδιες συνθήκες διέγερσης (130 dB, 500 Hz), εξομοιώνουμε την εξ. (4) για διαφορετικό εμβαδό επιφάνειας ( $4 \text{ cm}^2$ ,  $100 \text{ cm}^2$ ,  $900 \text{ cm}^2$ ) και σταθερό πάχος στοιχείου (1 cm), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β) και για διαφορετικό πάχος (1 mm, 1 cm, 6 cm) και σταθερή επιφάνεια στοιχείου ( $4 \text{ cm}^2$ ), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(γ).

Από τα παραπάνω σχήματα γίνεται φανερό ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται σημαντικότερα στην περίπτωση που μεγεθύνεται η επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, παρά στην περίπτωση που αυξάνεται το πάχος του. Πιο συγκεκριμένα, για σταθερό πάχος (1 cm), μεγεθύνοντας την επιφάνεια του στοιχείου από  $4 \text{ cm}^2$  σε  $900 \text{ cm}^2$ , η παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται από 0.33 nW σε 74.8 nW αντίστοιχα (βλ. Σχ. 2(β)), ενώ για σταθερή επιφάνεια ( $4 \text{ cm}^2$ ), αυξάνοντας το πάχος του στοιχείου από 1 mm σε 6 cm, η παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται από 33 pW σε 2 nW αντίστοιχα (βλ. Σχ. 2(γ)).

Δεδομένου ότι οι παραπάνω διαστάσεις για το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι ενδεικτικές και οι μεγαλύτερες εξ' αυτών δεν υποστηρίζονται στην πράξη, γίνεται αντιληπτό ότι η άμεση σύζευξη τέτοιων στοιχείων με το ακουστικό πεδίο δεν είναι αποτελεσματική για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από ακουστική ισχύ.

### 1.3 Επίδραση φορτίου προσαρμογής

Από τις προηγούμενες εξομοιώσεις, διαπιστώνεται επιπλέον ότι για ρεαλιστικές διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου απαιτείται πολύ υψηλό φορτίο προσαρμογής για την επίτευξη μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα, για στοιχείο επιφάνειας  $4 \text{ cm}^2$  και πάχος 1 cm απαιτούνται  $0.26 \text{ M}\Omega$  για την παραγωγή 0.33 nW. Στην πράξη, το απαιτούμενο φορτίο προσαρμογής μπορεί να μειωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας στοιχεία με πολλαπλές επιστρώσεις (multilayers) αντί για μονολιθικά, όπως είναι προτιμότερο σε πρακτικές εφαρμογές μεταφοράς και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας [13]. Στο Σχ. 2(δ) φαίνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (βλ. εξ. (4)) για τις ίδιες συνθήκες διέγερσης (130 dB, 500 Hz), θεωρώντας στοιχείο επιφάνειας  $4 \text{ cm}^2$  και πάχους 1 cm, για την περίπτωση που αυτό είναι μονολιθικό και για την περίπτωση που αποτελείται από 10 και 50 επιστρώσεις αντίστοιχα. Δεδομένου ότι για τις συγκεκριμένες εξομοιώσεις το συνολικό πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι σταθερό (1 cm), γίνεται φανερό ότι τα στοιχεία με πολλαπλές επιστρώσεις μειώνουν σημαντικά το απαιτούμενο φορτίο προσαρμογής, χωρίς να επηρεάζουν την παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, από το Σχ. 2(δ), ένα στοιχείο με 10 επιστρώσεις θα απαιτούσε  $2.6 \text{ K}\Omega$ , ενώ ένα στοιχείο με 50 επιστρώσεις  $105 \Omega$ , για να



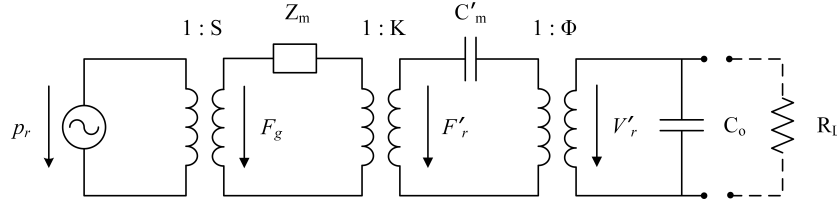
Σχήμα 2. (α) Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αντίστασης φορτίου για διαφορετικό πιεζοηλεκτρικό υλικό, (β) παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αντίστασης φορτίου για σταθερό πάχος και διαφορετική επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, (γ) παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αντίστασης φορτίου για σταθερή επιφάνεια και διαφορετικό πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, (δ) παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αντίστασης φορτίου για μονολιθικό στοιχείο και στοιχείο με πολλαπλές επιστρώσεις, (500 Hz, 130 dB).

παράγουν την ίδια μέγιστη ηλεκτρική ισχύ συγκριτικά με το μονολιθικό στοιχείο που απαιτεί 0.26 M $\Omega$ .

## 2 Προτεινόμενη μέθοδος σύζευξης

Από την προηγούμενη ενότητα έγινε φανερό ότι η άμεση σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και ακουστικών πεδίων δεν είναι αποτελεσματική για την παραγωγή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ισχύος υπό ακουστική διέγερση. Αυτό συμβαίνει εγγενώς, διότι πέρα από τους πρακτικούς περιορισμούς στις διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, το ακουστικό πεδίο ασκεί ασθενείς δυνάμεις σε επιφάνειες ρεαλιστικού μεγέθους και η εμπέδηση του αέρα διαφέρει σημαντικά από εκείνη του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Ως εκ τούτου, για να καταστεί εφικτή η παραγωγή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ισχύος από ακουστική ισχύ, είναι απαραίτητη η ενίσχυση της δύναμης που ασκείται στην επιφάνεια τέτοιων στοιχείων και η βελτίωση της προσαρμογής της εμπέδησης του αέρα σε εκείνη του πιεζοηλεκτρικού υλικού [5].

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος για την ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία, η οποία πραγματοποιείται μέσω ενός ενδιάμεσου μηχανισμού που εισάγει ένα μηχανικό πλεονέ-



Σχήμα 3. Τροποποιημένο κύκλωμα σύζευξης σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο.

κτημα και λειτουργεί σαν μετασχηματιστής εμπέδησης [5]. Για την πιεζοηλεκτρική πλάκα του Σχ. 1(α), το κύκλωμα σύζευξης του Σχ. 1(β) τροποποιείται σε αυτή την περίπτωση όπως στο Σχ. 3. Σε αυτό το σχήμα, με  $S$  ( $m^2$ ) συμβολίζεται η επιφάνεια του μηχανισμού, με  $Z_m$  η μηχανική εμπέδησή του, η οποία αναλύεται περαιτέρω σε μία ενδοτικότητα  $C_S$  ( $m/N$ ), σε μία μηχανική αντίσταση  $R_S$  ( $Ns/m$ ) και σε μία μάζα  $m$  ( $Kg$ ) και με  $K$  ο λόγος μηχανικού-μηχανικού μετασχηματισμού. Για σταθερή διέγερση, από τα Σχ. 1(β), (3) προκύπτει ότι στην περίπτωση έμμεσης σύζευξης η δύναμη στην επιφάνεια του στοιχείου αυξάνεται κατά

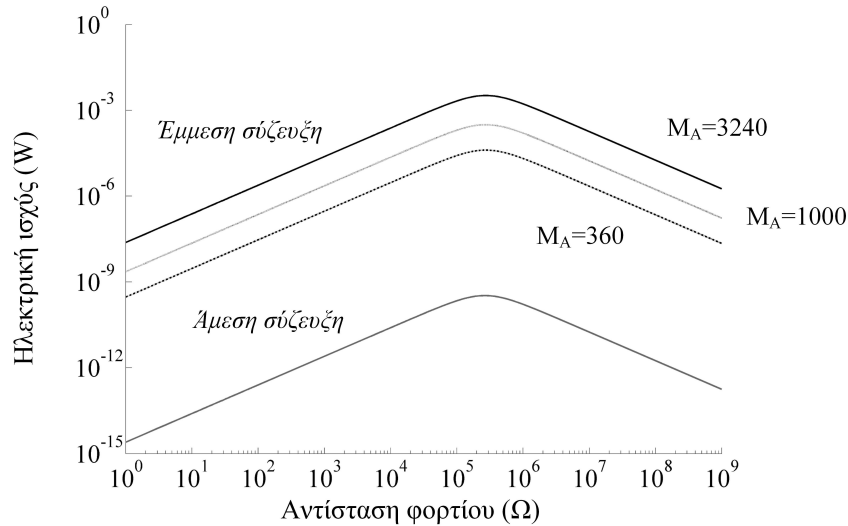
$$M_A = K \frac{S}{A} \quad (5)$$

όπου  $M_A$  ορίζεται εδώ το συνολικό μηχανικό πλεονέκτημα που εισάγει ο προτεινόμενος μηχανισμός έμμεσης ακουστικής-μηχανικής σύζευξης, το οποίο είναι παράλληλα ένα πλεονέκτημα πίεσης από τη στιγμή που τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα και άρα ένα πλεονέκτημα στάθμης ηχητικής πίεσης ίσο με  $20 \log M_A$ . Αυτό το πλεονέκτημα στην ακουστική πίεση μπορεί να γεφυρώσει μια διαφορά στην εμπέδηση ίση με  $M_A^2$ .

Για την περίπτωση της έμμεσης σύζευξης η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εξ. (4) τροποποιείται ως εξής,

$$P'_L = \left| \frac{M_A A \Phi / \sqrt{R_L}}{1 + \Phi^2 (K^2 Z_m + Z_M) (Z_E + R_L) / (Z_E R_L)} p_r \right|^2 \quad (W) \quad (6)$$

Για την αξιολόγηση της εξ. (6) θεωρούμε ίδιες συνθήκες διέγερσης με την προηγούμενη ενότητα (130 dB, 500 Hz). Θεωρούμε επίσης, ότι η πιεζοηλεκτρική πλάκα του Σχ. 1(α) είναι κατασκευασμένη από το υλικό 855 και έχει μέγεθος  $2 \text{ cm}$  ( $h$ )  $\times$   $2 \text{ cm}$  ( $w$ )  $\times$   $1 \text{ cm}$  ( $t_h$ ). Εξομοιώνουμε τώρα την εξ. (6) για διαφορετικές τιμές του μηχανικού πλεονεκτήματος και τυπικές τιμές της ενδοτικότητας ( $C_S = 10^{-6} \text{ m/N}$ ), της αντίστασης ( $R_S = 1 \text{ Ns/m}$ ) και της μάζας ( $m = 1.5 \times 10^{-3} \text{ Kg}$ ) του μηχανισμού, όπως φαίνεται στο Σχ. 4. Από αυτό το σχήμα, γίνεται φανερό ότι με την προτεινόμενη μέθοδο η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, από 0.33 nW στην περίπτωση της άμεσης σύζευξης, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξάνεται στα 40.5  $\mu\text{W}$  για  $M_A = 360$ , στα 0.31 mW για  $M_A = 1000$  και στα 3.3 mW για  $M_A = 3240$ . Ωστόσο, πρέπει σημειωθεί ότι μεγαλύτερες τιμές μηχανικού πλεονεκτήματος συνεπάγονται διαστάσεις του μηχανισμού (βλ. εξ. (5)), οι οποίες ενδέχεται να είναι απαγορευτικές σε πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα 4. Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς συναρτήσει της αντίστασης φορτίου για την περίπτωση της άμεσης σύζευξης και για την περίπτωση της έμμεσης σύζευξης σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο για διαφορετικές τιμές μηχανικού πλεονεκτήματος (500 Hz, 130 dB).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω, αξίζει να σημειωθεί ενδεικτικά ότι για  $M_A = 360$  (π.χ.  $K = 10$  και  $S = 36A$ , βλ. εξ. (5)), ο μηχανισμός αυξάνει τη στάθμη ηχητικής πίεσης στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου περίπου κατά 51 dB ( $= 20 \log 360$ ) και βελτιώνει την προσαρμογή της εμπέδησης του αέρα σε εκείνη του στοιχείου περίπου κατά  $13 \times 10^4 (= 360^2)$ .

### 3 Συμπεράσματα

Από την ανάλυση που προηγήθηκε για ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε σχήμα πλάκας, το οποίο θεωρήθηκε τοποθετημένο σε επίπεδο άκαμπτο τοίχο και ότι διεγείρεται άμεσα από το ακουστικό πεδίο κατά μήκος του άξονα πολικότητάς του, προέκυψε ότι για ρεαλιστικές διαστάσεις στοιχείου, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς περιορίζεται σε μερικά δέκατα του  $\mu W$  για στάθμη ηχητικής πίεσης 130 dB, ανεξαρτήτως του πιεζοηλεκτρικού υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι τα μαλακά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι καταλληλότερα από τα σκληρά για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος υπό ακουστική διέγερση. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας του στοιχείου στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και προέκυψε ότι αυτή αυξάνει σημαντικότερα μεγεθύνοντας την επιφάνεια του στοιχείου παρά αυξάνοντας το πάχος αυτού. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι για ρεαλιστικές διαστάσεις στοιχείου, το απαιτούμενο φορτίο προσαρμογής για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι εξαιρετικά υψηλό και δείχτηκε ότι αυτό μπορεί να μειωθεί σημαντικά χρησιμοποιώντας στοιχεία με πολλαπλές επιστρώσεις αντί για μονολιθικά, χωρίς να επηρεάζεται η

μέγιστη ηλεκτρική ισχύς.

Με βάση τα παραπάνω προέκυψε ότι η άμεση ακουστική-μηχανική σύζευξη πιεζοηλεκτρικών στοιχείων με ακουστικά πεδία δεν είναι αποτελεσματική για παραγωγή αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ισχύος υπό ακουστική διέγερση. Σε αυτά τα πλαίσια, προτάθηκε μία νέα μέθοδος ακουστικής-μηχανικής σύζευξης μέσω ενός ενδιάμεσου μηχανισμού που αυξάνει σημαντικά την δύναμη που ασκείται στην επιφάνεια του στοιχείου και βελτιώνει αισθητά την προσαρμογή της εμπέδησης του αέρα σε εκείνη του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Εξομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν γι' αυτή την περίπτωση, έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος επιτυγχάνει σημαντική αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος έως την τάξη του mW.

## Ευχαριστίες

Η έρευνα αυτή συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου, ΕΚΤ, και από Ελληνικούς εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς, ΕΣΠΑ 2007-2013. Χρηματοδοτούμενο ερευνητικό πρόγραμμα: Θαλής-Πανεπιστήμιο Αθηνών-Ερασιτέχνης, MIS: 375435.

## Αναφορές

- [1] S.B. Horowitz, M. Sheplak, L. N. Cattafesta and T. Nishida «A MEMS acoustic energy harvester» *J. Micromech. Microeng.* 16, pp 174–181 (2006).
- [2] F. Liu, A. Phipps, Stephen Horowitz, L. Cattafesta, T. Nishida and M. Sheplak «Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator» *J. Acoust. Soc. Am.* 123, pp 1983–1990 (2008).
- [3] S. Sherrit «The Physical Acoustics of Energy Harvesting» in *Proc. 2008 IEEE Ultrasonics Symposium* 59, pp 1046–1055.
- [4] B. Li, A. J. Laviage, J. H. You, Y.-J. Kim «Harvesting low-frequency acoustic energy using quarter-wavelength straight-tube acoustic resonator» *Applied Acoustics* 74, pp 1271–1278 (2013).
- [5] Ch. Papadakos and J. Mourjopoulos «Improving acoustical-mechanical coupling for acoustic energy harvesting» submitted for publication *J. Acoust. Soc. Am.* (2014).
- [6] M. Rossi *Acoustics and Electroacoustics* Artech House, Norwood (1988).
- [7] *IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Std 176-1987* (1987).
- [8] <https://www.americanpiezo.com/>
- [9] <http://www.morganelectroceramics.com/>
- [10] <http://piceramic.com/company.html>
- [11] <http://www.ferroperm-piezo.com/>
- [12] [http://www.fujicera.co.jp/index\\_e.html](http://www.fujicera.co.jp/index_e.html)
- [13] S. R. Platt, S. Farritor and Hani Haider «On Low Frequency Electric Power Generation With PZT Ceramics» *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics* 10, pp 240-252 (2005).

# ***Educational Examples in Structural Acoustics Using the Finite Element Method***

Nikolaos Tsagarakis<sup>a</sup> & Spyros Kouzoupis<sup>b</sup>

Department of Music Technology and Acoustics Technological Educational Institute of Crete

<sup>a</sup>[nikolaos.tsag@gmail.com](mailto:nikolaos.tsag@gmail.com), <sup>b</sup>[skouzo@staff.teicrete.gr](mailto:skouzo@staff.teicrete.gr)

## **ABSTRACT**

*This paper presents educational examples mainly in structural acoustics, using theoretical, numerical and experimental methods. Numerical results are obtained via the Finite Element Method. A series of dynamic problems including beams and plates, in two and three dimensions are modeled and solved. Numerical solutions, natural frequencies and mode shapes of the examined systems are also obtained and compared with the analytical results and with experimental values.*

## ***Εκπαιδευτικά παραδείγματα δομικής ακουστικής με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων***

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στο παρόν άρθρο γίνεται ανάλυση και παρουσίαση εκπαιδευτικών παραδειγμάτων κυρίως πάνω στη δομική ακουστική, με θεωρητικές, αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους. Οι αριθμητικές μέθοδοι υλοποιούνται με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Μοντελοποιούνται και λύνονται παραδείγματα δυναμικών προβλημάτων που αφορούν ράβδους και πλάκες σε 2 και 3 διαστάσεις. Παρουσιάζονται οι θεωρητικές λύσεις, οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές που χαρακτηρίζουν τα συστήματα και συγκρίνονται με αριθμητικά αποτελέσματα και με αποτελέσματα μετρήσεων.*

## 1. Introduction

In this paper we develop a series of examples using the Finite Element Method [8], with the purpose of providing students with a visual representation of vibrating modes and nodal lines, so that they can get better insight of vibration theory of simple and more complicated systems. In the presented cases, actual experimental data complement the numerically solved problems.

## 2. Eigenfrequency Analysis of a Cantilever Beam

### 2.1. FEM Process

In this example, a steel beam having one end clamped and the other free, is modeled in three dimensions using the COMSOL Multiphysics® [3] commercial software. The results are compared to those derived from theoretical models as well as from experiment. Interestingly enough, the differences observed are not limited only to frequency deviation, but on the diversity of vibration modes, as well.

**Geometry:** In *Solid Mechanics 3D Interface* [2], a *Block* of *Width*=0.5 m, *Depth*=0.035 m, and *Height*=0.0035 m is created from the *Geometry* node. In an eigenfrequency study, the material of the structure is extremely essential. From the *material library*, *Structural steel* is selected, with material properties: *Young's modulus*,  $E=190$  GPa, *Poisson's ratio*,  $\nu=0.33$ , and *Mass density*,  $\rho_L=8000$  kg/m<sup>2</sup>.

**Constraints:** The bar is clamped at one end while the other is free, therefore *Point 1* is selected to be a *Fixed Constraint*.

**Loads:** In an *eigenfrequency* analysis, loads and forces are not taken into consideration [4].

**Mesh:** A *Free Tetrahedral mesh* is defined (Fig. 2.1), with 0.005 m *Maximum element size*, which yields: Number of vertex elements: 8, Number of edge elements: 616, Number of boundary elements: 8114, Number of elements: 20592.

**Study:** The *eigenfrequency* module is used. A *search for eigenfrequencies* around 10 Hz is performed for better accuracy while the *Number of degrees of freedom*, is 107646.

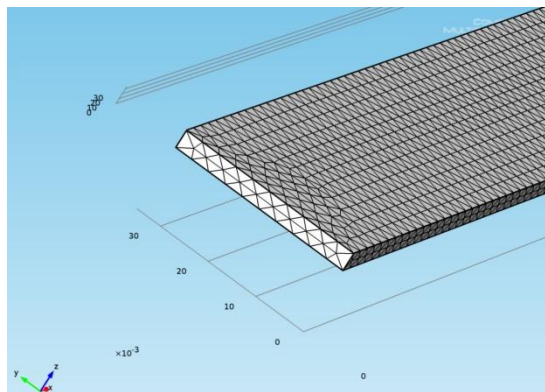


Figure 2.1. Partial view of a free tetrahedral mesh in a three-dimensional structure.



## 2.2. FEM Results

Figures 2.2 through 2.4 depict the 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> mode shapes of the cantilever beam as calculated with *Solid Mechanics 3D Module*. Table 2.1 below, lists the frequency values of the first 6 modes.

Table 2.1: Numerically calculated eigenfrequencies for a fixed-free beam

Mode Number	COMSOL 3D Solid Mechanics Module (Hz)
1	11.09
2	69.44
3	109.95
4	194.45
5	293.67
6	381.18

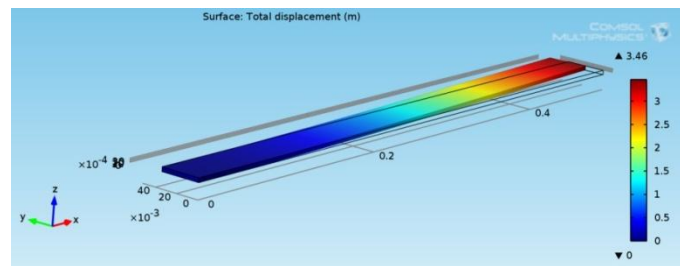


Figure 2.2. Sideways moving mode. The frequency is 109.95 Hz.

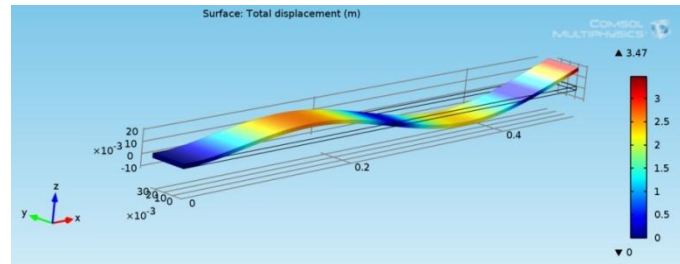


Figure 2.3. Transverse mode. The frequency is 194.45 Hz.

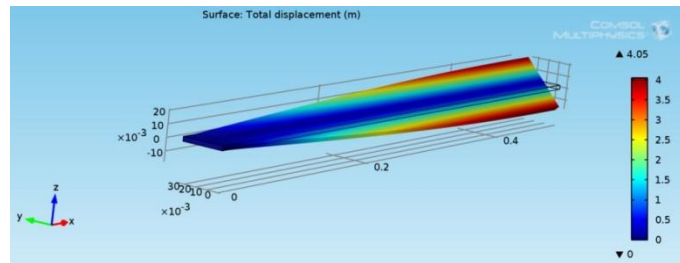


Figure 2.4. Torsional mode. The frequency is 293.67 Hz.

### 2.3. Experimental Frequency Response of a Cantilever Beam

In this Section, an experimental frequency response study of the clamped-free steel bar, is undertaken through impulse excitation [7]. The bar is excited by an impact hammer. Special attention is given to the first natural frequencies, which are then compared (Section 2.4), with the theoretical and numerical results.

*Geometry:* The beam is clamped at one end, in such a way as to be exactly 0.5 m in length. The beam's width is 0.035 m, while its thickness is 0.0035 m.

*Equipment:* The equipment used for the experimental procedure is the following: Desktop PC (*Intel(R), Pentium(R) D Processor*, CPU 3.40 GHz, 2.00 GB of RAM, Operation System *Windows XP*); Amplifier and signal conditioner, *PCB PIEZOTRONICS<sup>INC.</sup> Model 482A16*; Force Transducer/Impact Hammer, *Briel & Kjaer*, Type 8203; PCI Data acquisition card, *MEASUREMENT COMPUTING DaqBoard/3000 Series*; Acquisition card hardware interface, *MEASUREMENT COMPUTING DBK215 16-Connector BNC*; Accelerometer *PCB PIEZOTRONICS<sup>INC.</sup> Model 352B10*; *DaqView<sup>®</sup>* software application for data logging and analysis, and *MATLAB<sup>®</sup>* software for postprocess analysis.

*Acquisition process:* First, the acquisition cards, the conditioner and the accelerometer must be calibrated [1]; In other case studies where the modes' amplitudes are important, the impact hammer should also be calibrated. The next step is to determine the exact placing position of the accelerometer, in order to have a good reading for some modes (especially the torsional and sideways moving modes) [8]. The same applies to the exact location of the impact force excitation on the test structure. Figure 2.5 gives a perspective view of the setup configuration and also indicates the input and output signals.

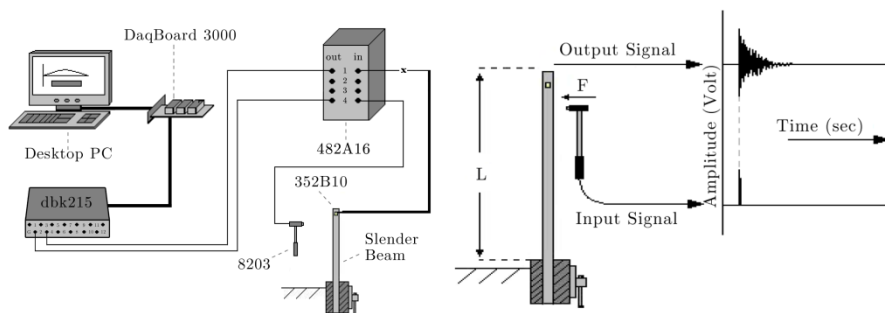


Figure 2.5. Testing setup (Left). Visualization of the testing procedure (Right).

#### 2.4. Experimental Results

Figure 2.6 depicts the output signal in both time and frequency domains. Table 2.2 lists the first derived eigenfrequencies of the beam. Note that the third mode is in fact the first torsional mode, [8]. In some cases, more than one accelerometer is needed in order to ensure proper measurements, especially when the amplitude of some modes are very low compared to others.

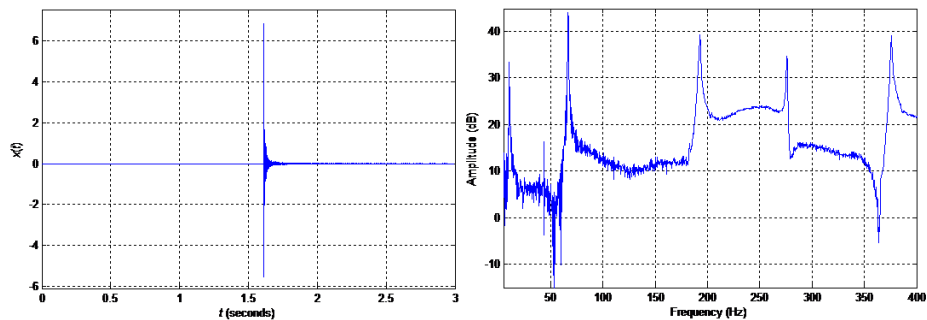


Figure 2.6. Typical response signal to an impact excitation (left). Corresponding frequency response of the cantilever beam in the range up to 400 Hz (right).

Table 2.2. Experimentally derived natural frequencies of the cantilever beam.

Mode Number	Frequency (Hz)
1	10.33
2	67.00
3	-
4	185.00
5	274.30
6	376.00

In Table 2.3, a comparison is performed between the theoretically derived, numerically calculated and experimentally extracted frequency values for different modes.

Table 2.3. Frequency comparison for a beam of fixed-free boundary conditions.

Transverse Modes	Torsional Modes	Analytical Solution (Hz)	COMSOL (Hz)	Experimental (Hz)
1	-	11.03	11.08	10.33
2	-	69.05	69.44	66.00
-	A	-	109.95	-
3	-	193.36	194.45	185.00
Transverse	Torsional	Analytical	COMSOL	Experimental

Modes	Modes	Solution (Hz)	(Hz)	(Hz)
-	B	-	293.67	274.30
4	-	378.99	381.18	376.00

### 3. Eigenfrequency Analysis of a Free Plate

#### 3.1. FEM Process

In this example, the first vibrating modes for a free rectangular brass plate are calculated using the Finite Element Method, and their nodal patterns are presented and compared with Waller's [9] experimental results.

*Geometry:* In *Plate 2D Interface*, a *rectangle* with sides  $a=1$  m and  $b=0.5$  m is created from the *Geometry* node; these are arbitrary values chosen in order to obtain the  $a/b=2$  ratio needed. In the *Plate* node, the *thickness* of the plate selected is  $d=0.01$  m. Furthermore, *Copper* was selected as the material from the *material library*, having the following properties: *Young's modulus*,  $E=110$  GPa, *Poisson's ratio*,  $\nu=0.35$ , and *Mass density*,  $\rho_L=8700$  kg/m<sup>3</sup>.

*Constraints:* No constraints were applied, because here the plate is free.

*Loads:* Once again, in an *eigenfrequency* analysis, loads are not needed [4].

*Mesh:* A *Free Tetrahedral mesh* is used (Fig. 3.1), with  $0.02$  m *Maximum element size*, which gives: Number of vertex elements, 4, Number of boundary elements, 150, Number of elements, 3150.

*Study:* The *eigenfrequency* module is used for finding out the natural frequencies and their corresponding mode shapes. The *Number of degrees of freedom* used, was: 38706.

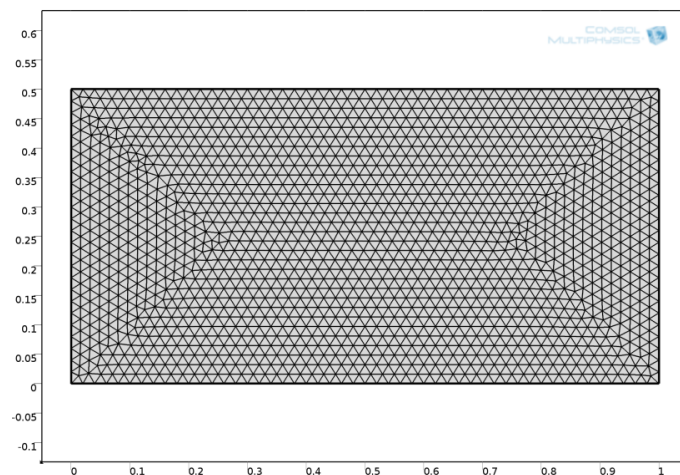


Figure 3.1. Free triangular mesh of 3150 elements.

### 3.2. FEM Results

Figure 3.2 shows experimentally derived [9] and numerically calculated nodal patterns, respectively, while Figure 3.3 illustrates two selected mode shapes.

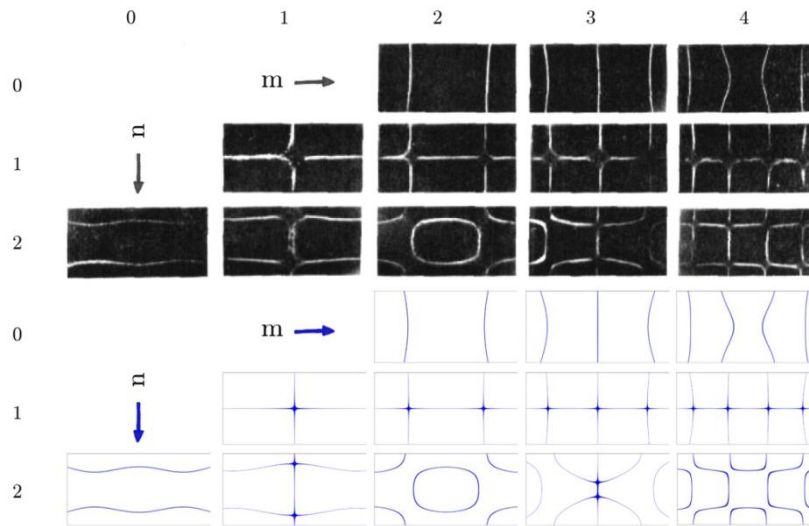


Figure 3.2. Experimentally observed (top) and FEM calculated (bottom) nodal patterns for a completely free brass plate with  $a/b=2$ .

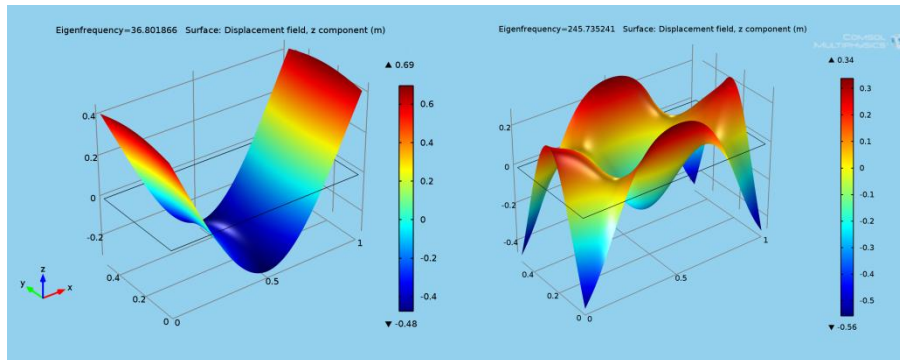


Figure 3.3. Mode shape of the 1st (left) and the 9th (right) vibration pattern of a completely free rectangular brass plate, corresponding to  $(m,n)=(2,0)$  and  $(m,n)=(2,2)$  above, respectively.

#### 4. Concluding Remarks

This paper illustrated that the Finite Element Method is a useful tool for presenting educational examples in structural acoustics in a powerful way. Visualization of various vibrating modes and nodal lines of simple and more complicated systems through FEM analysis can complement the interpretation of data acquired in experiments involving vibration testing. All the modes presented, can also be animated to enhance the educational experience.

#### 5. References

- [1] Accelerometer 352B10: *Installation and operating manual*. PCB PIEZOTRONICS<sup>INC</sup>.
- [2] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>: *Introduction to Structural Mechanics Module*. Version 4.4, November 2013
- [3] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>: *Introduction to COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>*. Version 4.3, January 2013.
- [4] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>: *Structural Mechanics Module User's Guide*. Version 4.4, November 2013
- [5] DaqBoard/3000 Series: *User's manual*. IOtech Inc. 2005.
- [6] DaqView & ViewXL: *User's guide*. P/N 457-0909 Rev. 8.3.
- [7] Ginsberg, Jerry H.: *Mechanical and Structural Vibrations*. John Wiley & Sons, 2001.
- [8] Tsagarakis, Nikolaos: *Educational Examples in Structural Acoustics using the Finite Element Method*. Senior Thesis, Department of Music Technology and Acoustics (TEI of Crete), Jun. 2014.
- [9] Waller, Mary D.: *Vibrations of Free Square Plates*. Proc. Phys. Soc. (London), vol. 51, Jan. 1939, pp. 831-844.

***Προσομοίωση χαμηλόσυχνου ηχητικού πεδίου σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους, παραγόμενου από σύνθετες πηγές προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας, με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων***

Χρήστος Σεβαστιάδης<sup>a</sup>, Μάριος Γιουβανάκης<sup>b</sup> & Γεώργιος Παπανικολάου<sup>c</sup>

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Η/Υ

<sup>a</sup> [csevast@auth.gr](mailto:csevast@auth.gr), <sup>b</sup> [mgiouvan@auth.gr](mailto:mgiouvan@auth.gr), <sup>c</sup> [pap@eng.auth.gr](mailto:pap@eng.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η μελέτη πραγματεύεται τη δημιουργία χαμηλόσυχνου ηχητικού πεδίου από σύνθετες πηγές, αποτελούμενες από πηγές ζεύγους ή δίπολες πηγές σε διάφορες διατάξεις. Με κατάλληλο συνδυασμό διάταξης, διαφοράς φάσης και πλάτους έντασης μεταξύ τους, η κατευθυντικότητα του ηχητικού πεδίου είναι προσαρμοζόμενη. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με αναλυτική μέθοδο καθώς και με αριθμητική, την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Ο σκοπός της μελέτης είναι η αντιμετώπιση προβλημάτων θορύβου στο χαμηλόσυχο ακουστό φάσμα.*

***Low-frequency sound field simulations in open and closed space, created by adaptive directivity compound sound sources, using finite element method***

## **ABSTRACT**

*Low-frequency sound field creation from compound sources, consisted of pair sources or dipolar sources in different set-ups, is studied in this paper. With the appropriate set-up combination, difference in phase and amplitude among them, the directivity of the sound field is adaptive. Simulations were made using both analytical method and an arithmetical one, the Finite Element Method. This work aims to facing noise problems in the low-frequency audible spectrum.*

## Εισαγωγή

Το χαμηλόσυχο ηχητικό πεδίο σε μικρούς κλειστούς χώρους, λόγω διακριτών και έντονων συντονισμών, διέπεται από έντονη ανομοιομορφία στη συχνότητα, το χώρο και το χρόνο. Στην περίπτωση της ακρόασης ηχητικού προγράμματος προκαλείται η αίσθηση του έντονου παραμορφωτικού χρωματισμού του. Η μείωση της ανομοιομορφίας αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα της Ακουστικής και μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εφαρμογή τεχνικών παθητικού ή και ενεργού ελέγχου.

Στην περίπτωση της εργασίας μέσα σε θορυβώδες περιβάλλον προκαλείται κόπωση και μείωση των αντιληπτικών ικανοτήτων του ανθρώπου. Η εξάλειψη του θορύβου αποτελεί και αυτή ιδιαίτερο πρόβλημα της Ακουστικής. Οι συνθήκες του θορύβου σε χαμηλόσυχο ηχητικό πεδίο εντός μικρών κλειστών χώρων παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με την περίπτωση της ακρόασης ηχητικού προγράμματος. Κατά συνέπεια, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές παθητικού ή και ενεργού ελέγχου με σκοπό την εξάλειψη του θορύβου. Όμως, λόγω των συνθηκών, αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης πρόκλησης του θορύβου, συνήθως ο παθητικός έλεγχος δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθεί, με αποτέλεσμα την επικέντρωση της έρευνας προς τις τεχνικές του ενεργού ελέγχου.

Ο ενεργός έλεγχος θορύβου (Active Noise Control/Cancellation, ANC), υλοποιεί την αρχή της καταστρεπτικής παρεμβολής (destructive interference) για την αντιμετώπισή του, με την υπέρθεση στο πεδίο του θορύβου ενός πεδίου «αντι-θορύβου», το οποίο είναι ανάλογο του πρώτου [1]. Οι περιοχές ενδιαφέροντος εφαρμογής του ANC είναι τα ενεργά ακουστικά κεφαλής, οι αγωγοί εξαερισμού και κλιματισμού, οι εξατμίσεις μηχανών, καμπίνες αεροπλάνων και πλοίων κ.α.

Πλέον, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του χαμηλόσυχου ηχητικού πεδίου, το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει αυξηθεί για τις τεχνικές που χρησιμοποιούν σύνθετες πηγές εκπομπής ήχου, με τις οποίες, καθώς οδηγούνται με περισσότερα του ενός σήματα, είναι δυνατός ο έλεγχος της κατευθυντικότητας τους και η προσαρμογή της στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε κλειστού χώρου.

Οι σύνθετες πηγές [2] προσαρμοζόμενης κατευθυντικότητας ή πηγές ταχύτητας (gradient loudspeakers) [3] αποτελούνται από συνδυασμό δύο ή περισσότερων σημειακών πηγών. Η κατευθυντικότητα της σύνθετης πηγής εξαρτάται από την τοπολογία των επιμέρους στοιχείων, το επίπεδο ηχητικής πίεσης μεταξύ τους, καθώς και τη διαφοράς φάσης τους. Στην πραγματικότητα, η κατευθυντικότητα ενός συνδυασμού συμβατικών πηγών εξαρτάται από την κυματική παρεμβολή τους στον χώρο. Η εκπεμπόμενη επιφάνεια πρέπει να είναι συγκρίσιμη του μήκους κύματος. Έτσι, οι διαστάσεις μιας τέτοιας πηγής θα ήταν πολύ μεγάλες στο χαμηλόσυχο πεδίο. Αντιθέτως, οι σύνθετες πηγές είναι μικρές συγκριτικά με το μήκος κύματος.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να μελετήσει την παραπάνω τεχνική. Θεωρήσαμε ότι στις χαμηλές συχνότητες ένα τυπικό ηλεκτροδυναμικό μεγάφωνο σε κλειστό ηχείο συμπεριφέρεται περίπου ως μια σημειακή πηγή. Ο συνδυασμός των σημειακών πηγών σε ζεύγη και η οδήγηση τους με σήματα σε αντίφαση συγκροτεί κατά προσέγγιση μία δίπολη πηγή. Οι συνδυασμοί των δίπολων πηγών σε διάφορες τοπολογίες συγκροτούν τις εν λόγω σύνθετες πηγές. Η ξεχωριστή οδήγηση του κάθε δίπολου, αλλά και κάθε επιμέρους πόλου, δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και προσαρμογής της κατευθυντικότητας της σύνθετης πηγής.

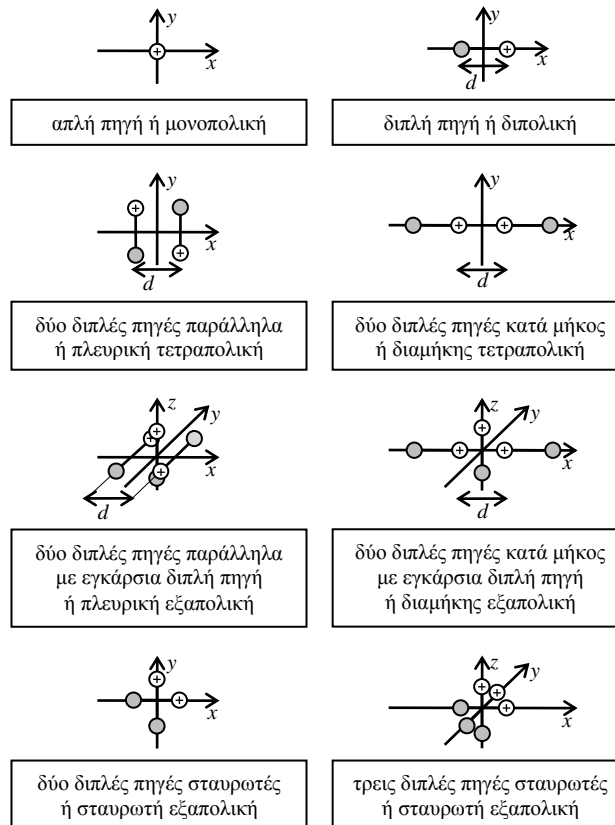


## 1. Διπολικές και σύνθετες πηγές

Η απλούστερη στοιχειώδης πηγή μπορεί να θεωρηθεί η *σημειακή* (point), ή *απλή* (simple) ή *μονοπολική* (monopole). Μια απλή πηγή μπορεί να προσεγγιστεί στις χαμηλές συχνότητες με ένα ανοιχτό μεγάφωνο απευθείας ακτινοβολίας σε κλειστό ηχείο [4]. Οι διαστάσεις του μεγάφωνου και του ηχείου θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ήχου, δηλαδή να πληρείται η συνθήκη  $ka \ll 1$  όπου  $k$  είναι ο κυματαριθμός του κύματος και  $a$  η χαρακτηριστική διάσταση της πηγής [5].

Οι σύνθετες πηγές συγκροτούνται συνδυάζοντας στοιχειώδεις πηγές. Μία *διπλή πηγή* (doublet) ή *διπολική* (dipole) συγκροτείται από δύο απλές που απέχουν μεταξύ τους μια πολύ μικρή απόσταση  $d$  και εκπέμπουν σε αντίθετη φάση. Οι συνθήκες εκπομπής για το μακρινό πεδίο είναι  $d \ll \lambda$ ,  $d \ll r$  και  $r^2 \ll \lambda^2/36$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος και  $r$  η απόσταση παρατήρησης [5]. Αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή συχνοτήτων του ενδιαφέροντός μας, δηλαδή κάτω των 140Hz, όσο πλησιάζουμε προς την πηγή και μειώνεται η συχνότητα του εκπεμπόμενου ήχου, τόσο προσεγγίζουμε το κοντινό της πεδίο.

Θεωρώντας ως στοιχειώδη τη διπολική πηγή, είναι δυνατόν να συγκροτηθούν

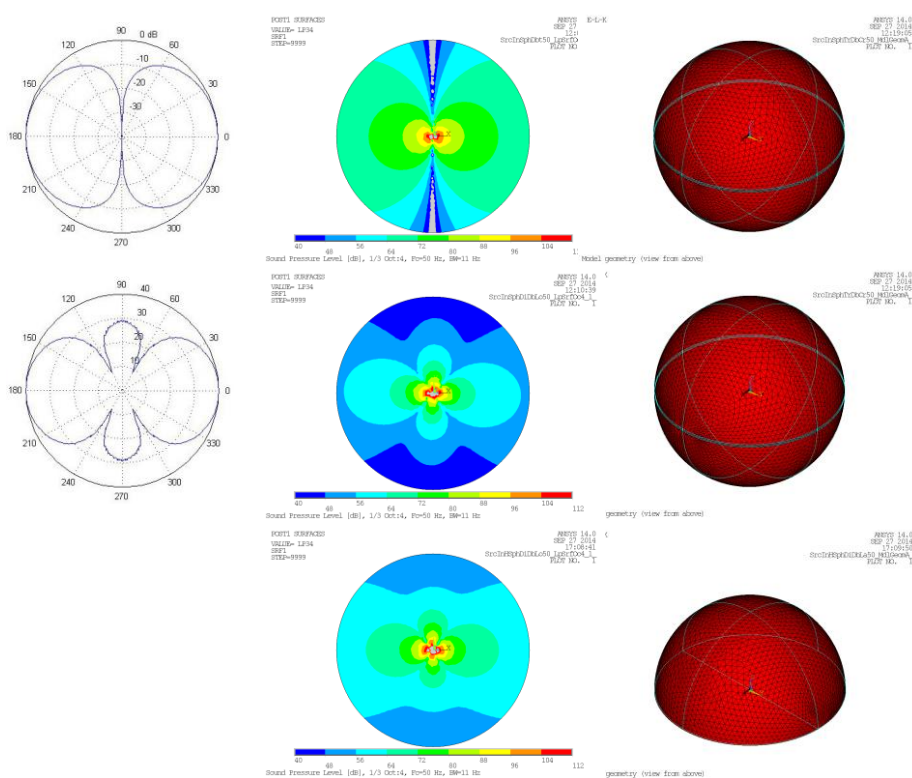


Σχήμα 1.1 Τοπολογίες και ονοματολογία σύνθετων πηγών.

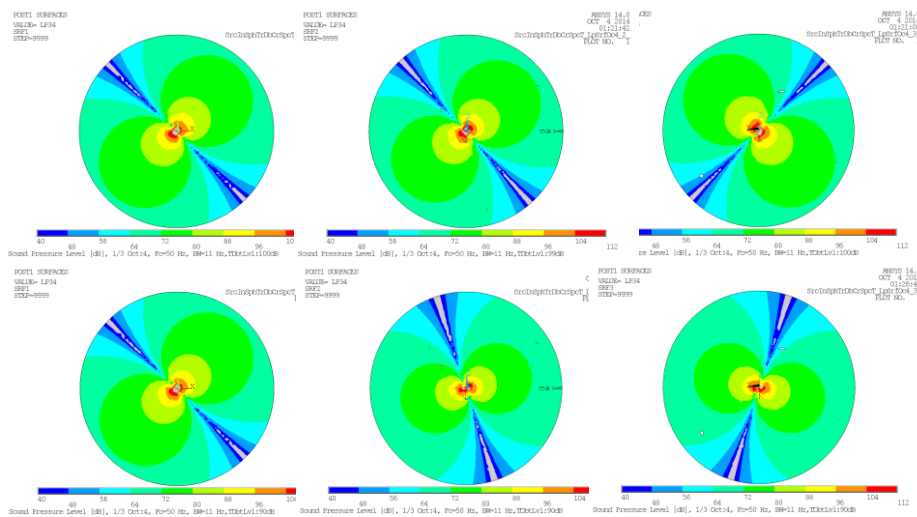
άλλες σύνθετες πηγές με ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Στην παρούσα εργασία συγκροτήθηκαν και μελετήθηκαν μία σειρά από σύνθετες πηγές, συνήθεις [6] και προτεινόμενες, όπως περιγράφονται στο Σχήμα 1.1. Στις προτεινόμενες ανήκουν όλες οι εξαπολικές πηγές, μαζί με την σταυρωτή τετραπολική. Οι εξαπολικές πηγές προκύψανε με την προσθήκη μίας επιπλέον εγκάρσιας διπολικής πηγής στις αντίστοιχες τετραπολικές. Τέλος, η σταυρωτή τετραπολική, μπορεί να θεωρηθεί ως παραλλαγή της συνήθους πλευρικής τετραπολικής, με τη διαφορά στο διαφορετικό συνδυασμό ελέγχου των επιμέρους διπολικών πηγών της.

## 2. Ανάλυση και προσομοίωση των πηγών

Στη μελέτη προσομοιώθηκαν οι σύνθετες πηγές σε ανοιχτό πεδίο, σε ανοιχτό πεδίο επί δαπέδου και τέλος σε ένα τυπικό παραλληλεπίπεδο κλειστό χώρο. Στην περίπτωση του ανοιχτού πεδίου εφαρμόστηκαν η αναλυτική μέθοδος [7] και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων [8]. Η απόσταση  $d$  που εφαρμόστηκε σε όλες τις περιπτώσεις ήταν 0,125 m, ενώ όλα τα αποτελέσματα αφορούν στη



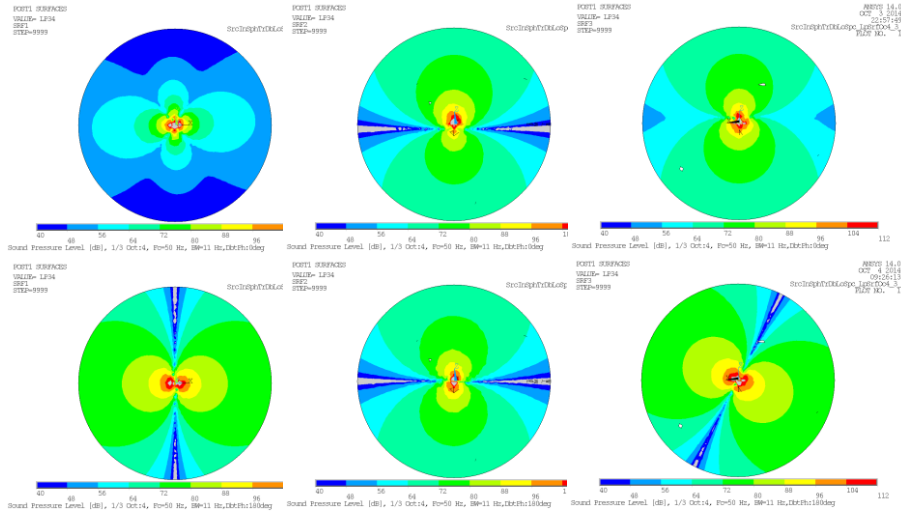
Σχήμα 2.1 Αποτελέσματα αναλυτικής μεθόδου (1<sup>η</sup> στήλη), με πολικά διαγράμματα κατευθυντικότητας στα 50Hz (μακρινό πεδίο) για την πηγή ζεύγους (1<sup>η</sup> σειρά) και τη διαμήκη τετραπολική (2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> σειρά). Αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων στην ίδια συχνότητα και τις ίδιες πηγές (2<sup>η</sup> στήλη) σε αντίστοιχα μοντέλα (3<sup>η</sup> στήλη), με αποτύπωση της στάθμης (SPL, dB) του ελεύθερου (1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά) και του ημιελεύθερου (3<sup>η</sup> σειρά) ηχητικού πεδίου, σε δίσκο διαμέτρου 9m.



*Σχήμα 2.2 Αποτελέσματα αποτύπωσης ηχητικής στάθμης (dB) ελεύθερου πεδίου για σταυρωτή εξαπολική πηγή, στα επίπεδα XY, YZ, ZX, στην 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> στήλη αντίστοιχα. Στη δεύτερη σειρά οι ίδιες αποτυπώσεις εφαρμόζοντας στην εγκάρσια διπολική διαφορά στάθμης κατά 10dB σε σχέση με τις άλλες δύο.*

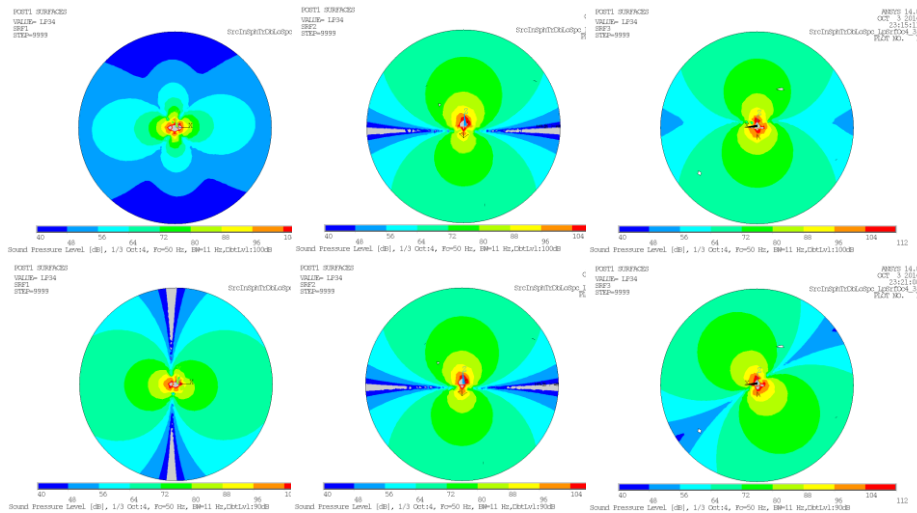
συχρότητα των 50Hz. Επιλεγμένα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Είναι χαρακτηριστικό ότι η διαμήκης τετραπολική πηγή παράγει ηχητικό πεδίο χαμηλότερης στάθμης σε σχέση με τη διπολική. Επίσης, η τοποθέτηση της σύνθετης πηγής επί ανακλαστικού διαπέδου (ημιελεύθερο πεδίο) οδηγεί, πέραν της αύξησης της ηχητικής στάθμης, και σε αλλοίωση της κατευθυντικότητάς της σε σχέση με αυτή που έχει σε ελεύθερο πεδίο.

Σε δεύτερη φάση, μελετήθηκε, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η συμπεριφορά των πηγών σε ανοιχτό πεδίο κατά τη μεταβολή των παραμέτρων διέγερσης των διαφόρων διπολικών πηγών που τις συγκροτούν. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μεταβολής της διαφοράς στάθμης της μίας διπολικής σε σχέση με τις άλλες δύο, στη σταυρωτή εξαπολική πηγή. Όταν η μεταβολή εφαρμόζεται στην εγκάρσια διπολική πηγή, οι λοβοί της στρέφονται στα κατακόρυφα επίπεδα YZ και ZX, ενώ στο οριζόντιο επίπεδο XY το πεδίο δε μεταβάλλεται. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε διαμήκη εξαπολική πηγή, μεταβάλλοντας τη διαφορά φάσης στη μία διπολική πηγή επί του οριζόντιου επιπέδου XY. Η συγκεκριμένη μεταβολή στο επίπεδο XY μεταβάλλει τη μορφή του πεδίου και τη στάθμη του, στο επίπεδο YZ αφήνει αμετάβλητο το πεδίο, ενώ στο επίπεδο ZX περιστρέφει τους λοβούς της πηγής. Τέλος, στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής της στάθμης στη μία οριζόντια διπολική πηγή που ανήκει σε μια διαμήκη εξαπολική πηγή. Στο οριζόντιο επίπεδο XY μεταβάλλεται το σχήμα και η στάθμη του πεδίου, στο κατακόρυφο επίπεδο YZ το πεδίο δε μεταβάλλεται, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο ZX οι λοβοί στρέφονται.

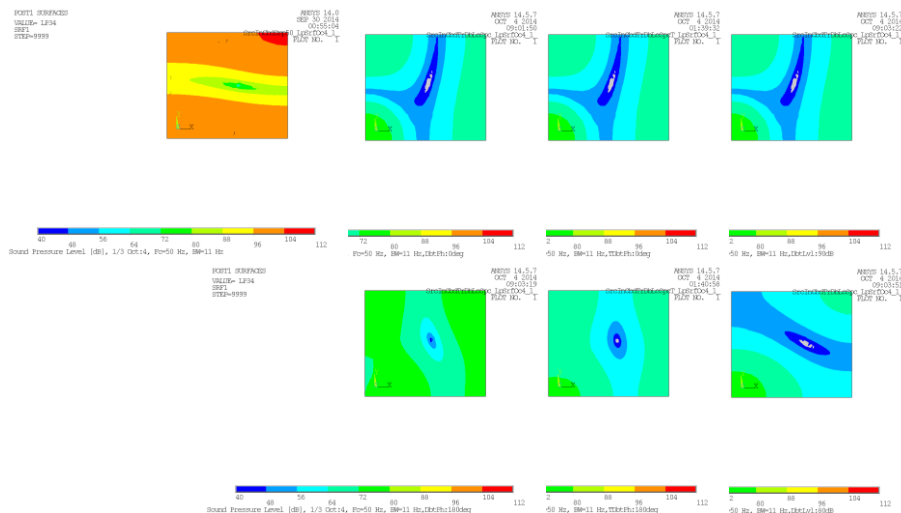


Σχήμα 2.3 Αποτελέσματα αποτύπωσης ηχητικής στάθμης (dB) ελεύθερου πεδίου για διαμήκη εξαπολική πηγή, στα επίπεδα XY, YZ, ZX, στην 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> στήλη αντίστοιχα. Στη δεύτερη σειρά, παρουσιάζονται οι ίδιες αποτυπώσεις εφαρμόζοντας διαφορά φάσης 180 μοίρες στη μία οριζόντια διπολική πηγή.

Στην τελευταία φάση, οι πηγές μελετήθηκαν μέσα σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο χώρο, διαστάσεων (x, y, z) =(4m, 3,5m, 2,8m), πλήρως ανακλαστικό. Δοκιμάστηκαν όλες οι πηγές όπως στην προηγούμενη φάση τοποθετούμενες στη μία γωνία τού χώρου, σε απόσταση 0,5m από κάθε τοίχο. Ο



Σχήμα 2.4 Αποτελέσματα αποτύπωσης ηχητικής στάθμης (dB) ελεύθερου πεδίου για διαμήκη εξαπολική πηγή, στα επίπεδα XY, YZ, ZX, στην 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> στήλη αντίστοιχα. Στη δεύτερη σειρά, παρουσιάζονται οι ίδιες αποτυπώσεις εφαρμόζοντας διαφορά στάθμης 10 dB στη μία οριζόντια διπολική πηγή.



Σχήμα 2.5 Αποτυπώσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης (dB) σε οριζόντιο επίπεδο ύψους 1,2m από το δάπεδο, σε ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο χώρο  $(x,y,z)=(4m,3,5m,2,8m)$ . Στην 1<sup>η</sup> στήλη ο χώρος διεγείρεται στη μία γωνία από σημειακή πηγή. Στις υπόλοιπες στήλες διεγείρεται με διαμήκη εξαπολική πηγή. Στην 1<sup>η</sup> σειρά είναι η αρχική κατάσταση ενώ στη 2<sup>η</sup> η μεταβολή: της διαφοράς φάσης κατά 180 μοίρες της μίας από τις οριζόντιες διπολικές πηγές (2<sup>η</sup> στήλη), της ίδιας διαφοράς φάσης στην εγκάρσια διπολική πηγή (3<sup>η</sup> στήλη) και της στάθμης της μίας από τις οριζόντιες διπολικές πηγές κατά 10dB (4<sup>η</sup> στήλη).

συγκεκριμένος χώρος παρουσιάζει το δεύτερο ρυθμό συντονισμού του περί της συχνότητας των 49Hz και κατά συνέπεια όλες οι πηγές διεγείρουν το συγκεκριμένο ρυθμό. Η περίπτωση της σημειακής πηγής αποδίδει την αποτύπωση του ρυθμικού ηχητικού πεδίου στην πρώτη στήλη του Σχήματος 2.5. Από όλες τις δοκιμές, οι περιπτώσεις πηγών που προκάλεσαν ουσιαστική μεταβολή του ρυθμικού πεδίου του χώρου, ήταν η διαμήκης, εξαπόλική και λιγότερο η διαμήκης τετραπολική. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη διαμήκη εξαπολική πηγή με μεταβολές επί της διαφοράς φάσης και της διαφοράς στάθμης της μίας από τις οριζόντιες διπολικές πηγές και επί της διαφοράς στάθμης της εγκάρσιας διπολικής πηγής.

### 3. Συμπεράσματα

Δοκιμάστηκαν οι συνήθεις σύνθετες πηγές (πλευρική και διαμήκης τετραπολική), καθώς και άλλες πηγές είτε με διαφορετική τοπολογία (σταυρωτή τετραπολική), είτε με περισσότερες διπολικές πηγές (πλευρική, διαμήκης και σταυρωτή εξαπολική). Μελετώντας τη μορφή των μεταβολών των διαφόρων πηγών σε συνδυασμό με τις μεταβολές του αντίστοιχου ρυθμικού πεδίου του χώρου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι πηγές με στενό λοβό εκπομπής είναι αποδοτικότερες. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν σημαντικότερες μεταβολές του ρυθμικού πεδίου μέσω της μεταβολής της μορφή των στενών λοβών εκπομπής σε σχέση με τη δυνατότητα περιστροφής ευρειών λοβών. Από τις πηγές που

μελετήθηκαν, τη βολικότερη συμπεριφορά για τον έλεγχο του ηχητικού πεδίου σε κλειστό χώρο την εμφάνισαν οι διαμήκεις πηγές, περισσότερο η εξαπολική και λιγότερο η τετραπολική. Κατά συνέπεια, η μελέτη επιπλέον σύνθετων πηγών με στενή κατευθυντικότητα είναι επιβεβλημένη. Επιπλέον, θα πρέπει να διερευνηθεί ο συνδυασμός της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και τεχνικών βελτιστοποίησης, με στόχο τον έλεγχο του ρυθμικού ηχητικού πεδίου σε συγκεκριμένες περιοχές κλειστών χώρων.

Η παρούσα εργασία εντάσσεται σε μια προσπάθεια εφαρμογής των σύνθετων ηχητικών πηγών στον ενεργό έλεγχο του χαμηλόσυχνου θορύβου σε μικρούς κλειστούς χώρους. Τα αποτελέσματα της μελέτης αναδεικνύουν τις δυνατότητες και τα όρια της τεχνικής που χρησιμοποιεί τις συγκεκριμένες πηγές, ενώ υποδεικνύουν μία κατεύθυνση ως προς είδος των σύνθετων πηγών.

#### **4. Αναφορές**

- [1] P. Lueg «Process of Silencing Sound Oscillations» US Patent 2043416, June 9 (1936).
- [2] W. Chen, H. Pu, X. Qiu «A compound secondary source for active noise radiation control» *Appl. Acoust.* **71**, 101–106 (2010).
- [3] H. F. Olson «Gradient Loudspeakers» *J. Audio Eng. Soc.* **21**, pp 86-93 (1973).
- [4] Γ. Παπανικολάου *Ηλεκτρακουστική* University Studio Press, σελ. 162-165 (2005).
- [5] L. L. Beranek *Acoustics* Acoustical Society of America, New York, pp 91-101 (1996)
- [6] H. Kuttruff *Acoustics, An introduction* Taylor & Francis, Oxon, pp 79-81 (2007).
- [7] D. A. Russell, J. P. Titlow, Y.-J. Bommen «Acoustic monopoles, dipoles, and quadrupoles: An experiment revisited» *Am. J. Phys* **67**, pp 660-664 (1999).
- [8] Χ. Σεβαστιάδης Ανάλυση και βελτίωση της ακουστικής κλειστών χώρων κάτω από τη συχνότητα Schroeder με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων Διδακτορική Εργασία Α.Π.Θ., 41-55 (2011).

# **Μελέτη απόκρισης χαμηλών συχνοτήτων σε χώρους μέσω συστήματος πολλαπλών subwoofer**

Γαβριήλ Καμάρης<sup>a</sup>, Θεόδωρος Αλτάνης<sup>b</sup> & Ιωάννης Μουρτζόπουλος<sup>c</sup>

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Παν/μιου Πατρών

<sup>a</sup>[gpkamaris@upatras.gr](mailto:gpkamaris@upatras.gr), <sup>b</sup>[theoaltanis@upatras.gr](mailto:theoaltanis@upatras.gr), <sup>c</sup>[mourjop@upatras.gr](mailto:mourjop@upatras.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία παρουσιάζεται μελέτη εξομοίωσης για την βελτίωση της συχνοτικής και χωρικής ανομοιογένειας στην αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων σε κλειστούς χώρους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός πρωτότυπου συστήματος που συνδυάζει 3 μικρά subwoofer, το καθένα από τα οποία αναπαράγει ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, λειτουργώντας ως συντονιστής με χρήση μεγάφωνων με διαφορετικές και ελεγχόμενες συχνότητες μηχανικού συντονισμού. Όπως έχει δειχθεί σε παλαιότερη εργασία των συγγραφέων [3], ένα τέτοιο συνδυασμένο σύστημα 3 συντονιστών μπορεί να επιτύχει ικανοποιητική κάλυψη στη συνολική περιοχή χαμηλών συχνοτήτων των subwoofer. Η λειτουργία του συστήματος των 3 συντονιστών χαμηλών συχνοτήτων θα συγκριθεί μέσω της μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών Χρονικού Πεδίου (Finite-Difference Time-Domain, FDTD [4]) στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, σε σχέση με την εξομοιωμένη απόκριση ενός συμβατικού subwoofer. Για το προτεινόμενο σύστημα, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα βελτίωσης της χωρο-συχνοτικής ανομοιογένειας της απόκρισης μέσω κατάλληλης ρύθμισης των επιμέρους ηχείων.

## ***A study for the low-frequency response of a multiple subwoofer system within rooms***

### **ABSTRACT**

The work presents a simulation study for the reduction of spatial and spectral variance of reproduced sound within enclosures. This is achieved through a novel system which combines 3 small subwoofers, each one reproducing a narrow frequency range, functioning in effect as a resonator implemented via speakers having different tuned mechanical parameters. As it was shown in an earlier work by the authors [3], such a system can sufficiently cover the low-frequency range of a typical subwoofer. The performance of the 3 speaker system will be examined here with the acoustic response via the Finite-Difference Time-Domain, FDTD method [4] at the low-frequency region by comparing it to that of a typical subwoofer. For the proposed system, results will be presented indicating an improvement in the

spatial and spectral variations, via the appropriate tuning of the individual speaker properties.

## 1. Εισαγωγή

Η ακουστική απόκριση κλειστών χώρων μικρού και μεσαίου μεγέθους στις πολύ χαμηλές συχνότητες συνήθως καθορίζεται από στάσιμα κύματα τα οποία δημιουργούν μεγάλες διακυμάνσεις της παραγόμενης ηχητικής στάθμης μεταξύ διαφορετικών θέσεων ακρόασης. Αυτό γιατί οι κοιλίες του στάσιμου κύματος φέρουν μόνιμα μέγιστη (rms) ενέργεια, ενώ οι δεσμοί βρίσκονται μόνιμα σε εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή στάθμη. Όταν ένας ακροατής βρίσκεται σε σημείο δεσμού, αντιλαμβάνεται υποβαθμισμένη τη στάθμη των συχνοτήτων ενός ήχου, οι οποίες συμπίπτουν με τις συχνότητες συντονισμού του χώρου. Το αντίθετο συμβαίνει, όταν ο ακροατής βρίσκεται σε σημείο κοιλίας. Αυτή η συμπεριφορά είναι ανεπιθύμητη, διότι επιβάλλει εξαιρετική ακουστική ανομοιογένεια ιδιαίτερα σε «μικρούς» κλειστούς χώρους και ελαχιστοποιεί τις δυνατότητες βελτιστοποίησης της ομοιογενούς ηχητικής αναπαραγωγής μέσω ηχείων χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer). Η διόρθωση της απόκρισης αυτής μέσω ψηφιακών φίλτρων τα οποία θα ισοσταθμίζουν την ισχυρή αυτή συχνοτική ανομοιογένεια δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη αφού αυτή η προσέγγιση δεν θα μπορεί να επιτύχει την επιθυμητή διόρθωση σε όλα τα σημεία του χώρου ακρόασης. Επιπλέον η ανάγκη ισχυρής ενίσχυσης στενών συχνοτικών ζωνών που δημιουργούνται λόγω ακυρώσεων σε περιοχές κοιλίας των συντονισμών, θα δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα οδήγησης των μεγαφώνων και του υπόλοιπου συστήματος ηχητικής αναπαραγωγής.

Η σχετική βιβλιογραφία για βελτίωση της απόκρισης σε πολύ χαμηλές συχνότητες όπου συνήθως αναπαράγονται μέσω subwoofer (τυπικά από 20 Hz – 200 Hz), συγκλίνει σε τεχνικές με πολλαπλά ηχεία που να ελαχιστοποιούν τη χωρική και συχνοτική ανομοιογένεια των ακουστικών συντονισμών των κλειστών χώρων [1]. Οι τεχνικές όμως αυτές απαιτούν τοποθέτηση πολλαπλών συστημάτων ηχείων subwoofer τα οποία συνήθως έχουν μεγάλες διαστάσεις (και κόστος), έτσι ώστε η εφαρμογή τους να γίνεται απαγορευτική για εφαρμογές στους συνήθεις οικιακούς χώρους.

Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί μελέτη εξομοίωσης για την βελτίωση της συχνοτικής και χωρικής ανομοιογένειας κατά την αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων, μέσω ενός πρωτότυπου συστήματος 3 ανεξάρτητων μικρών subwoofer που το καθένα αναπαράγει ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, λειτουργώντας ως συντονιστής με χρήση μεγαφώνων τα οποία εμφανίζουν διαφορετικές και ελεγχόμενες συχνότητες μηχανικού συντονισμού (σύστημα “low BL”, [2]). Όπως έχει δειχθεί σε παλαιότερη εργασία των συγγραφέων [3], ένα τέτοιο συνδυασμένο σύστημα μπορεί να επιτύχει ικανοποιητική απόκριση στη συνολική περιοχή χαμηλών συχνοτήτων που καλύπτεται από τα συνηθισμένα subwoofer. Στην παρούσα εργασία, η λειτουργία του συστήματος αυτού των 3 low-BL συντονιστών χαμηλών συχνοτήτων θα μελετηθεί σε σχέση με την ακουστική απόκριση σε κλειστούς χώρους. Συγκεκριμένα, η μελέτη της χωρο-συχνοτικής απόκρισης τέτοιων χώρων θα υλοποιηθεί μέσω της μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών Χρονικού Πεδίου (Finite-Difference Time-Domain, FDTD [4]). Θα γίνει σύγκριση χώρου που θα διεγείρεται στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων είτε μέσω της

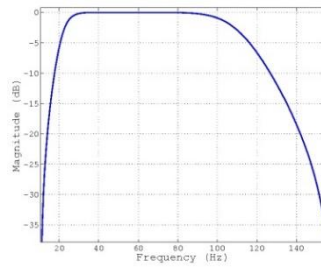


εξομοιωμένης απόκρισης ενός συμβατικού subwoofer, είτε μέσω του προτεινόμενου συστήματος πολλαπλών low-BL ηχείων. Στη δεύτερη περίπτωση, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα βελτίωσης της χωρο-συχνοτικής ανομοιογένειας μέσω κατάλληλης τοποθέτησης των επιμέρους συντονισμών μέσα στον υπό μελέτη χώρο.

## 2. Περιγραφή μεθόδων ανάλυσης και επεξεργασίας

### 2.1 Αναπαραγωγή χαμηλών συχνοτήτων με χρήση συνδυασμένων ζωνοπερατών συστημάτων ηχείων.

Ένα ηχητικό σήμα χαμηλών συχνοτήτων (20Hz-150Hz) αναπαράγεται ιδανικά από ένα ζωνοπερατό σύστημα  $H_s(f)$  που έχει επίπεδο φάσμα στην απόκριση της συχνότητας του (Σχήμα 2.1).

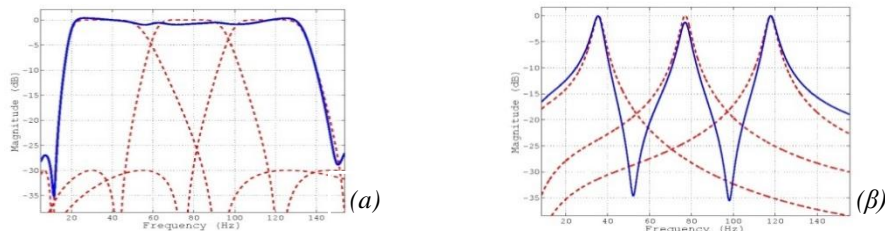


Σχήμα 2.1. Η απόκριση συχνότητας ενός θεωρητικού και ιδανικού συστήματος αναπαραγωγής χαμηλών συχνοτήτων

Εφαρμόζοντας μια διαφορετική προσέγγιση, τα χαμηλόσυχα σήματα μπορούν να αποδοθούν από διατάξεις περισσότερων του ενός ζωνοπερατών υπο-συστημάτων με βάση τη σχέση:

$$H_{sw}(f) = \sum_{i=1}^n H_n(f) \quad (2.1)$$

Το φάσμα της όλης διάταξης είναι επίπεδο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση και προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους φασμάτων του καθενός ζωνοπερατού συστήματος (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2. Η απόκριση συχνότητας συστήματος που προκύπτει από τρία διακριτά συστήματα: (α) 3 ιδανικά υποσυστήματα (β) 3 υποσυστήματα low-BL. Με συνεχή γραμμή φαίνονται οι αποκρίσεις των τριών συστημάτων ενώ με διακεκομμένη απεικονίζεται το άθροισμά τους.

Στην συγκεκριμένη εργασία ακολουθείται μια προσέγγιση που βασίζεται στη Σχέση (2.1) με τη διαφορά ότι τα φίλτρα έχουν την απόκριση συχνότητας τριών διαφορετικών ηχείων με μεγάφωνα χαμηλού συντελεστή δύναμης (low-BI [2]):

$$H_{bl}(f) = \sum_{i=1}^n H_{bl,n}(f) \quad (2.2)$$

Στο Σχήμα 2.2(β) φαίνονται οι χαρακτηριστικοί συντονισμοί των επιμέρους συστημάτων. Τα ζωνοπερατά φίλτρα που εξομοιώνουν τη συμπεριφορά των ηχείων χαμηλών συχνοτήτων προκύπτουν από προηγούμενη μελέτη και αφορούν ηχεία με κλειστού τύπου κουτιού και όγκου 1lt [3]. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα οι αντικειμενικές διαφορές στην απόκριση συχνότητας του συστήματος των τριών  $H_{bl}(f)$  φίλτρων σε σχέση με το ιδανικό φίλτρο είναι ορατές. και η ακουστική ενέργεια που αποδίδει ένα τέτοιο σύστημα είναι μικρότερη, αλλά αποδίδεται σε συγκεκριμένες συχνοτικές ζώνες.

## 2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών Χρονικού Πεδίου (Finite-Difference Time-Domain, FDTD για την ανάλυση χαμηλών συχνοτήτων σε κλειστούς χώρους

Οι παραδοσιακές τεχνικές ανάλυσης και εξομοίωσης της ακουστικής των χώρων δεν έχουν την δυνατότητα να περιγράψουν με ακρίβεια την απόκριση τους σε πολύ χαμηλές συχνότητες (π.χ. κάτω από 200Hz). Για τις πολύ χαμηλές συχνότητες ή για μικρούς κλειστούς χώρους, όπου οι τρόποι παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην διαμόρφωση της ακουστικής συμπεριφοράς, είναι πλέον αποδεκτό ότι απαιτείται μία αριθμητική προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων ή οριακών στοιχείων βασισμένη στην ανάλυση των τρόπων στο πεδίο της συχνότητας και είναι απαραίτητη η χρήση υπολογιστικών εξομοιώσεων που βασίζονται στην κυματική θεωρία [5]. Εδώ, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Πεπερασμένων Διαφορών Χρονικού Πεδίου (Finite Difference Time Domain, FDTD) που επιτρέπει την κυματική ανάλυση και υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του ηχητικού πεδίου στις χαμηλές συχνότητες [4]. Η μέθοδος αυτή δίνει επιπλέον τη δυνατότητα να μελετηθεί η συμπεριφορά ψηφιακών φίλτρων που έχουν σχεδιαστεί για το σύστημα αναπαραγωγής στον υπό μελέτη χώρο και είναι επίσης εφικτό να προσομοιωθεί και να αναλυθεί η συμπεριφορά με ένα ή και πολλαπλά ηχεία.

Με την παραπάνω μέθοδο, είναι εφικτή η εξαγωγή εκτιμήσεων της κρουστικής απόκρισης  $h_{Lk}(t)$  για  $p$  διαφορετικές θέσεις ενός προ-επιλεγμένου πλέγματος θέσεων δέκτη, για συγκεκριμένη θέση της πηγής διέγερσης που σε αυτή την περίπτωση θεωρείται το ιδανικό ηχείο χαμηλών συχνοτήτων (subwoofer), με απόκριση  $H_{sw}(f)$  όπως αυτό που δόθηκε στο Σχήμα 2.1. Αρχικά υπολογίζεται ο μέσος όρος των κρουστικών αποκρίσεων, καθεμίας διάρκειας  $d$ , για 100 θέσεις του πλέγματος υπολογισμού:

$$\tilde{h}_L(t) = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P h_{Lk}(t) \Big|_1^d \quad (2.3)$$

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Fourier (FFT) στην κρουστική και προκύπτει η μέση απόκριση συχνότητας για το δωμάτιο:

$$\tilde{H}_L(f) = FFT \left\{ \tilde{h}_L(t) \right\} \quad (2.4)$$

Οι τιμές του μέτρου εκφράζονται στη συνήθη κλίμακα dB:

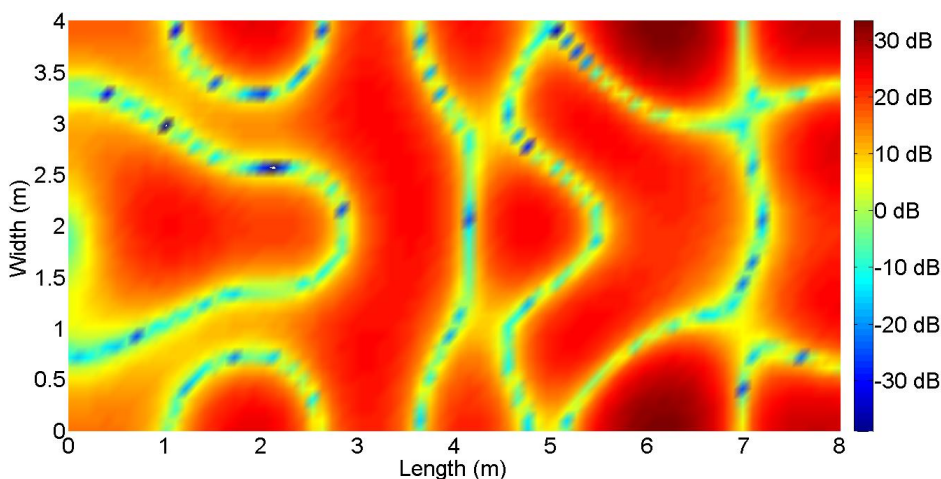
$$\tilde{H}_L^{dB}(f) = 20 \log \left| \tilde{H}_L(f) \right| \quad (2.5)$$

Υπολογίζεται ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση του φάσματος για συχνότητες στο φάσμα ενδιαφέροντος 20-150Hz

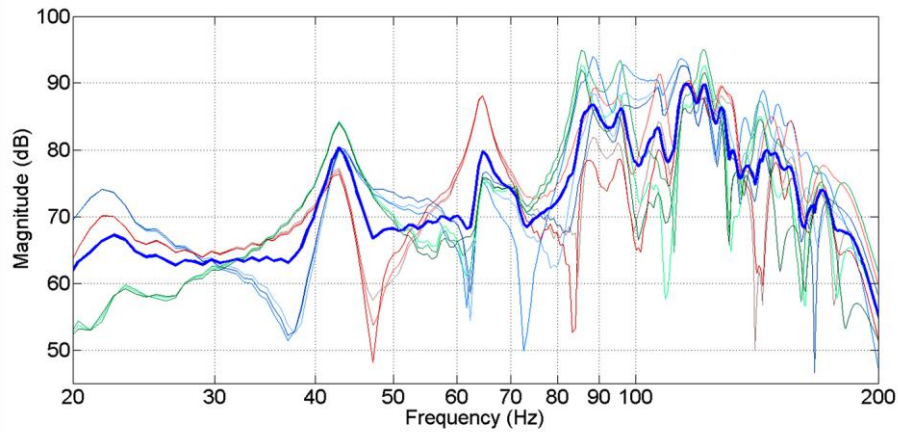
$$\mu_f = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min} + 1} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \tilde{H}_L^{dB}(f) \quad (2.6)$$

$$\sigma_f = \left\{ \frac{1}{f_{\max} - f_{\min} + 1} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} \left[ \tilde{H}_L^{dB}(f) - \mu_f \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.7)$$

Στο Σχήμα 2.3(α) φαίνεται η διακύμανση της ολικής ηχοστάθμης σε τυπικό δωμάτιο, ενώ στο Σχήμα 2.3(β) δείχνεται το μέτρο της απόκρισης του δωματίου για 9 θέσεις του πλέγματος, καθώς και ο μέσος όρος της απόκρισης (Σχέση 2.5).



Σχήμα 2.3. (α) Διακύμανση ολικής ηχοστάθμης (20-200 Hz) σε δωμάτιο διαστάσεων  $L=8m$ ,  $W=4m$ ,  $H=3m$ , για πηγή *subwoofer* τοποθετημένη στο σημείο  $L=0$ ,  $W=2m$ . (κάτοψη χώρου).



Σχήμα 2.3(β) Φασματική απόκριση σε 9 τυπικές θέσεις ακρόασης για τον χώρο για τη διάταξη του Σχήματος 2.3(α). Με τη μπλε γραμμή δείχνεται ο μέσος όρος της απόκρισης για τις παραπάνω θέσεις.

### 2.3 Απόκριση χαμηλών συχνοτήτων σε κλειστούς χώρους με χρήση συνδυασμένων ζωνοπερατών συστημάτων ηχείων

Εδώ θα μελετηθεί η περίπτωση που η διέγερση του υπό μελέτη χώρου, δεν γίνεται μέσω του ιδανικού ηχείου χαμηλών συχνοτήτων, αλλά προκύπτει από τη συνδυασμένη διέγερση  $H_{LB}(f)$  (και της αντίστοιχης κρουστικής απόκρισης  $h_{LB}(t)$ ) των 3 μη ιδανικών ηχείων με μεγάφωνα χαμηλού συντελεστή δύναμης (low-BI), όπως περιγράφηκαν από την Σχέση (2.2) και φαίνονται στο Σχήμα 2.2(β). Έτσι, η απόκριση στη θέση  $p$  του πλέγματος θα είναι:

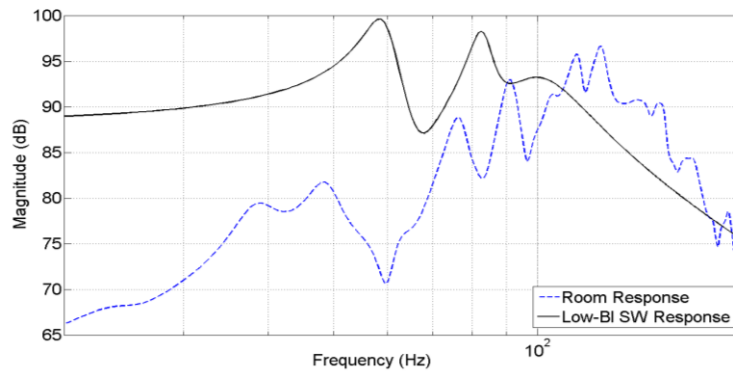
$$h_{LBLEP}(t) = h_{BL}(t) * h_{Lp}(t) \quad (2.8)$$

Κατ' αντιστοιχία των Σχέσεων 2.3-2.5., για την νέα αυτή απόκριση που θα καταγραφεί σε κάθε θέση του πλέγματος, υπολογίζεται και η τυπική απόκλιση (Σχέση 2.8) για τον προεπιλεγμένο αριθμό σημείων πλέγματος που καλύπτει όλες τις πιθανές θέσεις ακρόασης.

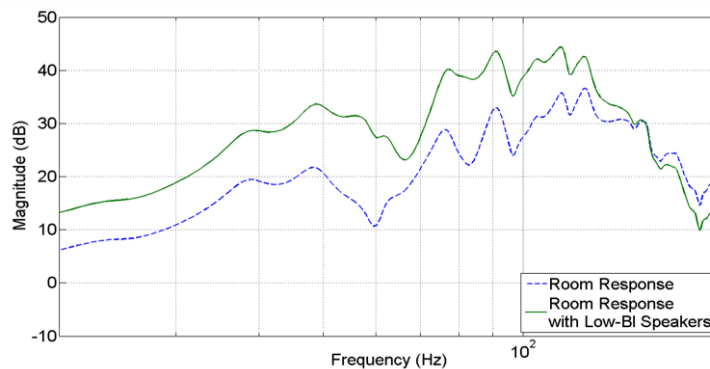
### 3. Αποτελέσματα

Ενδεικτικά αποτελέσματα του μέσου όρου για  $p=100$  θέσεις της φασματικής απόκρισης  $\bar{H}_L^{dB}(f)$  σε σύγκριση με τον μέσο όρο για την απόκριση μέσω του προτεινόμενου συστήματος 3 μη ιδανικών ηχείων με μεγάφωνα χαμηλού συντελεστή δύναμης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1(β). Για τα παρακάτω αποτελέσματα, εξομοιώθηκε χώρος με διαστάσεις  $L=7,1m$ ,  $W=4,5m$ ,  $H=2,85m$ , για πηγές low-BI ηχείων τοποθετημένα στις θέσεις με συντεταγμένες  $L_a=0$ ,  $W_a=2,25m$ ,  $H_a=0,3m$ ,  $L_b=2m$ ,  $W_b=0m$ ,  $H_b=0,3m$  και  $L_c=5,1m$ ,  $W_c=0m$ ,  $H_c=0,3m$ . Στο σχήμα αυτό

διαφαίνεται ότι με κατάλληλη επιλογή κεντρικής συχνότητας, εύρους ζώνης και κέρδους του καθενός από τα 3 επιμέρους ηχεία που συνεισφέρουν στο συνδυασμένο σύστημα subwoofer που δείχνεται στο Σχήμα 3.1(α), η τελική απόκριση στο δωμάτιο μπορεί να βελτιωθεί.



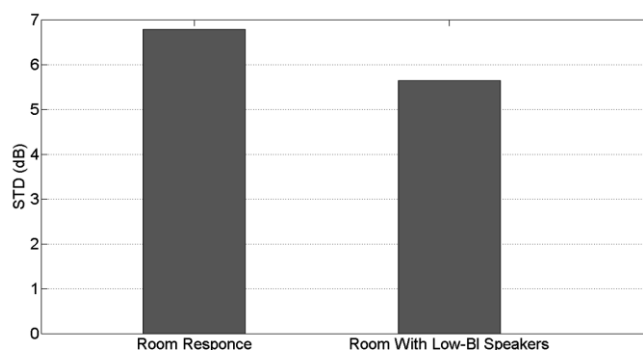
Σχήμα 3.1(α) Ο μέσος όρος της φασματικής απόκρισης για τις 100 θέσεις του πλέγματος υπολογισμού. Η μαύρη γραμμή δείχνει την απόκριση του φίλτρου που προκύπτει από το συνδυασμένο σύστημα των 3 low-BI ηχείων που σχεδιάστηκε για το χώρο.



Σχήμα 3.1 (β) Σύγκριση της απόκρισης του χώρου πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος των τριών ηχείων Low-BI.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η τιμή της τυπικής απόκλισης που προκύπτει από την ανάλυση των 100 θέσεων του πλέγματος (Σχέσεις (2.4) – (2.7)) για την περίπτωση διέγερσης του χώρου μέσω ενός ιδανικού συστήματος subwoofer και μέσω του προτεινόμενου συστήματος με 3 subwoofer Low-BI. Η βελτίωση της διακύμανσης του πλάτους στο φάσμα στην περίπτωση χρήσης του συστήματος των τριών Low-BI ηχείων είναι της τάξης του 1.5dB. Η παραπάνω μελέτη είναι απλώς ενδεικτική και

είναι δυνατή η περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόκρισης, που αποτελεί και αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.



Σχήμα 3.1. Η τυπική απόκλιση του φάσματος ενδιαφέροντος ( 20Hz - 150Hz ) πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος των τριών Low-BI ηχείων.

#### 4. Συμπεράσματα

Η έντονη χωρική και συχνотική ανομοιογένεια που προκύπτει σε τυπικούς χώρους ακρόασης μικρού και μεσαίου μεγέθους μέσω διέγερσης από συνήθη συστήματα χαμηλών συχνοτήτων (π.χ. subwoofer απόκρισης 20-200Hz), μπορεί να περιοριστεί με την εναλλακτική προσέγγιση χρήσης περιορισμένου αριθμού (εδώ 3) μικρών και ανεξάρτητων μονάδων με απόκριση που αυστηρά καλύπτει ένα προ-επιλεγμένο συχνотικό εύρος και υλοποιείται αποδοτικά και ευέλικτα μέσω μεγαφώνων χαμηλού συντελεστή δύναμης (Low-BI).

#### 5. Αναφορές

- [1] S.B. Nielsen, A. Celestinos, «Imroving room acoustics at low frequencies with multiple loudspeakers and time based room correction» EAA Euronoise 2008, Paris, pp 1279-1284 (2008).
- [2] R.M. Aarts, «High-Efficiency Low-BL Loudspeakers» JAES, **53**, pp 579-592 (2005).
- [3] T. Altanis, J. Mourjopoulos «Analysis of low frequency audio reproduction via multiple low-BL speakers» AES 128th Convention, London, (2010).
- [4] S.B. Nielsen, A. Celestinos, «Low-Frequency Loudspeaker-Room Simulation Using Finite Differences in The Domain – Part 1: Analysis» JAES, **56**, pp 772-786 (2008).
- [5] D. Botteldooren, Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, JASA, Vol.98, Issue 6, 3302-3308 (1995).

# ***Audio Semantic and Intelligent Processing Concepts in the New Media Environment: A Cloud Computing Model***

E. A. Sidiropoulos<sup>a</sup>, R. G. Kotsakis<sup>b</sup>, C. A. Dimoulas<sup>c</sup>, G. M. Kalliris<sup>d</sup>, A. A. Veglis<sup>e</sup>

Mediated Communication Research (MCRS) Group, School. of Journalism and Mass Communications, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

[stathsid@auth.gr](mailto:stathsid@auth.gr)<sup>a</sup>, [rkotsakis@gmail.com](mailto:rkotsakis@gmail.com)<sup>b</sup>, [babis@eng.auth.gr](mailto:babis@eng.auth.gr)<sup>c</sup>, [gkal@jour.auth.gr](mailto:gkal@jour.auth.gr)<sup>d</sup>, [veglis@jour.auth.gr](mailto:veglis@jour.auth.gr)<sup>e</sup>

## **ABSTRACT**

*The current work focuses on semantic audio on the cloud modeling, proposing personalized audio content access and exploitation services. The objective of this study was to assess the students' educational and training needs on audio processing as future journalists. The proposed model integrates audio capturing and intelligent content analysis tasks on a cloud environment. It also intends to adopt well-design strategies, with user-friendly GUI, avoiding excessive memory and computational demands, so that unrestricted access via smart phones, PDAs, tablets, laptops or personal computers could be facilitated. The proposed cloud computing framework and its combination with audio semantic services, aims at promoting the implementation of a user-oriented integrated platform, featuring personalization capabilities based on the users' skills, points of interest and expectations. Effective collaboration between the two applied research fields (computer engineering and media professionals) could evolve an integrated system with many aspects concerning interoperability, scalability, virtualization and user's adaptation.*

*Keywords-Cloud Computing; Audio Semantics; Content Description; Cloud Services, New Media*

## **Introduction**

Cloud Computing (CC) is considered to be a significant emerging area with enormous research potential and a wide range of prospective applications. Cloud Computing is an interdisciplinary technological field that combines on-demand services and hardware resources delivered through the Internet by well-tested mature standards [1].

The rapid increase in popularity of web-based systems, which allow users to share data on the web, has resulted in an unexpected growth of multimedia content on the Internet. Automated content analysis and description of this material are essential in order to be able to index and retrieve relevant information in response to

user queries. Audio features can enhance descriptive multimedia power with human semantic interaction services, overcloud [2].

CC finds fertile ground in the fields of implementation on most traditional mass media, both print and electronic ones. In the last few years, “Computational Journalism” enhances the use of Information and Communication Technologies in journalism and news production [3]. The current trends on Mass Media and News production emphasize the adoption of new technologies that promote the collaboration between users and produce “knowledge workers”. Nowadays, it is remarkable that an increasing number of citizens participate, as “citizen journalists”, in the news production process, by sharing photos, images, video or audio files that have been captured by their mobile devices [4].

Audio semantics may include speech/non speech and voice/music discrimination, as it has been thoroughly described in [5], [6]. The transition from the desktop computer terminal and the single end user implication model to the cloud and mobile cloud computing paradigms offer some unique advantages but also some difficulties that have to be overcome. Hence, the involvement of multiple users and field experts might lead to knowledge propagation and the implementation of automated systems through the construction of generic use knowledge bases. On the other hand, large scale heterogeneity in terms of content types, users’ skills and knowhow, labeling types and access terminals that have to be faced need careful attention.

“Mobile handheld devices are an increasing part of everyday fieldwork of news professionals. Mobile assignments delivered to mobile journalists’ smartphones is one potential future development step”[7]. Smartphone, Tablet PC or PDA could replace the necessary traditional devices, including cameras for capturing photos and videos, the voice recorder for recording interviews, and the laptop for writing text. Furthermore, this can result in an increased mobility and collaboration among the journalists [8].

## **1. Design and System Architecture**

### *1.1 Targeted Users and Requirements*

The target user groups of the mobile service are:

- Journalists that are interested in accessing knowledge on sound editing according to their journalistic profile and work conditions. This concerns information like audio files analysis and editing processes and results, as well as further examination in office for which audio tracks may be publishable. The user’s interest may focus from checking for specific tracks in their audio recording to provision of appropriate audio tracks for their news stories.
- Media professionals who would like to have access to audio semantic and intelligent processing services for their collaborators at the point of media publishing and moreover outside of the organization where access to appropriate tools and expertise is quite limited.
- Journalism students who participate in relevant education and training in radio and television news. This concern students who want to involved in learning activities which aim to simulate their real work routines.



From a technical point of view, an Internet connected mobile terminal is required for using the mobile service. In order to realize the option of identification of audio tracks through recording audio files, a microphone is necessary as well as the installation of the appropriate software in the mobile device.

From the user's viewpoint, basic familiarity with the smartphone usage is beneficial. However, through appropriate training sessions on using the mobile service and its specific features can be overcome.

### 1.2 The Proposed Model

The proposed model could be applicable on media organizations, journalists, freelancers and individual end-users. This approach seems to support a better quality and management of audio content from the media organizations-site, as well as efficient content browsing, retrieval and re-use scenarios from the user / producer-site. The combination of the above enhances a better dissemination. Further, having the experience of desktop related application, emphasis is given to the implementation of a model that would transfer these services on the cloud, and specifically for the needs of media services and audio intelligent processes.

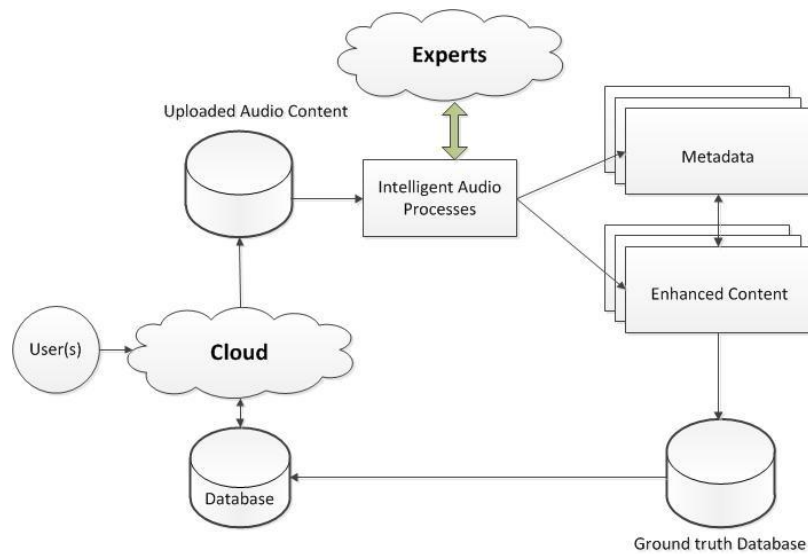


Fig.1 Generic Concept of Content Description Mechanism on Cloud

### 1.3 Graphic User Interface

The application uses menu hierarchies to represent the available activities. In order to identify the possible design solutions when multiple platforms are considered, a taxonomy of the relations between tasks is formulated. By selecting the menu item, a list of items and subcategories contained in that category are shown (Fig.2). Considering design issues from the user /client point of view, the GUI aims at serving simple functionalities, so that to be designated for amateur users or

limited interfacing mobile terminals. Once the audio content and the accompanying meta-data have been transmitted to the cloud, server processing activities are initiated, returning back the response of the intelligent core system.

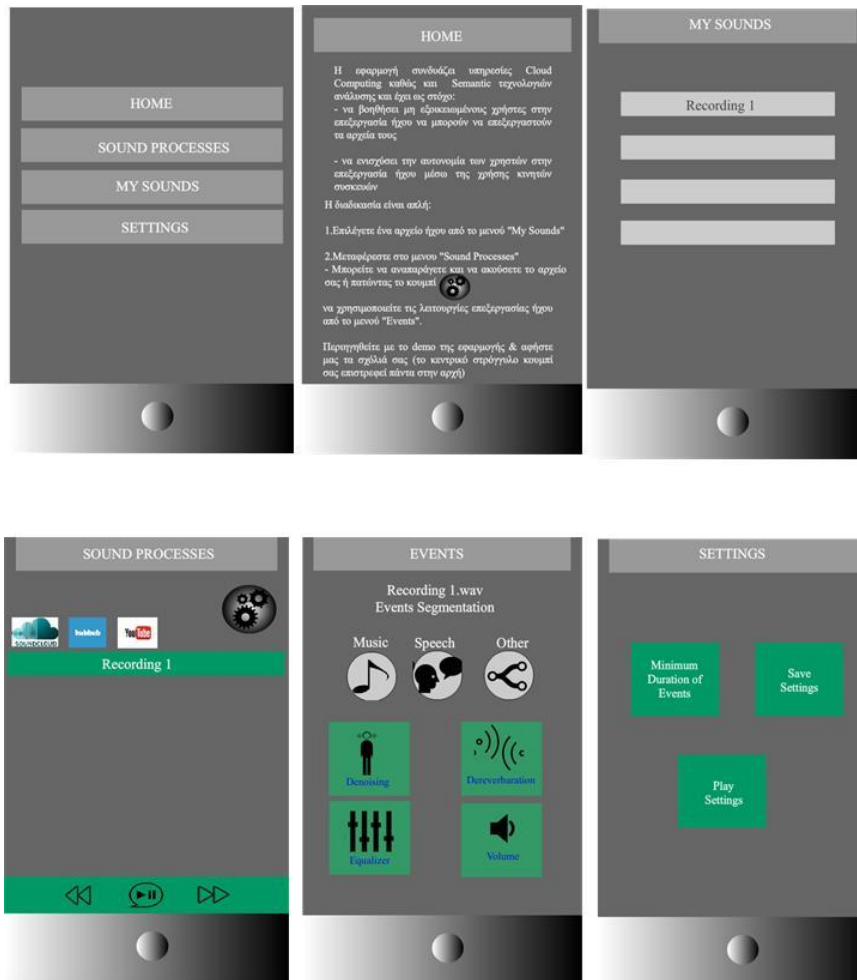


Fig. 2. Final design including descriptions of each functionality (six sub screens are shown above) (<ftp://pacific.jour.auth.gr/demo-2/demo.html>.)

#### 1.4 Audio Semantic Processing Issues

The audio semantics framework initiates its function/transaction with the user's content upload operation, which includes the contribution of the recorded audio material and the corresponding initial semantic description. Transcoding to a predefined format is essential, especially for cloud applications, since many devices use their own capturing formats.

Short-time window-based audio processing facilitates the content semantic analysis process, whereas more sophisticated segmentation techniques might appear [46], [47]. The temporal length of the window is associated to the specific intelligent audio processing application (e.g. voice discrimination, noise detection, speech enhancement, denoising, etc) [6], [9]-[11]. Feature extraction and selection play a very important role in the semantic analysis process. A wide variety of features are computed in various signal domains (time, frequency, spectral, cepstral, wavelets, etc). Salient feature ranking and selection are also very sensitive to the specific application demands [5]-[6].

Audio recognition models require the definition of classification schemes, as well as some initial pattern-labeled-samples for ground truth acquisition. Unsupervised clustering is suitable for discriminating the initial data sets based on their audio-feature signatures. In addition, in more general and common classification schemes (i.e. voice/music discrimination, noise detection, etc.) supervised learning can be employed, taking advantage of the coarse semantic annotation, provided by the user. Hybrid and hierarchical methods are also integrated, combining supervised training algorithms with unsupervised clustering at various classification taxonomies [5]-[6].

When the discrimination procedure has reached an adequate performance, the semantic analysis results are exported in content description meta-data structures, using appropriate cross-platform file formats such as \*.xml, txt and csv. The extracted semantic audio information is thereafter sent, through the cloud, to the corresponding end-users. In this context, clouds-users-interactions are expedited, promoting best-practices adoption and knowledge acquisition in learning by example feedbacks.

## **2. Audio semantics in the media business: a statistical data collection and analysis survey**

The objective of this study was to assess the students' awareness on audio processing area and their future users. The specific aims of the study were a) to define the audio processing experience of students, b) the evaluation of the proposed design of a mobile application with automated audio processing tools and services. Online questionnaires (created using the Google Documents-Forms) were distributed, in an effort to obtain data on the student responses and attitudes against the audio processing field. These data were then statistically analyzed using SPSS statistical software, in order to propose directions for Mobile Computing in Advanced Audio Processing Techniques.

### *2.1 Sample*

A convenience sample of 20 postgraduate participants of the School of Journalism and Mass Media Communication of the Aristotle University of Thessaloniki was selected. The inclusion criteria for students were the following: a) willingness to participate in the study b) considered to be Internet users and have email account so they are able to receive the online questionnaire. Because this survey was to be used as an initial analysis on the subject, we only chose core sound

processing functionalities to be questioned in students, without any advanced applications that Audio Signal Processing might have.

## 2.2 Data analysis

Each participant was asked to perform specific tasks according to a case study. The questions chosen to be of importance individually were those about the level of Audio Signal Processing skills and the frequency of their involvement, as well as the Mobile Application usability to their future workplaces. Results were aggregated and then evaluated by the major axes of the study. Only frequency-based descriptive analyses were conducted to evaluate the collected students' responses for every item. Moreover, a classification of the questions was made, based on the proportion of the number of answers corresponding to the two most important indices. Each index was given a meaning according to these questions and was characterized as a new observation about the students on Mobile Application.

## 3. Results

Initially, survey participants were asked to determine if they have used Audio Signal Processing techniques. Generally, participants seemed to be more familiar with simple Digital audio editing processes (such as audio tracks copy, cut, etc.), as well as audio tracks Compression-Saving. Participants showed their concern about their engagement with Denoising and Frequency amplitude processing. Finally Advanced Effects and Quantization techniques follow.

		Responses		Percent of Cases
		N	Percent	
Familiarity with Audio Processing techniques <sup>a</sup>	Copy, cut, and paste, Audio Mix (Digital audio editing)	16	23,9%	80,0%
	Frequency amplitude processing / intensity settings	12	17,9%	60,0%
	Change sampling parameters or quantisation (bits)	7	10,4%	35,0%
	Advanced Effects (Change duration, Artificial reverberation, etc.)	6	9,0%	30,0%
	Denoising	10	14,9%	50,0%
	Compression-Save	16	23,9%	80,0%
	Total	67	100,0%	335,0%

a. Dichotomy group tabulated at value 1.

Table 1. Participants' familiarity with Audio Processing techniques

In general, the students stated their satisfaction about the mobile graphic user interface that they have used and they were optimistic for the integration of such services in their future practice. Moreover, it seems that they found the usefulness in

every aspect (first impression, easy understanding, adherence) described, lying somewhere between the medium and high level (the mean difference of the low to maximum answers in every field was around 3.85). However, because of the limited

**Descriptive Statistics**

	N	Range	Minimum	Maximum	Mean
What is your first impression?	20	3	2	5	3,85
How easy was to understand the application's functionality?	20	3	2	5	3,85
How quickly do you think you could use this application?	20	3	2	5	3,85
How do you evaluate the level of user interaction with the application?	19	4	1	5	3,32
Valid N (listwise)	19				

interoperability of the GUI, they rated “user interaction” lower than the other aspects (Table 2).

*Table 2. Usability Evaluation Results (Likert-type scale 1=very negative, 5=very positive)*

For determining which factors influence the participants’ perception about mobile application utility and improvement of their audio processing skills, a future user experience analysis was conducted. The collected data presenting the influence value of mobile application in scope of improving their skills in certain areas (entertainment, education, new experiences on audio signal processing and collaboration among media professionals) allow us to investigate the impact evaluation of the mobile application in their lives.

The above findings can be explained by the hypothesis that Mobile Computing could be easily integrated at the journalistic workplaces, in order to enable collaborative tasks between media professionals, but also to enhance their future attitude on audio signal processing experiences (Table 3).

**\$User\_Experience Frequencies**

	Responses		Percent of Cases
	N	Percent	
User Experience <sup>a</sup> Entertainment	4	10,0%	21,1%
Education	7	17,5%	36,8%
New experiences on audio signal processing	15	37,5%	78,9%
Collaboration among media professionals	14	35,0%	73,7%
Total	40	100,0%	210,5%

a. Dichotomy group tabulated at value 1.

*Table 3. Impact Evaluation Results / Future applications of the mobile app.*

#### **4. Conclusions and Future Work**

This paper has described an innovative Cloud Framework with integrated Audio Semantic and Intelligent procedures through a mobile interface in order to examine the benefits or limitations of such a project in the new media environment.

Further extension of this work includes the implementation of the proposed model, in order to investigate the programming interactions, the processing time and load for the overall analysis and consequently, the optimization's necessities. In addition, real-world testing and evaluation tasks of the audio classification and semantic analysis processes could indicate the appropriate configuration that will prevail as most applicable features. Another issue that may emerge refers to the bitrate demands in cloud communications tasks, since it affects the application response, the audio content quality and consequently the semantic analysis results.

Finally, the evaluation of the proposed application by experts and less proficient users will provide the necessary feedback. This will be resulted in revealing improvements that have to be made or options that may have to be included, in order to meet the users' demands and points of interest.

## 5. References

- [1] T. Dillon, C. Wu, and E. Chang, "Cloud computing: issues and challenges," in *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2010 24th IEEE International Conference on*, 2010, pp. 27–33.
- [2] S. Chaudhuri, "Structured Models for Audio Content Analysis," 2011.
- [3] T. Flew, C. Spurgeon, A. Daniel, and A. Swift, "The Promise of Computational Journalism," *Journal. Pract.*, vol. 6, no. 2, pp. 157–171, 2011.
- [4] S. Cohen, C. Li, J. Yang, and C. Yu, "Computational Journalism: A Call to Arms to Database Researchers.," in *CIDR*, 2011, vol. 2011, pp. 148–151.
- [5] R. Kotsakis, G. Kalliris, and C. Dimoulas, "Investigation of broadcast-audio semantic analysis scenarios employing radio-programme-adaptive pattern classification," *Speech Commun.*, vol. 54, no. 6, pp. 743–762, 2012.
- [6] R. Kotsakis, G. Kalliris, and C. Dimoulas, "Investigation of Salient Audio-Features for Pattern-Based Semantic Content Analysis of Radio Productions," presented at the Audio Engineering Society Convention 132, 2012.
- [7] H. Väättäjä and P. Egglestone, "Briefing news reporting with mobile assignments: perceptions, needs and challenges," in *Proceedings of the ACM 2012 conference on Computer Supported Cooperative Work*, 2012, pp. 485–494.
- [8] T. Jokela, H. Väättäjä, and T. Koponen, "Mobile Journalist Toolkit: a field study on producing news articles with a mobile device," in *Proceedings of the 13th International MindTrek Conference: Everyday Life in the Ubiquitous Era*, 2009, pp. 45–52.
- [9] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, and G. Papanikolaou, "Adaptive phoneme alignment based on rough set theory," in *Rough Sets and Current Trends in Computing*, 2010, pp. 100–109.
- [10] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, and G. Papanikolaou, "A heuristic text-driven approach for applied phoneme alignment," in *Audio Engineering Society Convention 128*, 2010.
- [11] K. Avdelidis, C. Dimoulas, G. Kalliris, and G. Papanikolaou, "Designing optimal phoneme-wise fuzzy cluster analysis," in *Audio Engineering Society Convention 128*, 2010.

# ***Μελέτη της διάδοσης θορύβου σεισμού στο υποθαλάσσιο περιβάλλον***

Μιχάλης Ταρουδάκης<sup>1</sup> & Γιάννης Μαστρόκαλος<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Μαθηματικών και Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης

<sup>2</sup> Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών  
Ν. Πλαστήρα 100, 70013 Ηράκλειο

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της διάδοσης ακουστικού σήματος που προέρχεται από θαλάσσιο σεισμό στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η εργασία αποτελεί το πρώτο βήμα για το χαρακτηρισμό ακουστικών σημάτων που προέρχονται από σεισμούς και καταγράφονται στα θαλάσσια ακουστικά παρατηρητήρια. Στην παρούσα εργασία, το ακουστικό σήμα λαμβάνεται από βάση δεδομένων, αναλύεται στις συχνότητες που το αποτελούν και στη συνέχεια υπολογίζεται η συνάρτηση μεταφοράς για κάθε συχνότητα για δεδομένη θέση της πηγής και του δέκτη. Η σύνθεση του ακουστικού σήματος στο δέκτη γίνεται με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier. Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς γίνεται με ανάπτυγμα της λύσης της εξίσωσης Helmholtz σε σειρά ιδιοσυναρτήσεων, με την ιδιαιτερότητα ότι ο πυθμένας της θάλασσας θεωρείται ελαστικό μέσο που διαδίδει διατμητικά και διαμήκη κύματα.

## ***A study on seismic noise propagation in underwater environment***

### **ABSTRACT**

*The paper presents a study on the propagation of an earthquake sound in shallow water environment. The earthquake signal is taken from a data base of recordings and the aim of the study is to simulate its reception at long ranges from a hypothetical epicenter. To this end, the sound source will be considered close to the water-bottom interface and the sea-bed will be modeled as an elastic medium. The simulation procedure is based on the inverse Fourier transform of the system transfer function calculated for a range of frequencies corresponding to the earthquake spectrum multiplied by the source excitation function.*

## Εισαγωγή

Μία από τις πλέον ενδιαφέρουσες καταγραφές των θαλάσσιων ακουστικών παρατηρητηρίων είναι ο θόρυβος που προέρχεται από σεισμούς. Η μελέτη της σεισμικότητας στο θαλάσσιο χώρο δίνει μεγάλο όγκο πληροφορίας στους σεισμολόγους και τους γεωφυσικούς προκειμένου να καταστεί δυνατή η πλήρης χαρτογράφηση της σεισμικής δραστηριότητας και ο χαρακτηρισμός των σεισμών σε σχέση με τη δομή του γήινου φλοιού ιδιαίτερα κάτω από την υδάτινη στήλη. Μέχρι σήμερα ωστόσο δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως οι καταγραφές του θορύβου του περιβάλλοντος που προέρχονται από σεισμούς και είναι περιορισμένες οι σχετικές αναφορές στη βιβλιογραφία. Με την παρούσα εργασία επιχειρείται ένα πρώτο βήμα για την αξιοποίηση του θορύβου που προέρχεται από σεισμούς. Επειδή είναι σημαντικό στα πλαίσια της αξιοποίησης κάθε ακουστικού σήματος που καταγράφεται στο θαλάσσιο περιβάλλον να είναι γνωστές οι συνθήκες διάδοσής του, επιχειρείται η μοντελοποίηση της διάδοσης ενός σήματος που προέρχεται από σεισμό στο θαλάσσιο περιβάλλον, κάτω από την απλουστευτική παραδοχή ότι η πηγή του σήματος βρίσκεται σε σχετική επαφή με τον πυθμένα. Σημειώνεται ότι η πλήρης μοντελοποίηση της διάδοσης του σεισμικού κύματος από το επίκεντρο και η μετατροπή του σε ακουστική ενέργεια στη διεπιφάνεια νερού πυθμένα, ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας που περισσότερο επικεντρώνεται στις αλλοιώσεις που υφίσταται ο θόρυβος από σεισμό καθώς διαδίδεται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επομένως στην εργασία μας θα υποθέσουμε ότι έχει ήδη παραχθεί ένα ακουστικό σήμα από σεισμό και μελετάται η διάδοσή του σε θαλάσσιο κυματοδηγό. Προκειμένου η μοντελοποίηση να είναι ρεαλιστική, ο ήχος του σεισμού που έχει χρησιμοποιηθεί προέρχεται από βάση δεδομένων πραγματικών καταγραφών υποθαλάσσιων σεισμών. Στο πρώτο κεφάλαιο θα δοθεί σε συντομία η διαδικασία υπολογισμού της διάδοσης του σεισμικού σήματος που έχει υιοθετηθεί. Συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στην ανάλυση και σύνθεση ακουστικών σημάτων που διαδίδονται στο θαλάσσιο περιβάλλον με χρήση της συνάρτησης μεταφοράς, (ακουστικό πεδίο από μονοχρωματική σημειακή πηγή) που υπολογίζεται με λύση ενός κυματικού ακουστικού προβλήματος που ορίζεται από την εξίσωση Helmholtz σε θαλάσσιο κυματοδηγό πάνω από ελαστικό πυθμένα. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα εφαρμογής. Δεν θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι τεχνικές υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς αφού οι λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν σε σχετική βιβλιογραφία.

### 1. Θεωρητικό υπόβαθρο υπολογισμού της διάδοσης σήματος που προέρχεται από σεισμό.

#### 1.1 Ανάλυση και σύνθεση Fourier.

Δοθέντος ενός σήματος  $s(t)$  στο πεδίο του χρόνου, ο μετασχηματισμός Fourier  $\mathfrak{F}$  μας δίνει το φάσμα συχνοτήτων  $S(\omega)$  από το οποίο αποτελείται και αντίστροφα :

$$S(\omega) = \mathfrak{F}(s(t)), \quad s(t) = \mathfrak{F}^{-1}(S(\omega)) \quad (1.1)$$



Εάν το σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων περάσει από ένα φίλτρο  $H(\omega)$  είναι γνωστό από τη θεωρία των γραμμικών συστημάτων ότι το αποτέλεσμα στην έξοδο του φίλτρου θα είναι  $P(\omega)$  όπου  $P(\omega) = S(\omega)H(\omega)$ . Συνεπώς το σήμα στην έξοδο του φίλτρου στο πεδίο του χρόνου θα είναι  $p(t) = \mathcal{F}^{-1}(P(\omega))$ .

Όταν μία πηγή εκπέμπει σήμα φάσματος  $S(\omega)$  σε ένα κυματοδηγό, η μελέτη της διάδοσής του από την πηγή μέχρι το δέκτη μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι ο κυματοδηγός ορίζει μία συνάρτηση μεταφοράς  $H(\omega)$  η οποία επενεργεί στο σήμα με τη μορφή φίλτρου και δίδει στην έξοδό του το σήμα  $P(\omega) = \mathcal{F}(p(t))$ . Εάν λοιπόν υπολογιστεί η απόκριση του κυματοδηγού σε μοναδιαία είσοδο στο πεδίο των συχνοτήτων που εκπέμπει η πηγή, και εάν είναι γνωστή η συνάρτηση διέγερσης της πηγής (source excitation function) είναι δυνατή η προσομοίωση της λήψης του σήματος στο πεδίο των συχνοτήτων και μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier στο πεδίο του χρόνου.

Η προσομοίωση της διάδοσης ενός σήματος που προέρχεται από σεισμό επομένως μπορεί να γίνει εύκολα με βάση την παραπάνω διαδικασία, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστό το φάσμα της πηγής. Επειδή όπως ειπώθηκε είναι εξαιρετικά δύσκολη η συνολική προσομοίωση της διάδοσης ενός σεισμικού κύματος από το επίκεντρό του και η μετατροπή του σε διάμηκες (ακουστικό) κύμα στο νερό μπορούμε να περιορίσουμε την προσομοίωση στο θαλάσσιο κυματοδηγό, θεωρώντας ότι είναι γνωστή η ακουστική διέγερση ακριβώς πάνω από τη διεπιφάνεια νερού-πυθμένα. Με τον τρόπο αυτό δεν γίνεται λεπτομερής ανάλυση του πραγματικού σήματος από ένα σεισμό, αλλά τουλάχιστον μπορεί να μελετηθεί η αλλοίωση του σήματος καθώς αυτό έχει διαδοθεί στο θαλάσσιο κυματοδηγό. Στα επόμενα θα θεωρήσουμε ότι είναι γνωστή η συνάρτηση διέγερσης της πηγής και θα προκύψει από ανάλυση Fourier ενός πραγματικού σήματος από υποθαλάσσιο σεισμό.

## 1.2 Η Υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς

Με βάση τα ανωτέρω, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς  $H(\omega)$ . Ο υπολογισμός αυτός ανάγεται στην επίλυση ενός προβλήματος διάδοσης ήχου από σημειακή αρμονική πηγή μοναδιαίας διέγερσης σε ένα κυματοδηγό. Με βάση το γεγονός ότι μας ενδιαφέρει ο θόρυβος από σειμούς, είναι αυτονόητο ότι για να υπάρχει ακουστικό σήμα, θα πρέπει να έχουν διεγερθεί διατμητικά κύματα και συνεπώς τμήμα του πυθμένα της θάλασσας θα πρέπει να έχει επαρκή ακαμψία για να τα διαδώσει. Στα πλαίσια μιας απλουστευτικής παραδοχής και δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει ο ήχος στο νερό, θα μπορούσε ο πυθμένας να θεωρηθεί ημιάπειρο ελαστικό μέσο. Επομένως αναζητάμε λύση στο πρόβλημά μας όταν ο θαλάσσιος κυματοδηγός περιορίζεται από την επιφάνεια της θάλασσας και τη διεπιφάνεια νερού-ελαστικού πυθμένα. Στη συνέχεια πρόσθετες απλουστευτικές υποθέσεις θα είναι ότι οι δυο διεπιφάνειες είναι οριζόντιες και επίπεδες και ότι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό  $c_w$  και τον πυθμένα  $c_b$  είναι σταθερή (φυσικά

διαφορετική σε κάθε υποπεδίο. Τέλος και η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων  $c_s$  θα θεωρηθεί σταθερή.

Η εξίσωση Helmholtz σε ένα κυματοδηγό που ορίζεται από οριζόντιες, παράλληλες μεταξύ τους διεπιφάνειες για μία σημειακή αρμονική πηγή μοναδιαίας διέγερσης είναι:

$$\nabla^2 p(\vec{x}) + k^2 p(\vec{x}) = -\delta(\vec{x} - \vec{x}_0) \quad (1.2)$$

όπου  $p(\vec{x})$  είναι η ακουστική πίεση,  $\vec{x}$  είναι το διάνυσμα θέσης,  $\vec{x}_0$  είναι το διάνυσμα θέσης της μονοχρωματικής πηγής και  $k = \omega / c$  είναι ο αριθμός κύματος με  $c$  να συμβολίζουμε την ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Η εξίσωση συμπληρώνεται με τη συνθήκη μηδενισμού της πίεσης στο όριο νερού αέρα (ελεύθερη επιφάνεια), κατάλληλη συνθήκη στον πυθμένα και τη συνθήκη ακτινοβολίας από το άπειρο για να ορισθεί ένα καλώς τεθιμένο πρόβλημα. Σημειώνεται εν προκειμένω ότι η ως άνω θεώρηση περιορίζεται για την ακουστική πίεση στο νερό που έχει πάχος  $h$ .

Θεωρώντας κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων η ανάπτυξη της λύσης σε σειρά ιδιοσυναρτήσεων γράφεται :

$$p(r, z) = \sum_n A_n(r) u_n(z) \quad (1.3)$$

με τις ιδιοσυναρτήσεις να ορίζονται από ένα «πρόβλημα βάθους» ως εξής :

$$\frac{d^2 u_n}{dz^2}(z) + (k^2 - \lambda_n) u_n(z) = 0, z \in [0, h] \quad (1.4)$$

με συνθήκες

$$u_n(0) = 0 \quad (1.4a)$$

$$\frac{du_n}{dz}(h) = \frac{u_n(h)}{I(\lambda_n)} \quad (1.4b)$$

όπου  $I(\lambda_n)$  είναι μία συνάρτηση που συσχετίζει την ιδιοσυνάρτηση με την παράγωγό της στη διεπιφάνεια με τον πυθμένα και εξαρτάται από το είδος του δεύτερου μέσου, δηλαδή του πυθμένα. Η ως άνω εξίσωση είναι γνωστή ως «συνθήκη προσαρμογής» (impedance condition)

Χρησιμοποιώντας την έννοια της ανάπτυξης της ακουστική πίεσης σε επίπεδα κύματα που σχετίζονται με τις επιτρεπτές ιδιοτιμές του προβλήματος 1.4 η συνάρτηση  $I(\lambda_n)$  παίρνει τη μορφή [1] :

$$I(\lambda_n) = -\frac{i}{k_0} \frac{\rho_b}{\rho_w} (\eta_b^2 - \lambda_n)^{-\frac{1}{2}} \left[ \frac{k_0^4}{k_s^4} (\eta_s^2 - 2\lambda_n)^2 + 4 \frac{k_0^4}{k_s^4} \lambda_n (\eta_b^2 - \lambda_n)^{-\frac{1}{2}} (\eta_s^2 - \lambda_n)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (1.5)$$

όπου

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0}, k_s = \frac{\omega}{c_s}, \eta_b = \frac{c_0}{c_b}, \eta_s = \frac{c_0}{c_s}$$

Οι δείκτες για τις ταχύτητες αντιστοιχούν σε ταχύτητα αναφοράς (0), ταχύτητα ήχου στον πυθμένα (b) και ταχύτητα διατμητικών κυμάτων στον πυθμένα (s). Οι δείκτες  $\eta_*$ ,  $*$  = b, s ονομάζονται δείκτες διάθλασης. Συνήθως ως  $c_0$  θεωρούμε  $c_w$ .

Η έκφραση της συνάρτησης προσαρμογής ως ανωτέρω, είναι συμβατή με την διατύπωση της λύσης του προβλήματος βάθους ως

$$u_n(z) = Ae^{i\gamma_n z} + Be^{-i\gamma_n z} \quad (1.6)$$

όπου  $\gamma_n = \sqrt{k^2 - \lambda_n}$  είναι η κατακόρυφη συνιστώσα του αριθμού κύματος. Υπενθυμίζεται ότι η έκφραση αυτή έχει προέλθει από την υπόθεση για σταθερή ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό. Η εφαρμογή των οριακών συνθηκών (1.4a,b) μπορεί εύκολα να δείχθει [2] ότι καταλήγει στη διατύπωση της «χαρακτηριστικής εξίσωσης του κυματοδηγού» ως :

$$\tan(k_0 \sqrt{n_w^2 - \lambda_n} h) = -\frac{i\rho_b}{\rho_w} (\eta_b^2 - \lambda_n)^{-\frac{1}{2}} (\eta_w^2 - \lambda_n)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( 4 \frac{k_0^4}{k_s^4} \lambda_n \sqrt{\eta_b^2 - \lambda_n} \sqrt{\eta_s^2 - \lambda_n} + \frac{k_0^4}{k_s^4} (\eta_s^2 - 2\lambda_n)^2 \right) \quad (1.7)$$

που είναι μία μη γραμμική εξίσωση ως προς τις ιδιοτιμές  $\lambda_n$ . Η εξίσωση γράφεται και με τη μορφή  $f(\lambda_n) = 0$  που ορίζει ταυτόχρονα και την «χαρακτηριστική εξίσωση» του κυματοδηγού.

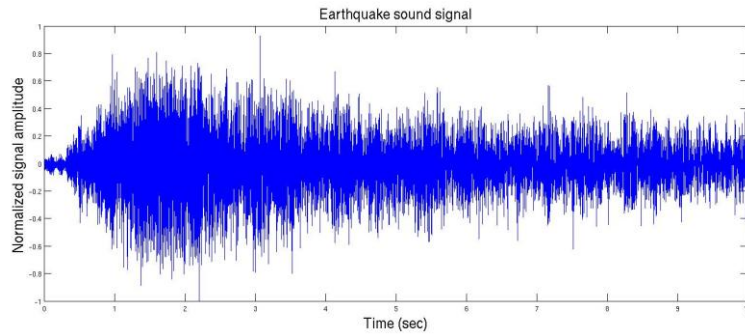
Για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών του προβλήματος βάθους έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι. Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας έχουν υιοθετήσει τον υπολογισμό μέσω του λεγόμενου «ενεργού βάθους» (effective depth) [3] και τα αποτελέσματα έχουν ελεγχθεί μέσω συστηματικής μελέτης των ριζών της 1.7 [2]

Οι συντελεστές της αναπαράστασης 1.3 υπολογίζονται με χρήση θεωρίας συναρτήσεων Green. [4]

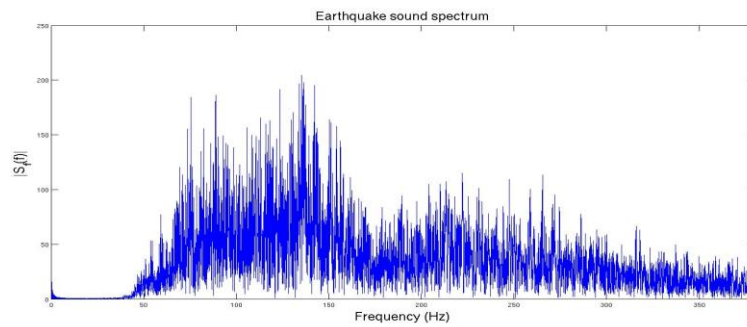
## 2. Μελέτη περίπτωσης

Θεωρούμε ρηχό κυματοδηγό βάθους 150 m. Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό θεωρείται σταθερή ίση με  $c_w = 1500$  m/sec ενώ στον πυθμένα θεωρούμε υλικό χονδρής άμμου με ταχύτητα διάδοσης του ήχου  $c_b = 1900$  m/sec, ταχύτητα διάδοσης διατμητικών κυμάτων  $c_s = 600$  m/sec και πυκνότητας  $\rho_b = 1600$  kg/m<sup>3</sup>. Στο σχήμα 2.1 βλέπουμε ένα σήμα που προέρχεται από υποθαλάσσιο σεισμό και θα χρησιμοποιηθεί ως σήμα αναφοράς για τις προσομοιώσεις μας. Στο σχήμα έχουμε περιλάβει 10 sec από την καταγραφή. Θα θεωρήσουμε ότι το σήμα αναφοράς

εκπέμπεται κοντά στο διαχωριστικό σύνορο νερού πυθμένα (10 μ πάνω από το σύνορο), προκειμένου να είναι η προσομοίωση όσο το δυνατό κοντύτερα στην πραγματικότητα.

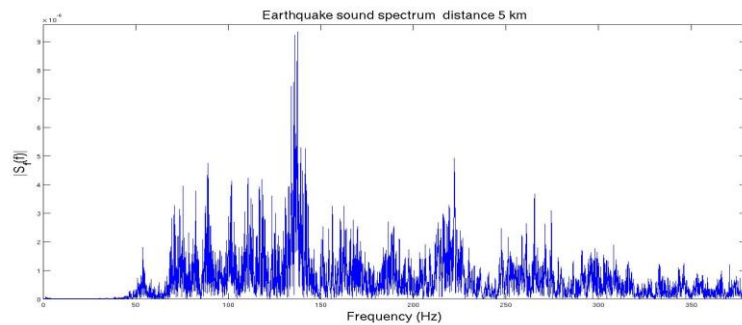


Σχήμα 2.1. Καταγραφή ηχητικού σήματος που προέρχεται από σεισμό.

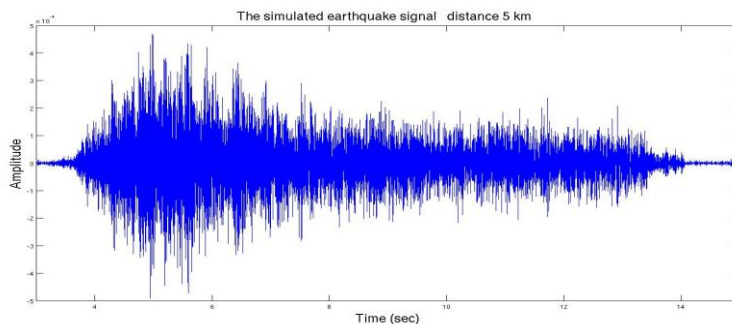


Σχήμα 2.2. Το φάσμα του σήματος που εμφανίζεται στο σχήμα 2.1.

Στο σχήμα 2.2 παίρνουμε το μέτρο του μετασχηματισμού Fourier του σήματος δηλαδή το φάσμα συχνοτήτων που το αποτελούν. Διαπιστώνουμε τη διέγερση σχετικά υψηλών συχνοτήτων με τις ισχυρότερες από πλευράς ενέργειας να βρίσκονται στην περιοχή 60-120 Hz. Χρησιμοποιώντας την θεωρία που αναπτύξαμε προηγουμένως και αφού έχουμε διακριτοποιήσει το πεδίο συχνοτήτων σε 351 συχνοτήτες (ανά 1 Hz) με εύρος από 30 Hz έως 380 Hz, υπολογίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του κυματοδηγού σε όλες τις συχνότητες για απόσταση από την πηγή 5 km και για ένα δέκτη σε βάθος 10 m. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι μιγαδική, το μέτρο του φάσματος που θα καταγραφεί στο δέκτη εμφανίζεται στο σχήμα 2.3 και ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνει πραγματικό μέρος σύμφωνα με το σχήμα 2.4 που αντιπροσωπεύει το σήμα από το σεισμό όπως αυτό θα καταγραφεί στο δέκτη.



Σχήμα 2.3. Το φάσμα του σήματος που εμφανίζεται στο σχήμα 2.1. μετά από 5 km διάδοσης στο κυματοδηγό.



Σχήμα 2.4. Το σήμα από το σεισμό μετά από 5 km διάδοσης στο κυματοδηγό.

### 3. Σχολιασμός

Η εργασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία άσκηση υπολογισμού της λήψης ενός ακουστικού σήματος που διαδίδεται στο θαλάσσιο περιβάλλον όταν είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά της εκπομπής του από την πηγή. Με την έννοια αυτή, η αντιμετώπιση του προβλήματος που παρουσιάστηκε δεν περιορίζεται στα σήματα που προέρχονται από σεισμό, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε είδους ακουστικό σήμα. Η ιδιαιτερότητα της εργασίας ωστόσο είναι ότι αναφερόμενοι σε σήμα από σεισμό, θα πρέπει να περιλάβουμε στη μελέτη μας τη διάδοση διατμητικών κυμάτων στον πυθμένα της θάλασσας. Επίσης θα πρέπει να υπολογιστεί η διάδοση ενός σχετικά ευρυζώνιου ακουστικού σήματος, με προεξάρχουσες τις χαμηλές συχνότητες. Με βάση τα παραπάνω, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα υπολογισμού του ακουστικού πεδίου σε ρηχό θαλάσσιο κυματοδηγό που βασίζεται σε ανάπτυγμα της λύσης της ακουστικής εξίσωσης σε σειρά ιδιοσυναρτήσεων. Οι αντίστοιχες ιδιοτιμές είναι μιγαδικές και υπολογίζονται με τη μέθοδο του μιγαδικού ενεργού βάθους. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στην εργασία είναι φανερή η μείωση της έντασης του ακουστικού σεισμικού σήματος καθώς αυτό διαδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις, η διατήρηση της υψηλότερης ενέργειας του σήματος στις χαμηλές συχνότητες αλλά και η συμμετοχή υψηλότερων συχνοτήτων στη διαμόρφωσή του. Τέλος παρατηρείται επιμήκυνση της διάρκειας

του, κάτι που φυσικά αναμενόταν με βάση τη γνωστή θεωρία της διασποράς της ακουστικής ενέργειας στους κυματοδηγούς. Η παρατήρηση αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να πειραματισθούμε σε εφαρμογή μεθόδων χαρακτηρισμού του σήματος σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, με πιθανό εργαλείο για την εφαρμογή των απαραίτητων μετασχηματισμών, τα κυματίδια (wavelets). Αναμφίβολα απαιτείται σημαντική περεταίρω μελέτη και η συστηματική προσομοίωση της διάδοσης ήχων από σεισμούς διαφορετικής προέλευσης και χροιάς προκειμένου να καταστεί δυνατός ο χαρακτηρισμός τους ανάλογα με το είδος της σεισμικής διέγερσης που είναι και ο απώτερος στόχος μας. Σε ό,τι αφορά τον υπολογισμό της απόκρισης του κυματοδηγού στη σεισμική διέγερση, επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη μοντέλου υπολογισμού του ακουστικού πεδίου σε περιβάλλον μεταβαλλόμενων με το βάθος παραμέτρων και στο απώτερο μέλλον, σε περιβάλλον με γενικευμένες μεταβολές παραμέτρων τουλάχιστον σε δύο διαστάσεις καθώς και πάνω από πολυστρωματοποιημένους ελαστικούς πυθμένες.

#### **4. Ευχαριστίες**

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΦΥΚΑ της Δράσης ΚΡΗΠΙΣ της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα.

#### **5. Αναφορές**

- [1] Papadakis J.S., Taroudakis M.I., Papadakis P.J., Mayfield B., “A new method for a realistic treatment of the sea bottom in the parabolic approximation”, *J.Acoust.Soc.Am.* **92**, 2030-2038 (1992).
- [2] Taroudakis M.I. and Makrakis G. “A study of the eigenvalues of the “Depth Problem” in shallow water acoustic propagation modelling over an elastic halfspace” in *Proceedings of the 10th International Congress on Sound and Vibration*, pp. 2547-2553 (2003).
- [3] Zhang, Z.Y and Tindle C.Y. “Complex effective depth of the ocean bottom” *J.Acoust.Soc.Am.* **93**, 205-213 (1992).
- [4] Κρόκος Γ. «Υπολογισμός του ακουστικού πεδίου πάνω από ελαστικό πυθμένα». Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Μαθηματικών (2003).

# Χαρακτηρισμός υποθαλάσσιων ακουστικών σημάτων με χρήση βίο-μαθηματικού μοντέλου των ψυχο-ακουστικών μηχανισμών των Μεγάπττερων φαλαινών.

Κώστας Σμαραγδάκης  
Υποψήφιος διδάκτορας, Πανεπιστήμιο Κρήτης & ITE/IYM  
N. Πλαστήρα 100, 70013, Ηράκλειο Κρήτης  
kesmarag @ tem.uoc.gr

Μιχάλης Ταρουδάκης  
Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Κρήτης & ITE/IYM  
N.Πλαστήρα 100, 70013, Ηράκλειο Κρήτης  
taroud @ math.uoc.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία παρουσιάζεται η αρχή μιας προσπάθειας χαρακτηρισμού τυπικών υποβρύχιων ακουστικών σημάτων χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιώντας κατάλληλο βίο-μαθηματικό μοντέλο το οποίο μιμείται τους ψυχο-ακουστικούς μηχανισμούς του ακουστικού νεύρου των Μεγάπττερων φαλαινών (*Humpback whales*). Το ακουστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται, αντιστοιχίζει ένα ακουστικό σήμα με μια αναπαράσταση (*visual representation*) η οποία περιέχει όλη την πληροφορία του σήματος και παράλληλα δίνει έμφαση σε κρίσιμα χαρακτηριστικά του. Για να ληφθεί αυτή η πληροφορία γίνεται φιλτράρισμα του σήματος σύμφωνα με την μορφολογία και τα χαρακτηριστικά του αυτιού της φάλαινας (*outer-middle ear filtering*), φασματική ανάλυση (*spectral analysis*) καθώς και μοντελοποίηση της κωδικοποίησης που λαμβάνει χώρα στους νευρώνες στους οποίους καταλήγει το ακουστικό της νεύρο (*neural encoding*).

## Characterization of underwater acoustic signals, using a bio-mathematical model of the psycho-acoustic mechanisms of Humpback whales.

### ABSTRACT

*The paper presents a preliminary stage of a method for the characterization of typical low frequency acoustic signals using an appropriate biomimetic toolbox of psychoacoustic functions of Humpback whales. The acoustic model presented here corresponds to a proper visual representation which includes the*

*whole signal information and gives the critical feature data. The above visual representation is capable to simulate the way that hearing system of Humpback whale is stimulated. In order to achieve the appropriate feature extraction we model all hearing functions of whales, starting from the transformation in the outer and middle parts of the ear (outer-middle ear filtering), followed by a model for the passage within the inner part (spectral analysis) and ending with the modeling of the coding in the brain (neural encoding).*

## **Εισαγωγή**

Υπάρχουν σημαντικές ομοιότητες ανάμεσα στους μηχανισμούς παραγωγής και αντίληψης ηχητικών σημάτων από τις φάλαινες με τους αντίστοιχους που συναντάμε στους ανθρώπους και γενικά στα θηλαστικά. Επιπλέον η μορφολογία των ακουστικών οργάνων των Μεγάπττερων φαλαινών, τους εξασφαλίζουν ένα μεγαλύτερο εύρος απόκρισης συχνοτήτων και μια δυνατότητα διάκρισης μεταξύ των ήχων πολύ μεγαλύτερη από τη δική μας. Σε αυτό σημαντική επίδραση φαίνεται να έχει η πυκνότερη κατανομή ακουστικών νευρών σε σχέση με τα χερσαία θηλαστικά.

Παρά το γεγονός ότι η φύση των ήχων που παράγουν και ο τρόπος που τους επεξεργάζονται παραμένει μυστήριο έχει αποδειχθεί ότι οι Μεγάπτερες φάλαινες μπορούν να ακούσουν ήχους πολύ χαμηλής συχνότητας της τάξης των 30 Hz έως και πολύ υψηλής 20–30 kHz [1]. Η βασική παραδοχή στην προηγούμενη πρόταση είναι ότι όλα τα είδη μπορούν να ακούν τουλάχιστον το εύρος των συχνοτήτων που μπορούν να παράγουν. Επίσης ένα σημαντικό γνώρισμα του ακουστικού συστήματος των Μεγάπττερων φαλαινών αποτελεί το γεγονός ότι έχουν στενότερη κρίσιμη ζώνη συχνοτήτων θορύβου, σε σχέση με τα άλλα θηλαστικά, που θα μπορούσε να τις αποπροσανατολίσει και να τους αποκόψει χρήσιμες ακουστικές πληροφορίες.

Στη παρούσα εργασία θα γίνει η θεωρητική παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου που θα εφαρμοστεί πρακτικά σε μελλοντικές εργασίες με κύριο στόχο να μελετηθεί αφενός μεν κατά πόσο μπορούν ήχοι που παράγονται από ανθρώπινη δραστηριότητα είναι ικανοί να αποπροσανατολίσουν τις Μεγάπτερες φάλαινες μπερδεύοντας τις και αφετέρου κατά πόσο μπορούν να διακρίνουν ψυχο-ακουστικά τις διαφορές σχεδόν όμοιων σημάτων. Απώτερος σκοπός είναι να μελετηθεί η κατασκευή ενός βιο-μιμητικού μοντέλου το οποίο θα χαρακτηρίζει επαρκώς ακουστικά σήματα δίνοντας έμφαση σε κρυμμένα χαρακτηριστικά τους, αντικαθιστώντας κλασσικές μεθόδους όπως μετασχηματισμούς Fourier και κυμματιδίων (wavelets), μιμούμενοι τον τρόπο ακουστικής αντίληψης των Μεγάπττερων φαλαινών.

### **1 Βιομαθηματικό μοντέλο ακουστικού συστήματος των Μεγάπττερων φαλαινών.**

Οι διαδικασίες λήψης και επεξεργασίας ήχων από τις Μεγάπτερες φαλαίνες πραγματοποιούνται από τρεις διακριτές διαδοχικές διαδικασίες. Σε αυτή την ενότητα θα αντιστοιχίσουμε κάθε μια από τις φυσικές διαδικασίες με ένα κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο. Τα τρία αυτά μοντέλα θα προσομοιώνουν όλους τους μετασχηματισμούς των σημάτων από τη λήψη τους έως και την επεξεργασία τους



στους νευρώνες του εγκεφάλου της Μεγάπτερης φάλαινας καθώς και τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η αυτόματη συνεχής εκπαίδευση της που έχει ως στόχο την κατηγοριοποίηση των ήχων που λαμβάνει και την άντληση πληροφορίας.

### 1.1 Μηχανισμός παραγωγής ήχων από τις Μεγάπτερες φάλαινες

Προτού ασχοληθούμε με τη λειτουργία ακοής των Μεγάπτερων φαλαινών κρίνεται απαραίτητο να παρουσιάσουμε μερικά στοιχεία του συστήματός παραγωγής ήχων από τις ίδιες.

Ένα τυπικό μοντέλο χαρακτηρισμού της παραγωγής ήχων στα θηλαστικά αποτελεί αυτό της πηγής - φίλτρου (source-filter model) [2]. Τη πηγή στις φάλαινες αποτελεί ένας μηχανισμός ανατάραξης του αέρα (air turbulence) ενώ το φίλτρο προσομοιώνει το μετασχηματισμό του σήματος που παράγαγε η πηγή κατά τη μεταφορά του κατά μήκος της φωνητικής οδού (vocal tract). Η μορφολογία της φωνητικής οδού μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της εκπομπής ήχων από τις φάλαινες αλλάζοντας με αυτό τον τρόπο τη μορφή του φίλτρου. Παρόλα αυτά, τα φίλτρα παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα παρουσιάζουν ενίσχυση σε  $p$  διακριτές συχνότητες οι οποίες ονομάζονται formants. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η τιμή του  $p$  είναι μεταξύ του 4 και του 6.

Κάθε formant μπορεί να εκφραστεί με ένα διακριτό φίλτρο δεύτερης τάξης που δρα πάνω στη σειρά των παλμών που παράγονται στη πηγή. Έτσι, εάν θέλουμε να περιγράψουμε την απόκριση του φίλτρου της φωνητικής οδού θα χρειαστούμε  $p$  φίλτρα δεύτερης τάξης καθώς και ένα φίλτρο πρώτης τάξης που προσομοιώνει την φασματική αποζημίωση (spectral compensation) λόγω σφαλμάτων επικάλυψης μεταξύ των φίλτρων. Συμφωνά με την θεωρία επεξεργασίας σήματος το συνολικό φίλτρο θα είναι τάξης  $2p + 1$  και θα ακολουθεί τη σχέση:

$$X(\omega) = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^{2p+1} c_k e^{-i\omega k}} S(\omega) \quad (1)$$

Όπου  $X(\omega)$  το φάσμα του ήχου που θα διαδοθεί στο περιβάλλον και  $S(\omega)$  η συνάρτηση διέγερσης της πηγής στο πεδίο συχνοτήτων η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως σειρά από παλμούς λευκού θορύβου κατά το διάστημα λειτουργίας της. Σημειώνουμε ότι οι συντελεστές  $c_k$  προσδιορίζουν πλήρως τη θέση και το πλάτος των formants.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των συντελεστών  $c_k$  αποτελεί το γεγονός ότι μεταβάλλονται πολύ αργά με μεταβολές της τάξης των  $10ms$  κατά την διαδικασία παραγωγής ήχων από τις Μεγάπτερες φάλαινες. Μάλιστα χαρακτηριστικά στην ανθρώπινη ομιλία παρατηρείται αλλαγή σε χρόνους που σχετίζονται με το χρόνο μετάβασης μεταξύ διαδοχικών συλλαβών. Στο μοντέλο μας θα υποθέσουμε παράθυρο χρόνου ίσο με  $50ms$  το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία από τον Mercano [3].

### 1.2 Γραμμική ανάλυση φάσματος των ήχων που λαμβάνει η Μεγάπτερη φάλαινα.

Σε αυτό το πρώτο στάδιο επεξεργασίας των ήχων, οι φάλαινες αντιλαμβάνονται ήχους από το περιβάλλον πάνω από ένα σκαλοπάτι έντασης και τους επεξεργά-

ζονται σε διαδοχικά στοιχειώδη τμήματα (frames) της τάξης των 50ms.

Στη συνέχεια αξιοποιώντας την μορφολογία του εξωτερικού και μεσαίου τμήματος του αυτού τους καταφέρνουν να ομαλοποιήσουν τους ήχους κάθε τμήματος ήχου έτσι ώστε να ενισχύσουν τα κοινά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα σήματα που εκπέμπουν οι ίδιες. Ουσιαστικά αυτό που γίνεται αποτελεί μια πρώτη εξομάλυνση της κυματομορφής ανακτώντας τη μορφή της απόκρισης του φίλτρου της φωνητικής οδού, ενισχύοντας τις ωφέλιμες συχνότητες (formants) και ως συνέπεια τα σήματα να γίνονται απλούστερα, εξαλείφοντας μη ωφέλιμες πολύπλοκες δομές που προέρχονται από θόρυβο.

Η παραπάνω διαδικασία έχει μοντελοποιηθεί στο παρελθόν με χρήση Αντιληπτικής γραμμικής προσέγγισης σήματος (Perceptual Linear Prediction - PLP) [4] και έχει βρει εφαρμογές για τη μελέτη του ακουστικού συστήματος του συνόλου των θηλαστικών και μάλιστα στις τεχνικές αναγνώριση φωνής στους ανθρώπους.

Έστω  $x[n]$  το σήμα που φτάνει στη φάλαινα για κάθε διακριτό χρόνο  $n$ . Το εξωτερικό τμήμα του αυτιών της λαμβάνει το ερέθισμα και φιλτράρει το σήμα με στόχο να ανακτήσει τη απόκριση του φίλτρου της ακουστικής οδού προσμένοντας ότι το σήμα που έλαβε προέρχεται από φάλαινα. Χρησιμοποιώντας την παραδοχή ότι το σήμα που προέρχεται από ήχους φαλαινών έχει χρονική συνοχή και δεν γίνονται τυχαίες μεταβάσεις είμαστε σε θέση να εκφράσουμε το σήμα το διακριτό χρόνο  $n$  ως γραμμικό συνδυασμό του ίδιου στους  $2p+1$  προηγούμενους χρόνους με σχετικά μικρό σφάλμα προσέγγισης  $e[n]$ , δηλαδή

$$x'[n] = \sum_{k=1}^{2p+1} a_k x[n-k] \quad (2)$$

όπου  $p$  εκφράζει τον αριθμό των formants που ορίσαμε πριν.

Είναι φανερό ότι σφάλμα  $e$  της προσέγγισης ικανοποιεί τη ακόλουθη σχέση στο πεδίο του χρόνου :

$$e[n] = x[n] - \sum_{k=1}^{2p+1} a_k x[n-k] \quad (3)$$

Παίρνοντας το μετασχηματισμό Fourier των δύο μερών έχουμε:

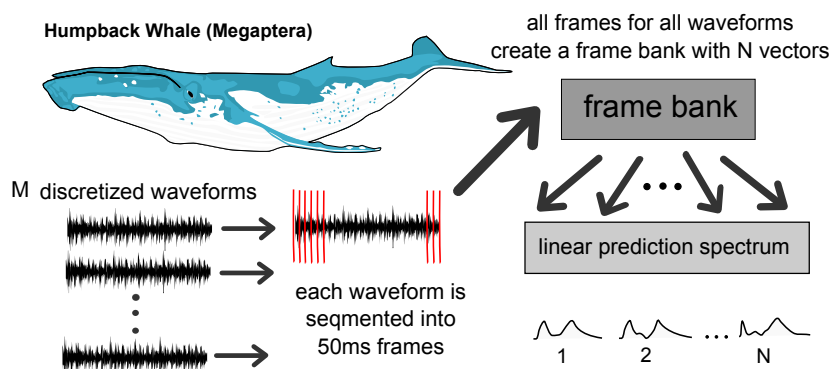
$$X(\omega) = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^{2p+1} a_k e^{-ik\omega}} E(\omega) \quad (4)$$

Παρατηρούμε ότι η παραπάνω σχέση έχει ίδια μορφή με την σχέση 1 του μοντέλου πηγής - φίλτρου με το  $E$  και εδώ να περιγράφει λευκό θόρυβο. Μένει να βρούμε το κατάλληλο διάλυμα των συντελεστών  $a$  το οποίο ελαχιστοποιεί το σφάλμα προσέγγισης  $e[n]$  το οποίο επιτυγχάνουμε λύνοντας το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης :

$$\alpha' = \arg \min_{\alpha} \|e\|_2 \quad (5)$$

Ως αποτέλεσμα έχουμε μια προσέγγιση των συντελεστών  $c_k$  από τους αντίστοιχους συντελεστές  $\alpha'_k$ .

Το παραπάνω φάσμα που προσεγγίζει το φίλτρο της φωνητικής οδού ονομάζεται φάσμα γραμμικής προσέγγισης (linear prediction spectrum) και αποτελεί ένδειξη της πραγματικής πληροφορίας που λαμβάνεται ως είσοδο στο ακουστικό νεύρο η οποία θα υποστεί στη συνέχεια φασματική ανάλυση. Όπως έγινε αντιληπτό οι φάλαινες έχουν μηχανισμούς τέτοιους που βελτιστοποιούν την αντίληψη τους σε ήχους που παράγουν οι ίδιες ωστόσο παραμένει άγνωστο πως αυτό το μοντέλο χαρακτηρίζει ξένες ως προς αυτές κυματομορφές. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται γραφικά η παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 1.1 Μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την επεξεργασία στο εξωτερικό - μεσαίο τμήμα του αυτιού της Μεγάπτερης φάλαινας.

### 1.3 Φασματική ανάλυση στο εσωτερικό τμήμα (cochlear filtering) των αυτιών της Μεγάπτερης φάλαινας.

Η φασματική ανάλυση προσομοιώνει τη λειτουργία του εσωτερικού τμήματος του αυτιού (ακουστικού νεύρου). Ως είσοδο λαμβάνει τη ακολουθία φασμάτων γραμμικής προσέγγισης των frames διάρκειας 50ms που αποτελούν ένα σήμα. Με άλλα λόγια λαμβάνει τα αποτελέσματα του μοντέλου που περιγράφηκε παραπάνω και παράγει μια ακολουθία από προσαρμοσμένα φάσματα που το καθένα θα περιγράφεται από  $L$  συχνότητες της σχεδόν λογαριθμικής κλίμακας ERB [5] η οποία ορίζεται βάση τα χαρακτηριστικά του ακουστικού κοχλίου (cochlear) ως :

$$ERB = B + f_c/Q \quad (6)$$

όπου  $B$  είναι το ελάχιστο πλάτος του φίλτρου,  $f_c$  η κεντρική συχνότητα του φίλτρου και  $Q$  ο συντελεστής ποιότητας (quality factor). Έχει βρεθεί ότι στις Μεγάπτερες φάλαινες κατάλληλες τιμές είναι  $B = 10$  και  $Q = 10$  [6].

Ο κοχλίας συμπεριφέρεται ως ένα σύνολο από κατάλληλα Gammatone φίλτρα [7] τα οποία διαχωρίζουν τις συχνότητες τοπολογικά κατά μήκος της βασικής μεμβράνης του ακουστικού νεύρου (basilar membrane) η οποία έχει μήκος 58mm. Κάθε μεμονωμένο φίλτρο προσδιορίζεται από μια κεντρική συχνότητα  $f_c$  και ένα πλάτος (bandwidth)  $\Delta f$ . Η παρακάτω σχέση περιγράφει τη μορφή των φίλτρων που χρησιμοποιούνται

$$g(t) = at^{n-1}e^{-2\pi\Delta f t} \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (7)$$

όπου  $f_c$  η κεντρική συχνότητα,  $\phi$  η φάση,  $a$  το πλάτος,  $n$  η τάξη,  $\Delta f$  το πλάτος του φίλτρου και  $t$  ο χρόνος.

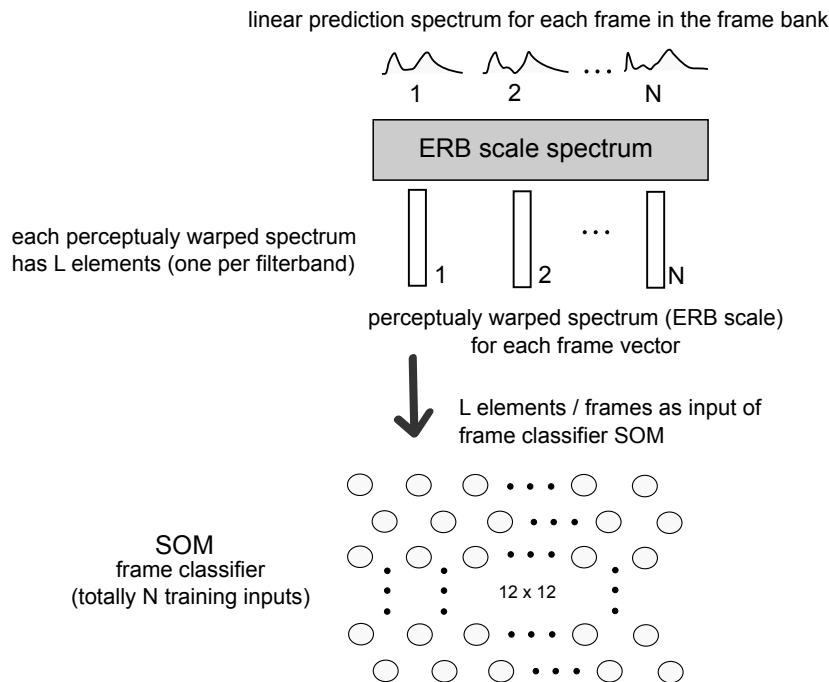
Σημειώνουμε ότι οι κεντρικές συχνότητες δεν ακολουθούν γραμμική κλίμακα κατά μήκος της βασικής μεμβράνης αντιθέτως ακολουθούν την καμπύλη

$$f_c(x) = 240(10^{0.0362x} - 0.958) \quad (8)$$

όπου το  $x$  εκφράζει την απόσταση κατά μήκος της βασικής μεμβράνης. Οι βασισμένες σε ανθρώπους μελέτες σχετικά με την απόσταση διαδοχικών φίλτρων έχουν δώσει ως αποδεκτή τιμή τα  $0.89mm$ . Γνωρίζοντας ότι τα φίλτρα έχουν την ίδια μορφή στις φάλαινες και παράλληλα ότι είναι πιο πυκνά σε αυτές μας κάνει να σκεφτούμε τη χρήση μιας λίγο μικρότερης απόστασης.

Ως αποτέλεσμα της ανάλυσης που περιγράφηκε σε αυτή την ενότητα παίρνουμε το χαρακτηρισμό κάθε τμήματος ενός ήχου με ένα διάνυσμα  $L$  στοιχείων, του οποίου το κάθε στοιχείο θα δηλώνει την απόκριση του κάθε ήχου διάρκειας  $50ms$  σε κάθε ένα από τα  $L$  Gammatone φίλτρα.

#### 1.4 Νευρωνική κωδικοποίηση και κατηγοριοποίηση των τμημάτων των ήχων που καταλήγουν στο εγκεφαλικό στέλεχος.



Σχήμα 1.2 Self Organizing Map (SOM) για τη κατηγοριοποίηση των ηχητικών τμημάτων (frames) στον εγκέφαλο της Μεγάπτερης φάλαινας.

Σε αυτό το στάδιο γίνεται η περιγραφή με χρήση ενός Self Organizing Map (SOM) [8] νευρωνικού δικτύου η εκ των υστέρων επεξεργασία των φασμάτων τα οποία κωδικοποιήθηκαν στο κοχλία, στους νευρώνες του εγκεφάλου. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εφαρμοστεί επιτυχώς για το χαρακτηρισμό εγγενών στις φάλαινες σημάτων [9].

Τα SOMs είναι Νευρωνικά δίκτυα τα οποία εκφράζουν με μαθηματικό τρόπο την διαδικασία αυτο-εκμάθησης χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε είδους. Η μόνη εκ' των προτέρων πληροφορία που απαιτούν είναι τα δεδομένα εισόδου σε αντίθεση των κλασικών νευρωνικών δικτύων που απαιτούν ζεύγη δεδομένων-αποτελεσμάτων για την εκπαίδευσή τους.

Ξεκινώντας από  $M_1$  ήχους από φάλαινες και από ένα μικρότερο αριθμό  $M_2$  από απλές υποθαλάσσιες πηγές και αναλύοντας το καθένα από αυτά σε στοιχειώδη τμήματα των  $50ms$  παράγουμε  $N_1$  frames από εγγενείς ήχους φάλαινων και αντίστοιχα  $N_2$  από ανθρωπογενείς ήχους. Το σύνολο των  $N = N_1 + N_2$  frames αποτελεί τη τράπεζα των ηχητικών τμημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή δεδομένων εισόδου του SOM και στη συνέχεια θα το εκπαιδεύσουν.

Στο εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο που θα προκύψει θα έχει πραγματοποιηθεί διαχωρισμός των  $N$  διανυσμάτων εισόδου σε ένα τοπολογικό πλέγμα 2 διαστάσεων όπως φαίνεται στο 1.2.

Παρότι δεν θα παρουσιάσουμε λεπτομέρειες της εκπαίδευσης ενός SOM κρίνεται απαραίτητο να εκθέσουμε με συντομία τις διαδικασίες στο τυχαίο βήμα εκπαίδευσης  $k$ . Στο βήμα αυτό οι νευρώνες στα SOMs οι οποίοι έχουν τιμές που ανήκουν στο διανυσματικό χώρο διάστασης ίσης με το διάνυσμα εισόδου  $s_k$  του δικτύου, περιγράφονται με τα διανύσματα  $w_{ij}$ , όπου  $i, j$  οι συντεταγμένες του κάθε νευρώνα στο πλέγμα. Στη συνέχεια επιλέγεται ο νευρώνας του πλέγματος που είναι πλησιέστερος ως προς την ευκλείδεια νόρμα στο διάνυσμα των δεδομένων, δηλαδή:

$$w_{winner} = \arg \min_{w_{ij}} \|s_k - w_{ij}\|_2 \quad (9)$$

Λέμε ότι ο παραπάνω νευρώνας πυροδοτείται και ακολουθεί η προσαρμογή του ίδιου αλλά και τον γειτονικών νευρώνων στο πλέγμα ώστε το δίκτυο να ταιριάζει ακόμη καλύτερα στο διάνυσμα δεδομένων. Η προσαρμογή γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$w_{ij}^{new} = w_{ij} + \alpha_k h(w_{winner}, w_{ij}) \|s_k - w_{ij}\|_2 \quad (10)$$

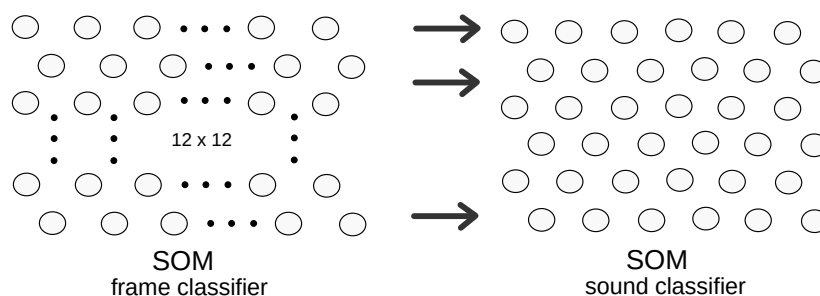
όπου  $0 < \alpha_k < 1$  ο ρυθμός εκμάθησης στο  $k$  στάδιο εκπαίδευσης και  $h(\cdot)$  η απόσταση δύο νευρώνων στο πλέγμα. Σημειώνουμε ότι το  $\alpha_k$  θα τείνει προοδευτικά στο μηδέν προσομοιώνοντας τη πραγματική λειτουργία της μάθησης στην οποία όταν υπάρχει ήδη μεγάλη έκθεση σε ερεθίσματα (εμπειρία) ο εγκέφαλος δεν μπαίνει σε διαδικασία εκμάθησης.

Η χρήση  $12 \times 12 = 144$  νευρώνων φαίνεται καλή επιλογή για το μοντέλο μας αν λάβουμε υπόψιν ότι προηγούμενες υλοποιήσεις που αξιοποιούσαν μόνο ήχους φάλαινων απαιτούσαν  $10 \times 10 = 100$  νευρώνες [9,10]. Στο σχήμα 1.2 βλέπουμε τα στάδια κωδικοποίησης που περιγράφηκαν.

Αντικείμενο μελέτης μελλοντικών εργασιών είναι να διερευνήσουμε τη κατανομή των frames που αντιστοιχούν στους ανθρωπογενείς ήχους στους νευρώνες

του νευρωνικού πλέγματος και το κατά πόσον έχουμε τοπολογικό διαχωρισμό μεταξύ εγγενών και μη, ηχητικών frames.

## 2 Χρήση του μοντέλου για χαρακτηρισμό γενικών ακουστικών σημάτων.



Σχήμα 2.1 *Self Organizing Map (SOM)* με στόχο το χαρακτηρισμό ήχων στον εγκέφαλο της Μεγάπτερης φάλαινας.

Παρά το γεγονός ότι το νευρωνικό δίκτυο που περιγράφηκε παραπάνω, ομαδοποιεί τα frames σε 144 διακριτές κατηγορίες, οι ήχοι που φτάνουν στις φάλαινες αποτελούνται από μια σειρά από frames που το καθένα μπορεί να περιγραφεί με τον παραπάνω τρόπο. Επιπλέον δεν έχουν όλα τα σήματα την ίδια διάρκεια και έτσι είναι δύσκολο σε αυτό το μοντέλο να χαρακτηρίσουμε ολόκληρους ήχους. Για το λόγο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς ένα δεύτερο SOM [8] το οποίο έχει ως είσοδο στατιστικά χαρακτηριστικά του αλλαγής διατάξης των frames πάνω στο πρώτο νευρωνικό δίκτυο καθώς εξελίσσεται ο ήχος. Με αυτό το τρόπο το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο είναι ικανό να κατηγοριοποιήσει ολόκληρες κυματομορφές.

Στο παρελθόν έχει γίνει χαρακτηρισμός ήχων που παράγουν οι φάλαινες με χρήση συνολικά  $5 \times 5 = 25$  νευρώνων στο δεύτερο SOM. Ο αριθμός αυτός προκύπτει έτσι ώστε να υπερκαλύπτει τη γκάμα των φανερά διαφορετικών ήχων που παράγουν οι φάλαινες. Με το τρόπο αυτό κατάφεραν να κατηγοριοποιήσουν τους διάφορους ήχους και να γίνει αντιληπτό το πως μια φάλαινα αντιλαμβάνεται τους εγγενείς σε αυτήν ήχους. Η ιδέα στο μοντέλο μας είναι να επεκτείνουμε αυτή τη διαδικασία λαμβάνοντας υπόψη και ήχους από το περιβάλλον της και αυτό θα το επιτύχουμε αυξάνοντας το πλήθος των διαθέσιμων νευρώνων που αποσκοπούν στην κατηγοριοποίηση σε πλήθος  $6 \times 6 = 36$  όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Με αυτό το τρόπο θέλουμε να δούμε συνολικά εάν μια φάλαινα μπορεί να αντιληφθεί έναν ανθρωπογενή ήχο σαν δικό της ή σαν ήχο άλλης φάλαινας. Δηλαδή, να εξετάσουμε εάν ένας εξωτερικός ήχος είναι ικανός να την αποπροσανατολίσει. Επίσης θέλουμε να δούμε για παρόμοιους ανθρωπογενείς ήχους εάν υπάρχει σύγκληση του χαρακτηρισμού τους, δηλαδή για μικρές μεταβολές σε ένα ήχο εάν διεγερθούν αντίστοιχα ίδιοι ή κοντινοί νευρώνες του πλέγματος και κατά επέκταση τη μελέτη της ευαισθησίας που παρουσιάζει η φάλαινα στο να καταλαβαίνει τις μικρές κριμένες διαφορές γενικών ακουστικών σημάτων.

### 3 Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΦΥΚΑ της Δράσης ΚΡΗΠΙΣ της ΓΓΕΤ. Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο Πλαίσιο του ΕΣΠΑ και του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα.

### 4 Αναφορές

- [1] D.R. Ketten «The cetacean ear: Form, frequency and evolution» in *Marine mammal sensory system* J.A.Thomas, R.A. Kastelein and A.Y. Supin. Plenum press, pp. 53-75, New York (1992)
- [2] K. Johnson «Acoustic and auditory phonetics» *Phonetica (International Journal of Phonetic Science)* 61(1), pp 56-58 (2004)
- [3] E. Mercado, J.N. Schneider, A.A Pack and L.M. Herman «Sound production by singing humpback whales» *J.Acoust. Soc. Am.* 127(4), pp 2678-2691 (2010)
- [4] H. Hernansky «Perceptual linear predictive (PLP) analysis of speech» *J.Acoust. Soc. Am.* 87(4), pp 1738-1752 (1990)
- [5] B.C.J. Moore and B.R. Glasberg «Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns» *J.Acoust. Soc. Am.* 74(3), pp 750-753 (1983)
- [6] D.R. Ketten «Functional analysis of whale ears: Adaptions for underwater hearing» *I.E.E.E proc. Under. Acoust.* vol 1, pp 264-270 (1994)
- [7] R. Patterson, I. Nimmo-Smith, J. Holdsworth, and P. Rice «An efficient auditory filterbank based on the gammatone function» APU report, 2341, (1987).
- [8] T. Kohonen «Self-Organized formation of topologically correct feature maps» *Biological Cybernetics*, vol 43(1), pp. 59-69, (1982)
- [9] S.O. Murray, E. Mercado and H.L. Roitblat «Characterizing the graded structure of false killer whale (*Pseudorca crassidens*) vocalization» *J.Acoust. Soc. Am.* 104, pp 1679-1688 (1998)
- [10] S.O. Murray, E. Mercado and H.L. Roitblat «The neural network classification of false killer whale (*Pseudorca crassidens*) vocalization» *J.Acoust. Soc. Am.* 104, pp 1679-1688 (1998)

# **Ανάπτυξη πολυμεσικής εφαρμογής για τη διδασκαλία του ήχου και της μουσικής σε μαθητές με ειδικές εκπαιδευτικές δυσκολίες**

Ε. Γ. Καψούρα<sup>1,a</sup>, Ρ. Γ. Κωτσάκης<sup>1,b</sup> & Γ. Μ. Καλλίρης<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Μ.Μ.Ε., Τμήμα Δημοσιογραφίας και Μ.Μ.Ε., Α.Π.Θ.

<sup>a</sup> [eniw\\_kap@yahoo.gr](mailto:eniw_kap@yahoo.gr), <sup>b</sup> [rkotsakis@gmail.com](mailto:rkotsakis@gmail.com), <sup>c</sup> [gkal@jour.auth.gr](mailto:gkal@jour.auth.gr)

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η επιστήμη της Παιδαγωγικής στρέφεται τα τελευταία χρόνια στην αξιοποίηση και τη χρήση νέων μεθόδων διδασκαλίας, στηριζόμενων στις δυνατότητες των νέων τεχνολογιών, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη πολυμεσικών και πολυτροπικών περιεχομένων διδασκαλίας. Οι τεχνολογίες του ήχου και της εικόνας δύναται να αξιοποιηθούν και στο χώρο της Εκπαίδευσης και ειδικότερα στην Ειδική Αγωγή, προωθώντας ενεργά την προσέγγιση της πολλαπλής αναπαράστασης, την απλοποίηση και την αμεσότητα της παρεχόμενης γνώσης σύμφωνα με τις βασικές αρχές προσέγγισης της μάθησης για ΑμεΑ. Η παρούσα εργασία αφορά στην δημιουργία ψηφιακού εκπαιδευτικού πολυμεσικού υλικού, για την υποστήριξη της διδασκαλίας του ήχου και της μουσικής στην Γενική Ενιαία τάξη ή στην Ειδική Αγωγή και Εκπαίδευση. Το εκπαιδευτικό περιεχόμενο δομείται με βάση το θεωρητικό πλαίσιο των εκπαιδευτικών λογισμικών, λαμβάνοντας υπόψη τις Θεωρίες Μάθησης για μαθητές με γνωστικές αναπηρίες.*

## ***Development of a multimedia application for teaching sound and music to students with special needs***

### **ABSTRACT**

*In the last years, the pedagogical research is focused on using new teaching methods that are based on new technologies, emphasizing in the development of multimedia and multimodal educational content. Image and sound technologies can be also used in the field of Special Education by using multivariate, simple and direct representations of the provided knowledge, that are part of the basic teaching principles for people with Special Abilities. In this paper, we propose the development of an application that uses multimedia digital content, aiming to support sound and music teaching in inclusive or special classroom. The proposed educational content and software development are structured according to fundamental learning theories for students with learning disabilities.*

### **Εισαγωγή**

Η κοινή παραδοχή ότι υπάρχουν σημαντικές ατομικές διαφορές στον τρόπο που μαθαίνουν οι μαθητές, έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε αύξηση του



ερευνητικού και θεωρητικού ενδιαφέροντος για την εύρεση στρατηγικών και μεθόδων διαφοροποίησης της διδασκαλίας [1],[2], έτσι ώστε αυτή να προσαρμόζεται στις μαθησιακές προτιμήσεις και ανάγκες όλων των μαθητών. Στο πλαίσιο αυτό, η ερευνητική δραστηριότητα στρέφεται προς την ενδεχόμενη βοήθεια που μπορούν να προσφέρουν οι τεχνολογίες του ήχου και της εικόνας, σε άτομα με ειδικές εκπαιδευτικές ανάγκες [3]-[5]. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η δημιουργία διαφοροποιημένου και πολυτροπικού, πολυμεσικού εκπαιδευτικού υποστηρικτικού υλικού, για την διδασκαλία του μαθήματος της Μουσικής σε μαθητές με αναπηρία (όπως ελαφρά και μέτρια νοητική αναπηρία, δυσλεξία κτλ.). Για να επιτευχθούν τα πλέον αποδοτικά εκπαιδευτικά αποτελέσματα, το υλικό που συγκεντρώθηκε και αναπτύχθηκε, είναι ενταγμένο και εναρμονισμένο στις κατευθυντήριες γραμμές οργάνωσης της διδασκαλίας που παρέχονται στο Πρόγραμμα Σπουδών της Μουσικής, όπως αυτό παρουσιάζεται στο διδακτικό εγχειρίδιο της Γ΄ Δημοτικού. Απώτερος στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός δημιουργικού και υποστηρικτικού συνόλου δυνατοτήτων και βιωμάτων μάθησης, στηριγμένου στις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες του ήχου και της εικόνας, για την δυναμική συμμετοχή των παιδιών με αναπηρία στο μάθημα της Μουσικής. Ο Ήχος και η Μουσική αποτέλεσαν δυο από τα πιο σημαντικά, δομικά στοιχεία της εφαρμογής, αναφορικά πάντοτε με το αντικείμενο που διδάσκεται. Επιπλέον, επιχειρήθηκε αξιολόγηση του υλικού, που πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια καθηγητών μουσικής, στη βάση αποτίμησης της αξίας και λειτουργικότητας των πολυμεσικών εφαρμογών σε μαθητές με αναπηρία.

## **1. Ορισμός του προβλήματος**

Η χρήση πολυμεσικού υλικού, αποτελεί σημαντικό διδακτικό μέσο, επιτρέποντας την προσαρμογή της διδασκαλίας στις ιδιαιτερότητες κάθε μαθητή, υποστηρίζοντας έτσι την διακηρυγμένη αρχή για μια Εκπαίδευση για Όλους [6], ανεξάρτητα από το νοητικό τους δυναμικό [7]. Η αξιοποίηση της οπτικής και ηχητικής αναπαράστασης της πληροφορίας παρακινεί τους μαθητές δημιουργώντας ένα περιβάλλον περισσότερο δημιουργικό και διασκεδαστικό [8]-[10]. Ιδιαίτερα στο πλαίσιο της μουσικής αγωγής, που φέρει σύνθετο, μουσικό και πρακτικό συνάμα χαρακτήρα, η χρήση του ήχου έχει διττή σημασία, καθώς αποτελεί τόσο το περιεχόμενο της ίδιας της διδασκαλίας, όσο παράλληλα εξυπηρετεί τους λειτουργικούς σκοπούς της μάθησης, επιβεβαιώνοντας την ωφέλιμη σύμπραξη της μουσικής με την τεχνολογία [3],[4].

Πιο συγκεκριμένα, έχουν καταγραφεί ποικίλες περιπτώσεις, στις οποίες μαθητές με αναπηρία έχουν αποκτήσει πρόσβαση σε ασκήσεις και μαθησιακές δραστηριότητες από τις οποίες ήταν αποκλεισμένοι [5],[11]. Τα παιδιά με γνωστικές αναπηρίες είναι πιθανό να παρουσιάζουν σοβαρές δυσκολίες στην κατανόηση κειμένων και θεωριών, στην ανάγνωση, στη γραφή, στην επίλυση προβλημάτων, στην προσοχή και στη μνημόνευση [12]-[14]. Η διδασκαλία με πολυαισθητηριακές τεχνικές αποκτά όλο και μεγαλύτερη αποδοχή, καθώς ο ήχος και η εικόνα έρχονται να συμβάλουν στην ευκολότερη κατανόηση του αναγνωστικού κειμένου, ιδιαίτερα μάλιστα για τα παιδιά με δυσλεξία [14].

Η προσπάθεια ένταξης των νέων τεχνολογιών στην Ειδική Αγωγή και Εκπαίδευση βρίσκεται ακόμα σε πρωταρχικά στάδια στην Ελλάδα. Μόλις την τελευταία πενταετία το Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων και το Παιδαγωγικό Ινστιτούτο έχουν στρέψει την προσοχή τους στην ένταξη των ΤΠΕ στην Ειδική Αγωγή και Εκπαίδευση, υλοποιώντας ποικίλα εκπαιδευτικά

προγράμματα [11]. Παρόλα αυτά, τα περισσότερα λογισμικά αφορούν άλλα διδακτικά αντικείμενα, ενώ οι εφαρμογές για την μουσική απευθύνονται κυρίως σε χρήστες με περιορισμένες κινητικές δυνατότητες και καλύπτουν τις ανάγκες τους να συνθέτουν, να ακούν και να παίζουν μουσική [3]. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, η προτεινόμενη εφαρμογή της παρούσας εργασίας αποσκοπεί να ικανοποιήσει τις εκπαιδευτικές ανάγκες μαθητών με πολύπλευρα μαθησιακά προβλήματα και ιδιαιτερότητες.

## 2. Μεθοδολογία - Υλοποίηση

Βασική αρχή για την δημιουργία και την ανάπτυξη του υλικού ήταν η εφαρμογή της διδακτικής σχεδίασης (instructional design) [8], η οποία οργανώθηκε στη βάση των διδακτικών προτάσεων των συγγραφέων του βιβλίου, σε συνδυασμό με τις θεωρίες μάθησης για άτομα με νοητική αναπηρία και τα αναλυτικά Προγράμματα ΑΠΣ-ΔΕΠΣ του ΥΠΕΘ.

Η παραγωγή της εφαρμογής οργανώθηκε σε διακριτές φάσεις εργασίας, σύμφωνα με το μοντέλο ADDIE (Analysis-Design-Development/Production-Implementation-Evaluation) [8]. Στο στάδιο της ανάλυσης, καθορίστηκαν οι προτεραιότητες και οι απαραίτητες ενέργειες, που αφορούσαν την οργάνωση των τεχνολογικών και παιδαγωγικών χαρακτηριστικών. Ειδικότερα, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα μαθήματα σχετικά με τον ήχο και τις ιδιότητες του, στα οποία δύναται να ανταποκριθούν οι χρήστες και λήφθηκαν κατάλληλες αποφάσεις για τον διαφοροποιημένο τρόπο παρουσίασης της ύλης, σε συνάρτηση με τις διαθέσιμες τεχνολογικές δυνατότητες (technology analysis) [8]. Παράλληλα, κρίθηκε απαραίτητο η εφαρμογή να απευθύνεται σε αρκετά χαμηλά ηλικιακά επίπεδα, δεδομένου του γεγονότος ότι η νοητική ηλικία των μαθητών με αναπηρία υπολείπεται της πραγματικής τους [12]. Επιπρόσθετα, μια κύρια δυνατότητα κατά τη χρήση της εφαρμογής αφορά την ανεξαρτησία της από την παρουσία του δασκάλου (users analysis-situational analysis), τονώνοντας έτσι την αυτοπεποίθηση των χρηστών και δίνοντάς τους κίνητρα για μάθηση [13]. Στο πλαίσιο αυτό, οι λειτουργίες της εφαρμογής επιμερίστηκαν σε απλές βασικές εργασίες (task analysis) και καθορίστηκαν οι στόχοι (objective analysis) για τις βασικές κατηγορίες μάθησης [15]. Κατά συνέπεια, η στρατηγική σχεδιασμού της εφαρμογής στηρίχθηκε: α) στην παρουσίαση πληροφοριών από τις επιλεγμένες διδακτικές ενότητες του βιβλίου σε απλοποιημένη μορφή με κατανοητή γλώσσα (βασική γνώση), β) στην προσθήκη οπτικοακουστικού πολυμεσικού υλικού -ήχος, εικόνες, βίντεο, κινούμενα γραφικά- (κατανόηση), γ) στη διαμόρφωση απλών ασκήσεων αξιολόγησης, που επιτρέπουν τη διερεύνηση επαναχρησιμοποίησης της κατακτηθείσας γνώσης σε νέα προβλήματα (εφαρμογή - ανάλυση- σύνθεση) και δ) στη σχεδίαση διαδραστικών παιχνιδιών που βοηθούν τους μαθητές στην αξιολόγηση της δικής τους μάθησης, αλλά και στην άμεση ανατροφοδότησή τους σχετικά με την κατάκτηση των στόχων κάθε μαθήματος. Όσον αφορά τις αξιολογικές δραστηριότητες αποφασίστηκε να στηριχθούν σε βασικές οδηγίες σχετικά με την χρήση και κίνηση του ποντικιού στην οθόνη (ψυχοκινητική-κινητική μάθηση) και να εμπλουτιστούν με δραστηριότητες ενεργητικής ακρόασης (συναισθηματική μάθηση) [15],[16].

Στη 2<sup>η</sup> φάση της σχεδίασης καταγράφηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο στάδιο της ανάλυσης και συστάθηκε το Έγγραφο Προδιαγραφών Έργου (ΕΠΕ) [8], στο οποίο καθορίστηκαν με λεπτομέρεια: α) η δομή β) η οργάνωση του περιεχομένου γ) η μορφή της διεπιφάνειας χρήστη και των διαδραστικών

δυνατοτήτων δ) το μέσο που χρησιμοποιείται ε) τα εργαλεία ανάπτυξης ζ) τα πολυμέσα που περιλήφθηκαν η) η πορεία παραγωγής. Στη 3<sup>η</sup> φάση αναπτύχθηκε η εφαρμογή (παραγωγή), τα στοιχεία πολυμέσων (κείμενα, γραφικά, video, κλπ.), συντάχθηκε ο απαραίτητος κώδικας προγραμματισμού και πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες δοκιμές, ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία της. Τέλος, διεξήχθησαν διαδικασίες διαμορφωτικής αξιολόγησης ενδιάμεσα των φάσεων και η τελική αξιολόγηση μετά την ολοκλήρωση της εφαρμογής [8].

### 3. Παρουσίαση του υλικού

Η εφαρμογή σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού Adobe Flash Professional CS5.5. Επιλέχθηκε High Definition ανάλυση οθόνης ενώ ως κύριο προγραμματιστικό εργαλείο χρησιμοποιήθηκε το ActionScript 2.0. Η συναρμογή και επεξεργασία των εκπαιδευτικών βίντεο πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Adobe Premier CS5.5., χρησιμοποιώντας αρχική ανάλυση HD 720p και στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στην εφαρμογή ως αρχεία flv (720x576p, 25fps, 16:9). Το ηχητικό περιεχόμενο ηχογραφήθηκε και επεξεργάστηκε με την βοήθεια του λογισμικού Adobe Audition CS5.5 και εν συνεχεία ενσωματώθηκε στην εφαρμογή στη συμπιεσμένη μορφή mp3.

Κατά την έναρξη της εφαρμογής ο χρήστης βρίσκεται στο κεντρικό μενού επιλογών, όπου έχει την δυνατότητα να ακούσει και να επιλέξει την διδακτική ενότητα που τον ενδιαφέρει. Έπειτα, οδηγείται στο υπο-μενού της ενότητας, όπου του παρέχονται οι εξής επιλογές: Βιβλίο Μουσικής, Βίντεο με το περιεχόμενο του μαθήματος, Ασκήσεις του τετραδίου εργασιών και διαδραστικά Παιχνίδια.

Για την ανάπτυξη του υλικού επιλέχθηκαν ενότητες που καλύπτουν τέσσερις άξονες, σε αντιπαράθεση με το ΑΠΣ: 1.Ήχος-Ρυθμός, 2.Μουσικά όργανα, 3.Ακρόαση-έκφραση συναισθημάτων, 4.Τραγούδι και χορός. Οι μαθητές διδάσκονται βασικές γνώσεις για τον ήχο, τον τρόπο διάδοσής του, την αναγνώριση και κατάταξη των ήχων σε φυσικούς και τεχνητούς, την διάκριση μουσικού και μη μουσικού ήχου, τις βασικές ηχητικές ιδιότητες χροιά-διάρκεια-ένταση-τονικό ύψος και την προέκταση αυτών των χαρακτηριστικών, σε σχέση με την μουσική, μουσικά όργανα, ακρόαση και έκφραση συναισθημάτων.

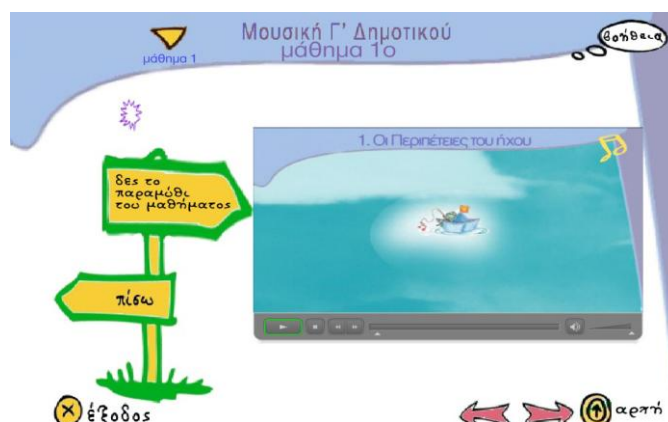
Κάθε ενότητα του βιβλίου παρουσιάζεται με την απαραίτητη προσαρμοστικότητα στο μαθησιακό προφίλ και τις ανάγκες των χρηστών [10]. Με την επιλογή Βιβλίο Μουσικής, ο χρήστης οδηγείται στο απλοποιημένο ηλεκτρονικό βιβλίο, όπου το κεντρικό περιεχόμενο του μαθήματος χωρίζεται σε 2 μέρη, το κείμενο και την εικόνα που το συνοδεύει. Ο μαθητής έχει την δυνατότητα να διαβάσει το απλοποιημένο κείμενο, να ακούσει την αφήγηση ενεργοποιώντας το κουμπί «φωνή» και να ακροαστεί ηχητικά παραδείγματα σχετικά με τις εικόνες. Εστιάζοντας στην αδυναμία των χρηστών να παρακολουθήσουν πολλές πληροφορίες ταυτόχρονα και στο γεγονός ότι πολλοί από αυτούς δεν έχουν κατακτήσει το μηχανισμό της ανάγνωσης [14], το κείμενο και η αφήγηση χαρακτηρίζονται από απλές και σύντομες προτάσεις με τις αντίστοιχες πληροφορίες να περιορίζονται σε μια με δύο ανά σελίδα, ενώ οι σύνθετοι στόχοι επιμερίζονται σε μικρότερα βήματα [17]. Τα διαδραστικά παραδείγματα παρέχουν στους χρήστες περισσότερες προσλαμβάνουσες, αφού η πληροφορία οπτικοποιείται - αναπαράγεται ηχητικά, συγκεκριμενοποιείται και γίνεται πιο εύκολα κατανοητή [18].



Σχήμα 3.1. Βιβλίο μουσικής

Το Βίντεο του Μαθήματος είναι μια πολυμεσική εφαρμογή που βοηθά τους χρήστες στην καλύτερη κατανόηση κάθε ενότητας κρατώντας ζωντανό το ενδιαφέρον τους. Βασισμένο σε απλοποιημένη αφήγηση και σε ηχητικά/ μουσικά παραδείγματα παρουσιάζει την πληροφορία με δομημένο τρόπο μέσω σχεδιαγράμματος, τονίζοντας τα κύρια σημεία [17]. Χαρακτηριστική είναι η συνεχής επιβράβευση - ενθάρρυνση και η χρήση συχνών ερωτήσεων για την εστίαση της προσοχής των μαθητών, που βοηθούν στην ευκολότερη κατάκτηση των εκπαιδευτικών στόχων [12],[13]. Το στοιχείο της επανάληψης βοηθά τους χρήστες να εμπεδώσουν τις πληροφορίες που δέχονται και να προσπεράσουν την αδυναμία της βραχύχρονης μνήμη τους [12],[13],[17]. Η παρουσία ηχητικών και μουσικών παραδειγμάτων ευνοεί τον συσχετισμό πληροφοριών και την οργάνωση της σκέψης [17]. Τα κινούμενα γραφικά είναι δισδιάστατα, προερχόμενα από εικόνες του διδακτικού εγχειριδίου, έτσι ώστε τα παιδιά να συσχετίζουν την εφαρμογή με αυτό.

Η ενότητα Τετράδιο Εργασιών περιλαμβάνει διαφοροποιημένες ασκήσεις, εμπνευσμένες από το διδακτικό εγχειρίδιο «Τετράδιο Εργασιών» της Γ' δημοτικού, που σκοπό έχουν την αξιολόγηση των μαθητών σε κάθε διδακτική ενότητα. Το περιεχόμενο, ο τρόπος εκφώνησής και εκτέλεσής των ασκήσεων εμπλουτίζονται με διαδραστικά πολυμεσικά παραδείγματα. Οι ασκήσεις δίνουν την δυνατότητα διάδρασης με το βιβλίο-εφαρμογή και ο μαθητής λαμβάνει την αντίστοιχη ανάδραση για κάθε του επιλογή. Η διαφοροποίηση αυτή επιτρέπει τη συμμετοχή των παιδιών με νοητική αναπηρία στην διαδικασία της αξιολόγησης [5].



Σχήμα 3.2. Βίντεο μαθήματος

Την ίδια λογική στη σχεδίαση ακολουθούν οι αξιολογητικές δραστηριότητες της ενότητας παιχνίδια με το μάθημα, με τη διαφορά ότι η προσέγγιση γίνεται με την μορφή διαδραστικού παιχνιδιού. Ο χρήστης έχει περισσότερες δυνατότητες διάδρασης με την εφαρμογή, όπως να ακούσει ηχητικά παραδείγματα και μουσικές, να ταξινομήσει εικόνες και ήχους, να παίζει μουσικά όργανα, να συνθέσει μια απλή ρυθμική δομή χρησιμοποιώντας τα κρουστά όργανα της τάξης του, να «διευθύνει» μια χορωδία επηρεάζοντας την ένταση της, να κατασκευάσει απλά πάζλ με εικόνες του μαθήματος, κτλ. Οι δυνατότητες που δίνονται στον χρήστη στην ενότητα αυτή ενθαρρύνουν τη βιωματική μάθηση, αφού ο μαθητής αυτενεργεί και οι επιλογές του επιφέρουν αλλαγές στην εφαρμογή [16].



Σχήμα 3.3. Τετράδιο εργασιών



Σχήμα 3.4. Διαδραστικά παιχνίδια

#### 4. Χαρακτηριστικά πολυμέσων – ο ρόλος του ήχου

Οι πολυμεσικές εφαρμογές στηρίχτηκαν στις κατευθύνσεις και την αισθητική του βιβλίου. Ακολουθήθηκαν οι βασικότεροι κανόνες ευχρηστίας [9] με την παροχή κατάλληλης ανάδρασης (feedback) στο χρήστη για το τι συμβαίνει στην εφαρμογή, τη δυνατότητα επιστροφής σε προηγούμενες καταστάσεις και τη συνέπεια στην παρουσίαση του υλικού, με τα ίδια σύμβολα (εικονίδια, ορολογία, χρώμα, διάταξη

οθόνης, κεφαλαία – πεζά, γραμματοσειρές κ.ά.) να φέρουν το ίδιο απλό και σαφές νόημα. Όλες οι οθόνες είναι οπτικά ενδιαφέρουσες, βοηθούν στην εστίαση της προσοχής των μαθητών, στην ανάπτυξη και διατήρηση του ενδιαφέροντός τους [9]. Παράλληλα, τηρήθηκε η συνέπεια στη διάταξη (layout) των πληροφοριών στην οθόνη, που βοηθά στον λειτουργικό προσανατολισμό και την εύχρηστη πλοήγηση [9]. Η τοποθέτηση των πληροφοριών πραγματοποιείται σε συγκεκριμένα τμήματα της οθόνης και υπάρχει λιτότητα στην παρουσίαση, έτσι ώστε να αποφεύγεται η επιβάρυνση της ενεργού μνήμης του χρήστη με πολλές λεπτομέρειες για τις λειτουργίες της διεπαφής [9]. Η διεπαφή συνοδεύεται από πληροφορίες βοήθειας που παρουσιάζουν με σαφήνεια τα βήματα που πρέπει να ακολουθεί ο χρήστης για να μεταβεί σε μια λειτουργία. Για την οργάνωση του κειμένου στην οθόνη υιοθετήθηκαν η προσεκτική - λιτή διατύπωση, και η διαίρεση του κειμένου σε φράσεις ή ιδέες-πυρήνες [9],[17]. Επιπλέον, δεν χρησιμοποιούνται περισσότερες από 2-3 γραμματοσειρές ανά οθόνη ενώ η εστίαση της προσοχής σε σημεία ενδιαφέροντος επιτυγχάνεται με τη μεταβολή του μεγέθους και είδους της γραμματοσειράς ή με τονισμό (highlight) λέξεων & φράσεων [9]. Όσον αφορά τις χρωματικές επιλογές, καθορίστηκε ένα συνεπές χρωματικό σύστημα σε όλη την έκταση της εφαρμογής. Ανάλογα με την ενότητα και την οθόνη στην οποία βρίσκεται ο χρήστης, μεταβάλλεται το χρώμα σε συγκεκριμένες περιοχές του φόντου. Αναφορικά με την σχεδιοκίνηση, σύμφωνα με ερευνητικά δεδομένα [9], δεν φαίνεται να προσφέρει πρόσθετα μαθησιακά οφέλη σε σχέση με τα στατικά γραφικά, αλλά προσφέρει πολλά παράπλευρα πλεονεκτήματα, όπως η αύξηση του ενδιαφέροντος των εκπαιδευόμενων, η έμφαση σημαντικών πληροφοριών σε δυναμικές διαδικασίες και η καλύτερη κατανόησή τους [9].

Ο ήχος και η μουσική, αποτελούν τον πυρήνα της εφαρμογής, σε συσχετισμό με το διδακτικό αντικείμενο. Η εφαρμογή χρησιμοποιεί ποικιλοτρόπως τα ηχητικά δεδομένα, όπως αφήγηση (narration: ο λεκτικός κώδικας), ηχητική σήμανση (audio cues, ήχοι που συνοδεύουν το πάτημα των πλήκτρων πλοήγησης), καθώς και μουσική υπόκρουση. Η αφήγηση διευκολύνει τα παιδιά με νοητικές δυσκολίες στην ανάγνωση και ταιριάζει στους «ακουστικούς» τύπους [4]. Η ηχητική σήμανση συνδέεται με τα κουμπιά επιλογών πλοήγησης, περιεχομένου και βοήθειας, ενώ η μουσική υπόκρουση αναφέρεται σε συγκεκριμένα παραδείγματα από την ύλη του βιβλίου, αλλά και σε ηχητικά - μουσικά αποσπάσματα που αναπαριστούν τις εικόνες. Ερευνητικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι σπουδαστές βρίσκουν ευκολότερο να ολοκληρώσουν τα μαθήματα που κάνουν εκτεταμένη χρήση του ήχου για την παρουσίαση πληροφοριών, καθώς είναι εξοικειωμένοι με αυτή τη μορφή διδασκαλίας [9]. Τέλος, η εναλλαγή αντρικών και γυναικείων φωνών προσφέρει ποικιλία και διατήρηση της προσοχής του ακροατηρίου [9].

## 5. Αξιολόγηση

Η αξιολόγηση του υλικού πραγματοποιήθηκε με ποιοτικό τρόπο από ομάδα εκπαιδευτικών μουσικής, που δουλεύουν ή έχουν δουλέψει με μαθητές με νοητική αναπηρία. Σκοπός των συνεντεύξεων ήταν να προκύψουν εισηγήσεις και συμπεράσματα σχετικά με τη συμβολή της ηχητικής και οπτικής αναπαράστασης στην διευκόλυνση της διδασκαλίας για μαθητές ΑμεΑ. Η εφαρμογή θεωρήθηκε αρκετά χρήσιμη και η παρουσίαση των ενοτήτων πολύ κατανοητή και ελκυστική, μέσω των πολυμεσικών παραδειγμάτων και των βίντεο. Η διδακτική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στηρίζεται στην ανακάλυψη της γνώσης και την

πολυαισθητηριακή μάθηση [16]. Όσον αφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής είναι κατά κοινή ομολογία κατάλληλη και εύχρηστη, δεν αντιμετωπίζει προβλήματα συμβατότητας και χαρακτηρίζεται αποδοτική σε σχέση με τους χρόνους απόκρισής της στις εντολές του χρήστη. Τα πολυμεσικά στοιχεία εξυπηρετούν το χρήστη ενώ παράλληλα ενθαρρύνουν τη διαφοροποίηση της διδασκαλίας, διευκολύνοντας το ρόλο του εκπαιδευτικού στην Ενιαία τάξη.

## 6. Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα

Συμπερασματικά, για την βελτίωση της εφαρμογής προτείνονται η ανάπτυξη της σε μεγαλύτερο εύρος της ύλης, η διαβάθμισή της σε επίπεδα χρηστών, η διεύρυνσή της σε άλλες μορφές αναπηρίας (κώφωση, τύφλωση, κινητικές αναπηρίες), η διαθεματική προσέγγιση του μαθήματος της μουσικής με άλλα μαθήματα και η ανάδειξη του σημαντικού ρόλου της μουσικής στην γενικότερη παιδεία των ατόμων με αναπηρία. Σε μελλοντική έρευνα εντάσσεται η δημιουργία ενός διαδραστικού παιχνιδιού όπου ο μαθητής με αναπηρία θα έχει την δυνατότητα να υποδυθεί ένα ρόλο, κατακτώντας δομημένα επίπεδα γνώσης βάση σεναρίου. Σε τεχνολογικό επίπεδο η εφαρμογή σκοπεύεται να εμπλουτιστεί με περισσότερη διάδραση στις εφαρμογές-ασκήσεις και να προσαρμοστεί σε ποικίλες συσκευές (tablet, smartphones, κτλ.) καθώς σύμφωνα με τις εισηγήσεις των καθηγητών μουσικής η χρήση τους εστιάζει την προσοχή των ατόμων με νοητική αναπηρία και αποτελεί κίνητρο για συμμετοχή στο μάθημα.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] Tomlinson, C. A., Brighton, C., Hertberg, H., Callahan, C. M., Moon, T. R., BrimiJoin, K. et al. "Differentiating Instruction in Response to Student Readiness, Interest, and Learning Profile in Academically Diverse Classrooms: A Review of Literature", *Journal for the Education of the Gifted*, Vol. 27, no2, pp. 119-145, (2003).
- [2] Παντελιάδου, Σ. *Διαφοροποιημένη διδασκαλία* Πεδίο Αθήνα (2013).
- [3] Brown, A. R. "Software development as music education research", *International Journal of Education & the Arts*, Vol. 8 no6, pp. 131-139 (2007).
- [4] Crowe, B. J. & Rio, R. "Implications of technology in music therapy practice and research for music therapy education: a review of literature", *Journal of Music Therapy*, Vol. 41, no4, pp. 282-320, (2004).
- [5] Παρασκευόπουλος, Μ. «Η εισαγωγή των τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνίας στην Ειδική Αγωγή», *Θέματα Ειδικής Αγωγής*, 34, σελ. 43-55. (2006).
- [6] Σούλης, Γ. Σ. *Ένα σχολείο για όλους Gutenberg – Γιώργος & Κώστας Δαρδανός* Αθήνα (2008).
- [7] Ζώνιου - Σιδέρη, Α. *Άτομα με ειδικές ανάγκες και η ένταξή τους* Ελληνικά Γράμματα Αθήνα (2000).
- [8] Alessi, S. M. & Trollip, S. R. *Πολυμέσα και Εκπαίδευση: Μέθοδοι και ανάπτυξη* Γκιούρδας Αθήνα (2005).
- [9] Δημητριάδης, Σ. Ν., Πομπόρτσος Α. Σ., & Τριανταφύλλου, Ε. Γ. *Τεχνολογία Πολυμέσων. Θεωρία και Πράξη*. Τζιόλα Θεσσαλονίκη (2004).
- [10] Πρέζας, Π. *Θεωρίες Μάθησης και Εκπαιδευτικό Λογισμικό* Κλειδάριθμος Αθήνα (2003).

- [11] Κουρμπέτης, Β. *Καταγραφή υπάρχοντος εκπαιδευτικού υλικού και λογισμικού για τη μέτρια και ελαφριά νοητική υστέρηση*. ΥΠΕΠΘ Αθήνα (2013).
- [12] Αλευριάδου, Α. & Γκιαούρη, Σ. *Γενετικά σύνδρομα νοητικής καθυστέρησης: Αναπτυξιακή και Εκπαιδευτική προσέγγιση* University Studio Press Θεσσαλονίκη (2009).
- [13] Heward, W. L. *Παιδιά με ειδικές ανάγκες: Μια εισαγωγή στην Ειδική Εκπαίδευση* Τόπος Αθήνα (2011).
- [14] Thomas, D. & Wood, H. *Working with people with learning disabilities. Theory and practice* Jessica Kingsley Publishers Ltd London (2003).
- [15] Bloom, B. S., Hastings, J. T. & Madaus, G. F. *Handbook of formative and summative evaluation of student learning* McGraw-Hill New York (1971).
- [16] Καρτασίδου, Λ. *Μουσική Εκπαίδευση στην Ειδική Παιδαγωγική Τυπωθήτω Αθήνα* (2004).
- [17] Campbell P. S. & Scott- Kassner C. *Music in Childhood: From Preschool through the Elementary Grades* Schirmer New York (2005).
- [18] Demetriadis, S., & Pombortsis, A. "Novice student learning in case based hypermedia environment: a quantitative study", *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, Vol. 8 no2, pp. 241-269, (1999).



**Προστασία από θορύβους μουσικής κέντρων  
διασκέδασης στην Ελλάδα·  
συμβολή στη μελέτη του σχετικού νομοθετικού πλαισίου**

Α. Σωτηροπούλου<sup>1,3,a</sup>, Γ. Καμπουράκης<sup>2,b</sup>, Γ. Βλάχος<sup>3,c</sup> & Β. Γεωργιοπούλου<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

<sup>3</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [gcamb@cs.ntua.gr](mailto:gcamb@cs.ntua.gr), <sup>c</sup> [vlachosg@central.ntua.gr](mailto:vlachosg@central.ntua.gr), <sup>d</sup> [vassiliki78@yahoo.gr](mailto:vassiliki78@yahoo.gr)

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Γίνεται αναφορά στην ισχύουσα ελληνική νομοθεσία για την προστασία από θορύβους μουσικής κέντρων διασκέδασης, περιλαμβανομένων και των σύγχρονων «pub», «club» κλπ που χρησιμοποιούν μουσική εντός, και/ή εκτός του κλειστού χώρου του μαγαζιού. Σύγκριση με τη σχετική νομοθεσία άλλων μεσογειακών χωρών επισημαίνει πρώτον, την ανάγκη εισαγωγής οριακών επιπέδων θορύβου για τις χαμηλές συχνότητες, και δεύτερον ότι οι ανεκτές στάθμες θορύβου του Έλληνα νομοθέτη είναι σχετικά αυστηρές. Διατυπώνονται προτάσεις για αναθεώρηση της νομοθεσίας και την εφαρμοσιμότητά της.*

**Noise protection from music of entertainment shops in  
Greece;  
Reconsidering relevant legislation**

**ABSTRACT**

*Current Greek legislation is reported here, which concerns noise protection from music of entertainment shops (including pubs clubs etc.). Comparison with relevant legislation of other Mediterranean countries demonstrates first, the need for introduction of low frequency permissible noise levels, and secondly that permissible noise levels according to Greek legislation are relatively less lenient. Suggestions are made concerning revision of current Greek legislation, and the applicability of legislation.*

**Εισαγωγή**

Ο ελληνικός τρόπος διασκέδασης απετέλεσε ανέκαθεν παράμετρο ανάπτυξης της χώρας μας και όχι μόνον. Όμως τα τελευταία χρόνια, ο τρόπος αυτός εκφράζεται ενίοτε μέσω ψυχαγωγίας σε κέντρα διασκέδασης, περιλαμβανομένων «pub», «club» κλπ με μουσική, όπου δεν τηρούνται οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί

και ιδιαιτέρως οι κανονισμοί ηχορρύπανσης όπως επιβάλλονται από το μέχρι στιγμής νομοθετικό πλαίσιο της χώρας.

Όπως έχει διαπιστωθεί από σχετικές έρευνες, τα βασικά προβλήματα που απορρέουν από τη λειτουργία τέτοιων καταστημάτων διασκέδασης στη χώρα μας, είναι οι υψηλές στάθμες μουσικής εκπομπής, η ανεξέλεγκτη επέκταση τους σε υπαίθριους χώρους, κλπ. Παρά τις προσπάθειες της πολιτείας για την εφαρμογή συγκεκριμένων μέτρων ή ρυθμιστικών πλαισίων, η επιδείνωση της ηχορύπανσης εξαιτίας της λειτουργίας κέντρων διασκέδασης την τελευταία 20-ετία, είναι γεγονός. Η υπέρβαση του ορίου ηχοστάθμης των 80 dBA που προβλέπεται από την ισχύουσα ελληνική νομοθεσία, σε συνδυασμό, είτε με ελλιπή ηχομόνωση, είτε με υπαίθρια λειτουργία των καταστημάτων διασκέδασης και κατάχρηση των ηλεκτροακουστικών μέσων, αποτελούν πλέον κανόνα στη χώρα μας. Σύμφωνα με διαπιστώσεις του Υπουργείου Υγείας, το πλείστον των ενοχλήσεων οφείλεται σε περιπτώσεις καταστημάτων που στερούνται άδειας λειτουργίας ή που τροποποιούν αυθαίρετα τις επιτρεπόμενες συνθήκες που αναφέρονται στην άδεια των, όπως π.χ. τις ώρες λειτουργίας τους, τον τύπο της στέγασης, τις θύρες και υαλοπετάσματα από κλειστά σε ανοικτά, τη θέση ηχείων από τον κλειστό χώρο στο υπαίθρο με αντίστοιχη ανάπτυξη τραπεζιών, κλπ.

Η παρούσα εργασία κάνει αναδρομή στην ισχύουσα σχετική νομοθεσία στη χώρα μας και επιχειρεί σύγκριση αυτής με τη σχετική νομοθεσία άλλων ευρωπαϊκών μεσογειακών χωρών, δηλαδή της Γαλλίας και της Ιταλίας. Επίσης επιχειρείται σχολιασμός της ισχύουσας ελληνικής νομοθεσίας σε σχέση με σύγχρονες διαπιστώσεις και ανάγκες της ελληνικής κοινωνίας.

## **1. Προγενέστερες σχετικές μελέτες και νομοθεσία**

Η πρώτη στα ελληνικά χρονικά νομοθεσία για την προστασία από θορύβους νυκτερινών κέντρων διασκέδασης και λοιπών καταστημάτων, θεσπίστηκε το έτος 1985 με τη μορφή υπουργικής απόφασης [1]. Άλλα νομοθετήματα σχετικά με το θέμα αναφέρονται στις πηγές [2,3,4,5,6,7]. Ενδιαφέρον μεταξύ αυτών παρουσιάζει η υπουργική διάταξη του έτους 2012 [4], η οποία καθορίζει την ισχύουσα διαδικασία αδειοδότησης λοιπών καταστημάτων με μουσική, δηλ. καταστημάτων που δεν εντάσσονται στην κατηγορία νυκτερινών κέντρων διασκέδασης, όπως «pub», «club» κλπ. Αυτού του είδους τα καταστήματα αποτελούν πρόσφατη εξέλιξη στην ελληνική κοινωνία και δικαίως ο νομοθέτης αναγνωρίζει την ανάγκη να αναφερθεί ιδιαιτέρως σε αυτά. Σύμφωνα με την ανωτέρω διάταξη [4], καθορίζεται ο τρόπος αδειοδότησης τέτοιων κέντρων και ειδικότερα απαιτείται τεχνική έκθεση από αρμόδιο μηχανικό ώστε να τεκμηριώνεται ότι η ισχύς των μεγαφώνων, τυχόν μέτρα ηχοπροστασίας κλπ, δε δημιουργούν προβλήματα στα σημεία προστασίας.

Όσον αφορά, στην ισχύουσα σήμερα νομοθεσία για την προστασία από θόρυβο νυκτερινών καταστημάτων διασκέδασης στη χώρα μας, συνοπτικά προβλέπονται τα εξής:

- α) θεσπίζονται επιτρεπτές ώρες λειτουργίας [3] αναλόγως της εποχής (χειμώνας, καλοκαίρι) και της ημέρας (καθημερινή, σαββατοκύριακο),
- β) ορίζονται επιτρεπτά όρια στάθμης λειτουργίας της μουσικής [1]· για στεγασμένα ή υπαίθρια κέντρα διασκέδασης, μέσα στο μαγαζί ή στο κέντρο της πίστας χορού αντιστοίχως ορίζονται 100 dBA, ενώ για τα λοιπά καταστήματα με μουσική που δεν είναι κέντρα διασκέδασης, δηλαδή για τα «pub», «club» κλπ, είτε είναι υπαίθρια

είτε στεγασμένα, η μέγιστη επιτρεπόμενη ηχοστάθμη στο κέντρο του καταστήματος ορίζεται στα 80 dBA,

γ) για όλα τα κέντρα διασκέδασης και λοιπά καταστήματα με μουσική, η ηχομόνωση θεωρείται ικανοποιητική [1], όταν η A-ηχοστάθμη μετρούμενη στα όρια της ιδιοκτησίας του οικοπέδου στο οποίο είναι εγκαταστημένο το κατάστημα, δεν ξεπερνά συγκεκριμένες τιμές. Περαιτέρω, ορίζεται ανώτατη επιτρεπόμενη ηχοστάθμη στο όριο του πλησιέστερου νομίμου κατοικημένου κτιρίου (κατοικία, ναός, σχολείο, νοσοκομείο, γηροκομείο, ξενοδοχεία κτλ) ανάλογα με την ευαισθησία της περιοχής στο θόρυβο· π.χ. για περιοχές καθαρά κατοικιών το όριο είναι 30 dBA, για περιοχές όπου επικρατεί το βιομηχανικό στοιχείο αλλά υπάρχουν και κατοικίες το όριο ορίζεται στα 45 dBA κλπ,

δ) ορίζονται επιθυμητές τιμές ηχομόνωσης κέντρων διασκέδασης [2], στην περίπτωση που αυτά συστεγάζονται σε κτίρια με κατοικίες,

ε) καθορίζεται ελάχιστη απόσταση μεταξύ υπαίθριου κέντρου διασκέδασης από το πλησιέστερο νόμιμο κατοικημένο κτίριο (κατοικία, σχολείο, ναός, νοσοκομείο κτλ) [1,5],

στ) για τη μετάδοση κτυπογενών θορύβων και κραδασμών στα στεγασμένα κέντρα διασκέδασης [1], θεσπίζονται πρόσθετα μέτρα που αφορούν στη χρήση ελαστικών στηρίξεων για τα μεγάφωνα, πλωτού δαπέδου για την ορχήστρα, την πίστα κλπ,

ζ) περιγράφεται η διαδικασία των ακουστικών μετρήσεων και η σύνταξη του σχετικού φύλλου υγειονομικού ελέγχου θορύβου [1]. Τέλος η σχετική άδεια ίδρυσης και λειτουργίας ενός κέντρου διασκέδασης υπόκειται σε προέγκριση της αρμόδιας δημομαρχιακής επιτροπής, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν ιδιαίτερες παραμέτρους όπως προστασία αιγιαλού, προστασία αρχαιολογικών και ιστορικών τόπων, δασικών περιοχών κλπ [7].

Εκ παραλλήλου, έχουν δημοσιευθεί στη σύγχρονη επιστημονική βιβλιογραφία μελέτες που διαφωτίζουν με μετρήσεις θορύβων από κέντρα διασκέδασης και είναι δυνατά να διευκολύνουν την αναθεώρηση του υπάρχοντος νομοθετικού πλαισίου. Μια τέτοια μελέτη είναι των Μπάρκα κ.α. [8], η οποία αποτιμά μέσω ακουστικών μετρήσεων το θόρυβο και τις ηχομονωτικές ανεπάρκειες σε «bar» 24ωρης λειτουργίας («all day bar») στο κέντρο της Θεσσαλονίκης και επισημαίνονται σχετικές νομοθετικές ελλείψεις. Τα «all day bar» που μετρήθηκαν από τους εν λόγω συγγραφείς, ανήκουν κυρίως σε κτίρια οικιστικά και καταλαμβάνουν αυθαίρετα υπαίθριο χώρο πέραν των ορίων τους. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι επιτρεπόμενες ηχοστάθμες μέσα σε αυτά καταστρατηγούνται, η ηχομόνωση στο κέλυφος των «bar» είναι ανεπαρκής και επιπλέον επικρατεί αδυναμία διάθεσης χώρων στάθμευσης, κατάχρηση ηλεκτροακουστικού εξοπλισμού και πλημμελής ακουστικός σχεδιασμός του χώρου. Στο 50% των περιπτώσεων που μετρήσαν οι Μπάρκας κ.α. βρήκαν ότι η ηχοστάθμη μέσα στα «bar» υπερέβαινε τα 90 dBA έναντι του επιτρεπόμενου ορίου των 80 dBA. Οι συγγραφείς σχολιάζοντας την έλλειψη μέτρων ηχοπροστασίας στη κατασκευή των υπό εξέταση «bar», αναφέρονται στην απουσία ηχοφράκτου στην είσοδο του καταστήματος, απουσία πλωτών δαπέδων, χρήση εκτενών υαλοστασίων με ανεπαρκή ηχομονωτική απόδοση κτλ. Τέλος η εργασία τελειώνει με τη διαπίστωση ότι καταστρατηγείται το επιτρεπόμενο ωράριο λειτουργίας των καταστημάτων, καθώς και ότι υπάρχει υπέρμετρη σε πλήθος ανάπτυξη αυτού του είδους καταστημάτων κατ' ουσίαν εφαιπτομενικών του ενός προς το άλλο ώστε να δημιουργείται μια γραμμική περιοχή/πηγή θορύβου.

Έξι χρόνια αργότερα οι Κωστής κ.α. [9] ανακοινώνουν μελέτη των, που αφορά στο θόρυβο λειτουργίας και προβλήματα ηχοπροστασίας από κέντρα εστίασης και διασκέδασης στο Βόλο και στα Ιωάννινα. Οι συγγραφείς έκαναν ακουστικές μετρήσεις και αξιολόγησαν την ακουστική άνεση στα γειτονικά οικιστικά κτίρια. Διαπίστωσαν σημαντικές ηχητικές οχλήσεις και στις δυο πόλεις με κοινά αλλά και αποκλίνοντα χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα οι ηχητικές οχλήσεις στο Βόλο ταυτίστηκαν με οχλοβοή, παραβατική συμπεριφορά, αύξηση κυκλοφορίας κλπ, δηλαδή με τη συνάθροιση των θαμώνων, ενώ στα Ιωάννινα ηχητικές οχλήσεις βρέθηκαν να οφείλονται στα ηλεκτροακουστικά συστήματα. Στην εργασία εκείνη προτείνονται παρεμβάσεις για την εξασφάλιση της ακουστικής άνεσης των περιοίκων, σε τρεις κατευθύνσεις: *πρώτον*, αύξηση της ηχομονωτικής επάρκειας των κατασκευών των καταστημάτων διασκέδασης, *δεύτερον*, εφαρμογή και τήρηση των κανονιστικών διατάξεων και *τρίτον*, κώδικες συμπεριφοράς και σεβασμό της κοινής ησυχίας από τη διασκέδαση. Περαιτέρω οι Κωστής κ.α. θεωρούν απαραίτητη τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του κτιριοδομικού κανονισμού [1] και υποχρεωτική την κατάθεση μελέτης ηχομόνωσης κατά την έγκριση μιας άδειας λειτουργίας. Επίσης στην εργασία εκείνη κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή περαιτέρω αντιθορυβικών διατάξεων, και απαραίτητος ο έλεγχος της διασποράς/πυκνότητας τέτοιων καταστημάτων με σχετικές πολεοδομικές ρυθμίσεις σε περιπτώσεις μεικτών χρήσεων.

Σε μία άλλη μελέτη από τον Χαλαζωνίτη [10] γίνεται αναφορά στον έλεγχο και την εφαρμογή των υγειονομικών διατάξεων σχετικά με την ηχορύπανση από καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος, και επισημαίνεται ότι παρατηρούνται υπερβάσεις των επιτρεπόμενων ορίων ηχοστάθμης στα υπό εξέταση καταστήματα, καταστρατηγούνται οι χρήσεις γης, και υπερισχύουν χαμηλές φασματικές συνιστώσες στον ενοχλητικό θόρυβο. Σύμφωνα με διαπιστώσεις του Υπουργείου Υγείας, ο Χαλαζωνίτης, παρατηρεί ότι το πλείστον των ενοχλήσεων οφείλεται σε καταστήματα που στερούνται άδειας λειτουργίας ή που τροποποιούν αυθαίρετα τις επιτρεπόμενες συνθήκες που αναφέρονται στην άδειά των, όπως π.χ. τις ώρες λειτουργίας τους, τον τύπο της στέγασης, θυρών και υαλοπετασμάτων από κλειστά σε ανοιχτά, τη θέση ηχείων από το κλειστό χώρο στο ύπαιθρο με αντίστοιχη ανάπτυξη τραπεζιών κτλ. Ο συγγραφέας καταλήγει ότι είναι αναγκαία η λήψη μέτρων για τον εκσυγχρονισμό της νομοθεσίας, και για την τήρηση αυτής. Επίσης κρίνει αναγκαία τη δραστηριοποίηση των δημοτικών αρχών σχετικά με την πρόληψη του θορύβου στο πλαίσιο της κείμενης νομοθεσίας, με την έκδοση τοπικών κανονιστικών αποφάσεων.

Τέλος πρέπει να γίνει αναφορά στην ευρωπαϊκή οδηγία του έτους 2002 [11] η οποία ενσωματώθηκε στο ελληνικό θεσμικό πλαίσιο με σχετική κοινή υπουργική απόφαση το έτος 2006 [6]. Στην οδηγία αυτή προβλέπονται προοδευτικά διάφορες δράσεις όπως χαρτογράφηση περιβαλλοντικού θορύβου, θέσπιση σχεδίων δράσης με στόχο την πρόληψη και τον περιορισμό του περιβαλλοντικού θορύβου κλπ. Παρ' όλα αυτά, ο όρος περιβαλλοντικός θόρυβος με την έννοια που χρησιμοποιείται στην ευρωπαϊκή οδηγία αναφέρεται κυρίως στον κυκλοφοριακό θόρυβο και δεν γίνεται ιδιαίτερη αναφορά για θόρυβο νυχτερινών κέντρων διασκέδασης.

Την σημαντική αύξηση στα επίπεδα θορύβου μέσα και γύρω από τα σχετικά καταστήματα διασκέδασης («discothèque», «pub», «club», κλπ), που συχνά είναι σε επαφή ή πολύ κοντά με κατοικίες αναγνωρίζουν οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες. Πρόσφατα, πέραν από τις προσπάθειες για την πρόληψη αυτού του είδους θορύβου έχουν ληφθεί σε τοπικό και εθνικό επίπεδο μέτρα με την μορφή συστάσεων και

κανονισμών. Συγκεκριμένα, στη Γαλλία ο σχετικός νόμος του έτους 1998 (1143) [12], προβλέπει την απαιτούμενη ηχομόνωση ανά οκταβική ζώνη με ιδιαίτερα αυστηρή αναφορά στις χαμηλές συχνότητες όπου απαιτείται ηχομόνωση 66 dB και 75 dB αντίστοιχα για τις οκταβικές ζώνες 125Hz και 250 Hz, για θόρυβο στο χώρο εκπομπής ίσο με 99 dB σε αυτές τις δύο οκτάβες. Το Εθνικό Συμβούλιο θορύβου της Γαλλίας απαιτεί ηχομόνωση (τυποποιημένη σταθμισμένη διαφορά στάθμης) μεγαλύτερη των 68 dB [12] σε σχέση με «bar» που βρίσκονται στο ίδιο κτίριο με τον αποδέκτη του θορύβου, και ακόμη μεγαλύτερη ηχομόνωση, ήτοι 88 dB αντίστοιχα για «discothèque».

Επίσης, ο σχετικός νόμος του 1995 στην Ιταλία (447) [12], προβλέπει ότι η μέγιστη στάθμη θορύβου μέσα στο κέντρο διασκέδασης πρέπει να είναι μικρότερη των 102 dBA, ενώ η ισοδύναμη στάθμη θορύβου στην ίδια θέση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 95 dBA. Σε άλλη διάταξη του έτους 1997 (DPCM280) [12] στην Ιταλία επίσης, προβλέπονται επιτρεπτές στάθμες του εξωτερικού θορύβου κατά την διάρκεια της νύχτας, όπως αυτές καταγράφονται εντός του χώρου λήψης του θορύβου, ίσες με 40 dBA για ανοικτό παράθυρο και 25 dBA για κλειστό.

Τέλος, άλλη μελέτη [13] εξετάζει την ενόχληση από ανθρώπινη δράση στη γειτονιά κατοικίας και εργασίας των πολιτών, στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για χώρες του νότου, η μελέτη καταλήγει ότι υπάρχει μεγαλύτερη ανεκτικότητα στον εν λόγω θόρυβο και αποδίδεται αυτό στην θεωρούμενη από τον ίδιο συγγραφέα, εξοικείωση των μεσογειακών λαών με σχετικά υψηλές στάθμες εξωτερικού θορύβου λόγω ανοικτών παραθύρων και επίσης λόγω μεσογειακού τρόπου ζωής.

## 2. Σχολιασμός

Η ευαισθητοποίηση του Έλληνα νομοθέτη στη σύγχρονη εξέλιξη καταστημάτων μουσικής διασκέδασης («club», «pub» κλπ.) και στην συνακόλουθη ανάγκη προστασίας των περιοίκων από τους σχετικούς θορύβους, εκφράζεται μέσα από πρόσφατη νομοθεσία του 2012 [4] η οποία αποτελεί συνέχεια της σχετικής ελληνικής νομοθεσίας του 1985 [1].

Σύγκριση της ελληνικής νομοθεσίας με την αντίστοιχη νομοθεσία άλλων μεσογειακών χωρών όπως π.χ. της Γαλλίας, ως προς τη λειτουργία «pub», «club» κλπ, τα οποία χρησιμοποιούν μουσική και στεγάζονται και/ή γειτνιάζουν με οικιστικά κτίρια, αναδεικνύει ομοιότητες αλλά και διαφορές. Και στις δύο περιπτώσεις τόσο ο Έλληνας όσο και ο Γάλλος νομοθέτης θέτουν ελάχιστο όριο ηχομόνωσης, παρεμφερές. Αντίθετα όμως προς την ελληνική νομοθεσία, ο Γάλλος νομοθέτης αναγνωρίζει την ενοχλητικότητα των χαμηλών συχνοτήτων και θεσπίζει ειδικές τιμές ηχομόνωσης σχετικά [12]. Η δημιουργία νέων μουσικών ειδών με πλούσιο περιεχόμενο σε μπάσα και εκκωφαντικές στάθμες όπως είναι η σύγχρονη «rock» μουσική, υπαγορεύει την ανάγκη εισαγωγής οριακών τιμών ηχομόνωσης στη χαμηλή περιοχή του φάσματος, και στη σχετική ελληνική νομοθεσία.

Περαιτέρω, σύγκριση με τη νομοθεσία άλλης μεσογειακής χώρας όπως π.χ. της Ιταλίας [12] δείχνει, ότι η ελληνική νομοθεσία όπως ισχύει από το έτος 1985 υιοθετεί πολύ αυστηρότερες οριακές στάθμες (80 dBA) [1]. Εξ' άλλου τα ευρήματα των Μπάγκα κ.α. [8] και Κωστή κ.α. [9], επιβεβαιώνουν ότι η ελληνική νομοθεσία παραβιάζεται ως προς τις οριακές στάθμες θορύβου. Συνεκτιμώντας τα ανωτέρω, αξίζει να διερευνηθεί, κατά πόσον η ανεκτικότητα του Έλληνα με το μεσογειακό

τρόπο ζωής έχει αυξηθεί ή ακόμη αν ο σύγχρονος Έλληνας απολαμβάνει μια σχετικά θορυβώδη διασκέδαση, σε σχέση με το παρελθόν. Εις επίρρωσιν αυτών, έρχονται και τα σχόλια του Mitchell [13], υπέρ της ανεκτικότητας των μεσογειακών λαών στις υψηλές στάθμες θορύβου όπως αναφέρθη ανωτέρω (κεφάλαιο 1).

Άλλο κρίσιμο θέμα αφορά στην εφαρμογή των διατάξεων περί ηχοπροστασίας από κέντρα διασκέδασης με μουσική, σχετικά με τις χρήσεις γης οικιστικών περιοχών. Είναι γεγονός ότι πολυάριθμα «pub», «club» κλπ με μουσική στον υπαίθριο χώρο τους, έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί σε θέσεις που προέκυψαν από την παραβίαση των κανόνων παλαιότερων αμιγών οικιστικών περιοχών [10]. Η αναγκαιότητα ηχοπροστασίας των κατοίκων τέτοιων περιοχών άτυπης 'γενικής κατοικίας', με την εφαρμογή των σχετικών διατάξεων, είναι προφανής.

Άλλο θέμα, αφορά στη μέθοδο ακουστικών μετρήσεων όπως αυτή ορίζεται στο νόμο του 1985 [1] και προϋποθέτει την ύπαρξη εκπαιδευμένων μηχανικών στο αντικείμενο, την διαθεσιμότητα βαθμονομημένων/πιστοποιημένων ηχομέτρων και λοιπού τεχνολογικού εξοπλισμού. Κατ' αναλογία προς τους ενεργειακούς επιθεωρητές η πολιτεία σήμερα έχει ανάγκη εκπαιδευμένων μηχανικών για τη διεξαγωγή των σχετικών με το θόρυβο ελέγχων. Η υλοποίηση αυτής της επισήμανσης αποτελεί προϋπόθεση για την εφαρμοσιμότητα της αντιθορυβικής νομοθεσίας.

Περαιτέρω, ενημέρωση και δημιουργία αντιθορυβικής συνείδησης, κατά τα οριζόμενα εξ' άλλου και στην ευρωπαϊκή οδηγία, είναι απαραίτητο να εισαχθούν στη σύγχρονη ελληνική κοινωνία και παιδεία. Πρόσδος σε αυτή τη κατεύθυνση μπορεί να αμβλύνει δυσάρεστες διαπιστώσεις του παρελθόντος σύμφωνα με τις οποίες, ισχυρές διασυνδέσεις επιχειρηματιών της διασκέδασης με την πολιτική εξουσία, είχαν σαν αποτέλεσμα την παράκαμψη του υγειονομικού ελέγχου και τη μετατροπή καφενείων κλπ, σε καταστήματα διασκέδασης. Το θέμα της αντιθορυβικής συνείδησης είναι μείζονος σημασίας στη σύγχρονη κοινωνία και πολιτεία με οικονομικές επιπτώσεις.

Ακόμη, σε αντίθεση με τα περισσότερα αστικά κέντρα ανεπτυγμένων κρατών, όπου οι αξίες ακινήτων είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αξίες στα προάστια, στην Ελλάδα παρατηρείται το αντίθετο. Εξήγηση του φαινομένου αυτού αποτελεί η έλλειψη περιβαλλοντικής προστασίας των ελληνικών αστικών κέντρων, η οποία ωθεί τους ανθρώπους σε φυγή προς τα προάστια. Επακόλουθο αυτού είναι η υποβάθμιση των ακινήτων στα αστικά κέντρα με συνακόλουθη απώλεια φορολογικών εσόδων για το κράτος. Επί πλέον, η περιβαλλοντική αυτή υποβάθμιση είναι δυνατόν να εκφυλίζει την αξία παρακείμενων αρχαιολογικών χώρων και μνημείων, με σημαντικές επιπτώσεις στον τουρισμό και την οικονομία.

### **3. Συμπεράσματα**

Η δημιουργία νέων μουσικών ειδών με πλούσιο περιεχόμενο σε μπάσα και εκκωφαντικές στάθμες, όπως είναι η σύγχρονη «rock» μουσική, δημιούργησε σημαντική αύξηση στα επίπεδα θορύβου μέσα και γύρω από τα σχετικά καταστήματα διασκέδασης («discothèque», «pub», «club», εστιατόρια κτλ), τα οποία είναι συχνά σε επαφή ή ευρίσκονται εντός οικιστικών κτιρίων. Η ευαισθητοποίηση του Έλληνα νομοθέτη στη σύγχρονη εξέλιξη τέτοιων κέντρων μουσικής διασκέδασης και στην συνακόλουθη ανάγκη προστασίας της κοινωνίας από τους σχετικούς θορύβους, εκφράζεται ήδη μέσα από την ισχύουσα νομοθεσία.

Τα κατωτέρω συμπεράσματα, είναι δυνατόν να συνεισφέρουν περαιτέρω, στον εκσυγχρονισμό και στην βελτιστοποίηση αυτής της νομοθεσίας.

Σύγκριση με τη νομοθεσία άλλων μεσογειακών χωρών, επιβεβαίωσε: πρώτον, την ανάγκη εισαγωγής οριακών τιμών θορύβου επί πλέον και αποκλειστικά, στις χαμηλές συχνότητες, και δεύτερον, ότι η ελληνική νομοθεσία όπως ισχύει από το έτος 1985 υιοθετεί σχετικά αυστηρότερες οριακές στάθμες. Συνεκτιμώντας και τις υψηλές στάθμες θορύβου (εκτός ορίων) που διαπιστώνονται σε πρόσφατες επιστημονικές μελέτες στη χώρα μας, αξίζει να ερευνηθεί κατά πόσον η ανεκτικότητα του Έλληνα με το μεσογειακό τρόπο ζωής έχει αυξηθεί ή ακόμη αν ο σύγχρονος Έλληνας απολαμβάνει μια σχετικά θορυβώδη διασκέδαση, σε σχέση με το παρελθόν, πράγμα το οποίον θα επέτρεπε την υιοθέτηση επιεικέστερων οριακών επιπέδων θορύβου· αυτό βεβαίως, αφού πρώτα απαντηθούν ερωτήματα, σχετικά με τη δυσανεξία των σύγχρονων περιοίκων στο θόρυβο και ειδικότερα στο θόρυβο καταστημάτων διασκέδασης.

Κατ' αναλογία προς τους ενεργειακούς επιθεωρητές η πολιτεία σήμερα έχει ανάγκη εκπαιδευμένων μηχανικών για τη διεξαγωγή των σχετικών με το θόρυβο ελέγχων. Η υλοποίηση αυτής της επισήμανσης αποτελεί προϋπόθεση για την εφαρμοσιμότητα της ισχύουσας αντιθορυβικής νομοθεσίας.

Τέλος, ενημέρωση και δημιουργία αντιθορυβικής συνείδησης, κατά τα οριζόμενα εξ' άλλου και στην ευρωπαϊκή οδηγία, είναι δυνατόν να συμβάλλουν στον περιορισμό της περιβαλλοντικής υποβάθμισης αστικών κέντρων της χώρας μας, με όλα τα οικονομικά/φορολογικά και όχι μόνον οφέλη για την ελληνική πολιτεία και την κοινωνία.

#### 4. Αναφορές

- [1] Υ.Α. Α5/3010/1985 «Μέτρα προστασίας της δημόσιας υγείας από θορύβους μουσικής των κέντρων διασκέδασης και λοιπών καταστημάτων» *ΦΕΚ 593/Β/2-10-85*, Αθήνα (1985)
- [2] Υ.Α.3046/304/89 Κτιριοδομικός Κανονισμός *ΦΕΚ 59/Α/3-02-89*, Αθήνα (1989)
- [3] Υ.Α. 1011/22/19-ιβ «Καθορισμός χρονικών ορίων λειτουργίας κέντρων διασκέδασης και συναφών καταστημάτων» *ΦΕΚ 724/Β/26-09-1994*, Αθήνα (1994)
- [4] Υ.Α. Υ1γ/Γ.Π/οικ. 96967 «Υγειονομικοί όροι και προϋποθέσεις λειτουργίας επιχειρήσεων τροφίμων και ποτών και άλλες διατάξεις» *ΦΕΚ 2718/Β/08-10-2012*, Αθήνα (2012)
- [5] Υ.Α. 7034/1298 «Ελάχιστες αποστάσεις Ψυχαγωγικών Δραστηριοτήτων», *ΦΕΚ Β/368/15-03-2000*, Αθήνα (2000)
- [6] Υ.Α. 13586/724 «Καθορισμός μέτρων, όρων και μεθόδων για την αξιολόγηση και τη διαχείριση του θορύβου στο περιβάλλον, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2002/49/ΕΚ «σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου» του Συμβουλίου της 25.6.2002» *ΦΕΚ 384/Β/28-03-2006*, Αθήνα (2006)
- [7] Ν. 3463/06 «Κύρωση του Κώδικα Δήμων και Κοινοτήτων» *ΦΕΚ 114Α/8-6-2006*, Αθήνα (2006)

- [8] Ν. Μπάρκας, Ρ. Δεληγιαννίδου, Δ. Μαυρίδου «All day bars στο κέντρο της Θεσσαλονίκης: ηχορύπανση, ηχομονωτικές ανεπάρκειες και νομοθετικές ελλείψεις», Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2006
- [9] Γ. Κωστής, Α. Παΐδας, Δ. Πλιάτσικας, Ν. Μπάρκας « Κέντρα διασκέδασης σε Βόλο και Ιωάννινα : θόρυβοι λειτουργίας και προβλήματα ηχοπροστασίας των εγγύς κατοικιών», Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2012,
- [10] Π. Χαλαζωνίτης « Έλεγχος και εφαρμογή των υγειονομικών διατάξεων για την ηχορύπανση από τα καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος», Πρακτικά Ημερίδας: *Οι επιπτώσεις της ηχορύπανσης στα αστικά κέντρα – Αναγκαία μέτρα και παρεμβάσεις*, ΤΕΕ, Αθήνα (2008)
- [11] ΟΔΗΓΙΑ 2002/49/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, «Σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου», *Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων*, Ιούνιος (2002)
- [12] G. Monay, V. Desarnaulds, A. Carvalho «Noise from amplified music played in discothèques, pubs and clubs-A review of some national regulations», *Euronoise*, Naples, 172/P.1 (2003)
- [13] S. Mitchell «Neighbour and Neighbourhood Noise – A review of European Legislation and practices», DEFRA, Research Contract EPG 1/2/36, March (2002)



## **Μείωση θορύβου από νυχτερινά κέντρα με χρήση πολυκάναλου συστήματος ενεργού ελέγχου του θορύβου**

Νίκος Ζαφειρόπουλος<sup>1,a</sup> & Στέλιος Ποτηράκης<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> (NVH)/Pymms Lane, Crewe CW1 3PL

<sup>2</sup> Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχ. ΤΕ, ΤΕΙ Πειραιά, Θηβών 250, Αιγάλεω

<sup>a</sup> [Nikos.Zafeiropoulos.Contractor@bentley.co.uk](mailto:Nikos.Zafeiropoulos.Contractor@bentley.co.uk), <sup>b</sup> [spoti@teipir.gr](mailto:spoti@teipir.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σε πολλές κτιριακές κατασκευές αλλά και σε μέσα μεταφοράς, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος επιτρέπουν τη διάδοση δονήσεων χαμηλών συχνοτήτων που γίνονται αντιληπτές ως θόρυβος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οικίες που γειτνιάζουν με νυχτερινά κέντρα διασκέδασης, οι οποίες ενοχλούνται από την υψηλή στάθμη αναπαραγωγής της μουσικής εντός των κέντρων. Η εργασία αυτή περιγράφει μια ολοκληρωμένη λύση για τον ενεργό έλεγχο του θορύβου σε εφαρμογές σαν τις πιο πάνω και ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου οι συνήθεις προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δεν καταφέρνουν να συγκλίνουν λόγω των στατιστικών χαρακτηριστικών του θορύβου. Για τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται μια συγκεκριμένη μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθείται ώστε να βρεθούν τα κατάλληλα φίλτρα που θα είναι ικανά να δημιουργήσουν τους κατάλληλους «αντιθόρυβους» για οποιοδήποτε θόρυβο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε προσαρμοστικούς αλγόριθμους στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ παρουσιάζεται η εφαρμογή της στην περίπτωση ενός δωματίου με σχετικά μεγάλο χρόνο αντήχησης.

### **Noise reduction of disturbances caused by nightclub music with the use of multichannel Active Noise Control**

#### **ABSTRACT**

*In many modern building constructions and transportation systems, the structural dynamics of each system can result to low frequency vibrations that propagate and can be perceived as structure-borne noise. For instance residences that are close to nightclubs can be disturbed from the high sound pressure levels of music that are generated by professional audio systems inside the clubs. This paper presents a solution based on Active Noise Control system of broadband excitations in cases like the previously mentioned, where the adaptive algorithms cannot converge due to the statistical characteristics of the noise. In these cases a methodology for computing the control filters of the system is suggested that can generate the “anti-noise” signals for any type of noise. The proposed methodology is based on the adaptive algorithms in the frequency domain and it is applied on a room with relatively high reverberation time.*

## Εισαγωγή

Σε πολλές κτιριακές κατασκευές αλλά και σε μέσα μεταφοράς, τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος επιτρέπουν τη διάδοση δονήσεων χαμηλών συχνοτήτων που γίνονται αντιληπτές ως θόρυβος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οικίες που γειτνιάζουν με νυκτερινά κέντρα διασκέδασης, οι οποίες ενοχλούνται από την υψηλή στάθμη αναπαραγωγής της μουσικής εντός των κέντρων. Εκεί, ενώ συνήθως υπάρχει πρόβλεψη για την μείωση του αερόφερτου θορύβου, το μέρος του θορύβου που μεταφέρεται μέσω των δομικών στοιχείων με τη μορφή δονήσεων δημιουργεί ενοχλητικό θόρυβο στα γειτονικά σπίτια.

Αντίστοιχα προβλήματα εμφανίζονται επίσης σε πλοία όπου οι χαμηλές συχνότητες της μουσικής από τους χώρους εστίασης/διασκέδασης, καθώς και οι δονήσεις λόγω του συστήματος κίνησης του πλοίου διεγείρουν τις ιδιοσυχνότητες ταλάντωσής του. Για να μειωθούν αποτελεσματικά οι δονήσεις που προκαλούν κτυπογενή θόρυβο χαμηλών συχνοτήτων χρειάζεται να μειωθούν οι δυνάμεις που ασκούνται στην εκάστοτε δομή και διεγείρουν ιδιοσυχνότητες που είναι συσχετισμένες με το θόρυβο. Τέτοια φαινόμενα μπορούν, μερικώς, να αντιμετωπιστούν κυρίως με συντονισμένα συστήματα μαζών και αποσβεστήρων τα οποία όμως σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αυξήσουν αισθητά το συνολικό βάρος της δομής. Επίσης, τα σημεία όπου αυτά πρέπει να τοποθετηθούν αποτελούν μια μη πρακτική λύση διότι απαιτούν ανασχεδίαση και ανακατασκευή όλου του συστήματος, ενώ τέλος για ευρυζωνικές διεγέρσεις πρέπει να τοποθετηθούν σε πολλαπλά σημεία που συμβάλουν στη διάδοση των δονήσεων ώστε να γίνει αισθητή η μείωση σε όλο το φάσμα του εκάστοτε θορύβου.

Ως εναλλακτική στις παθητικές λύσεις μείωσης κτυπογενούς θορύβου, η εργασία αυτή περιγράφει μια ολοκληρωμένη λύση για τον ενεργό έλεγχο του θορύβου σε εφαρμογές σαν τις πιο πάνω και ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου οι συνήθεις προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δεν καταφέρνουν να συγκλίνουν λόγω των στατιστικών χαρακτηριστικών του θορύβου. Για τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται μια συγκεκριμένη μεθοδολογία που θα πρέπει να ακολουθείται ώστε να βρεθούν τα κατάλληλα φίλτρα που θα είναι ικανά να δημιουργήσουν τους κατάλληλους «αντιθόρυβους» για οποιοδήποτε θόρυβο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται σε προσαρμοστικούς αλγόριθμους στο πεδίο των συχνοτήτων, ενώ παρουσιάζεται η εφαρμογή της στην περίπτωση ενός δωματίου με σχετικά μεγάλο χρόνο αντήχησης.

### 1. Πολυκάνναλος αλγόριθμος στο πεδίο των συχνοτήτων

Για τον έλεγχο της ακουστικής ενέργειας σε ένα δωμάτιο, όπου η πηγή θορύβου προέρχεται από κάποιο άλλο χώρο στο κτίσμα έχουν προταθεί πολυκάνναλα προσαρμοστικά συστήματα όπως στην αναφορά [1].

Σε χώρους με μεγάλο χρόνο αντήχησης και χαμηλή ακουστική απόσβεση στους ακουστικούς συντονισμούς κάτω από τα 500 Hz τα φίλτρα που πρέπει να εκπαιδευτούν έχουν μεγάλο μήκος [1]. Στην παρούσα εργασία το σύστημα προσαρμόζεται στο πεδίο των συχνοτήτων [2], ώστε να μειωθούν οι υπολογισμοί του αλγορίθμου και να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν FIR φίλτρα μεγάλου μήκους. Τα φίλτρα αυτά ικανά να αναγνωρίσουν όλους συντονισμούς του φυσικού συστήματος από τα 20 μέχρι τα 120 Hz και να ακυρώσουν το θόρυβο λόγω

της διάδοσης της μουσικής διαταραχής που γίνεται αντιληπτή σε βουητό (“booming”) στο δωμάτιο.

### 1.1 Προσαρμοστικός αλγόριθμος –Filtered Reference LMS with frequency domain adaptation

Από την υπέρθεση των ακουστικών κυμάτων του θορύβου με τον αντιθορύβο που εκπέμπεται από τα ηχεία δημιουργούνται σημεία στο χώρο με μειωμένη ακουστική στάθμη. Κατά την εκπαίδευση του αλγορίθμου τα ακουστικά σήματα στα σημεία αυτά τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο σε σφάλματα, τα οποία μειώνονται συνεχώς μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος σε κάποιο σετ φίλτρων.

$$e_l(n) = d_l(n) + \hat{d}_l(n), \text{ όπου } l=1, \dots, L. \quad (1.1.1)$$

Οι αντιθορύβοι  $\hat{d}_l(n)$  στα σημεία των L-μικροφώνων είναι αποτέλεσμα των συνελίξεων μεταξύ των σημάτων που οδηγούν τα ηχεία,  $u_m(n)$  και των ακουστικών συστημάτων  $c_{lm}(n)$  μεταξύ των M-ηχείων και των L-μικροφώνων [2].

$$\hat{d}_l(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{J-1} c_{lmj} u_m(n-j), \quad (1.1.2)$$

όπου j είναι το μήκος των FIR φίλτρων που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των κρουστικών αποκρίσεων των ηλεκτροακουστικών συστημάτων.

Για την εκτίμηση των ετεροσυσχετίσεων στο πεδίο των συχνοτήτων  $S_{lm}(k)$  μεταξύ των φιλτραρισμένων σημάτων αναφοράς  $R_{lm}(k)$  και των μετασχηματισμένων σημάτων των μικροφώνων  $E_l(k)$ , χρησιμοποιούνται FFTs με μήκος  $2*N$ , όπου N το μήκος των buffers με 50% επικάλυψη μεταξύ των δειγμάτων [2].

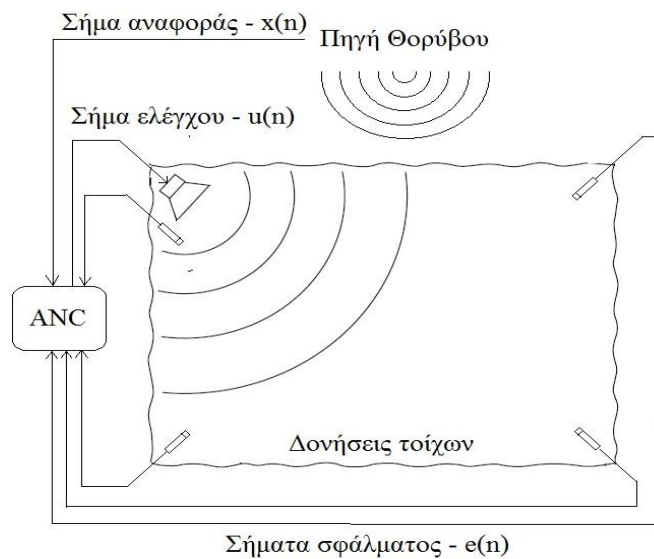
Η εξίσωση της ανανέωσης των συντελεστών των φίλτρων μπορεί να γραφεί με τη χρήση ανάστροφου μετασχηματισμού στο χρόνο IFFT [2] ως ακολούθως

$$w_{mi}(n+N) = w_{mi}(n) - \alpha IFFT \left\{ \sum_{l=1}^L R_{lm}^*(k) E_l(k) \right\}, \quad (1.1.3)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής ρυθμού ανανέωσης της εξίσωσης, ο οποίος επίσης καθορίζει την ταχύτητα της σύγκλισης του αλγορίθμου σε ένα σετ φίλτρων. Τα φιλτραρισμένα σήματα αναφοράς  $R_{lm}^*(k)$  είναι αποτέλεσμα πολλαπλασιασμού του σήματος αναφοράς με τα μοντέλα των  $c_{lmj}$  στο πεδίο των συχνοτήτων [2].

## 2. Πειραματικό μέρος

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το σήμα αναφοράς προέρχεται κατευθείαν από την έξοδο του ενισχυτή ήχου. Η πηγή θορύβου είναι ένα υπογούφερ το οποίο ήταν τοποθετημένο σε έναν γειτονικό χώρο κοντά στο δωμάτιο. Το σύστημα ελέγχου αποτελούταν από δύο ηχεία τοποθετημένα στο τείχος που χώριζε τους δύο χώρους και τέσσερα μικρόφωνα στις τέσσερις πάνω γωνίες του δωματίου. Ο αλγόριθμος προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Simulink ώστε να επικοινωνεί με τη πλατφόρμα DSpace όπου έτρεχε ο αλγόριθμος. Το σύστημα DSpace δειγματοληπτούσε με περίοδο 3.3 msec και τα φίλτρα μήκους 256 ανανεωνόντουσαν κάθε 1.7 sec.



Σχήμα 2.1. Έλεγχος θορύβου σε δώματι λόγω διάδοσης χτυπογενή θορύβου.

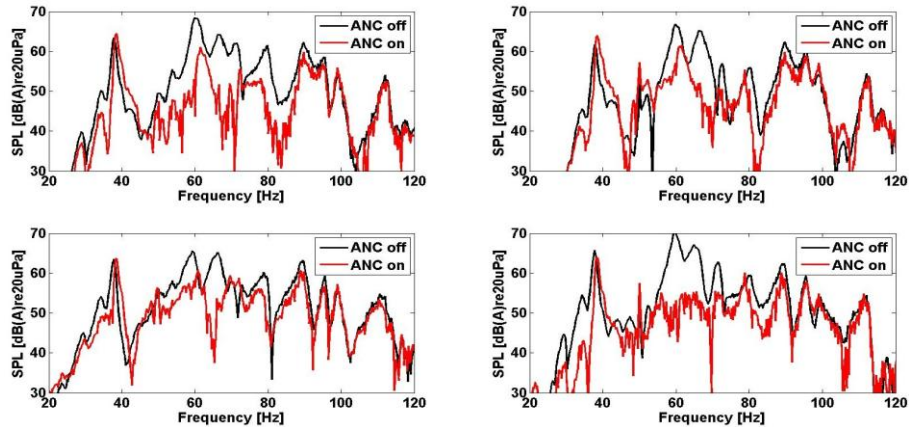
Παράλληλα με τον ελεγκτή τα σήματα από τα μικρόφωνα που χρησιμοποιούνται από τον ελεγκτή καταγράφονται από έναν αναλυτή φάσματος της Briel & Kjaer. Επίσης ένα μικρόφωνο με περιστροφική βάση δειγματοληπτούσε χωρικά την ακουστική πίεση ώστε να γίνει αξιολόγηση της μείωσης της ακουστικής ενέργειας στο χώρο.

## 3. Αποτελέσματα

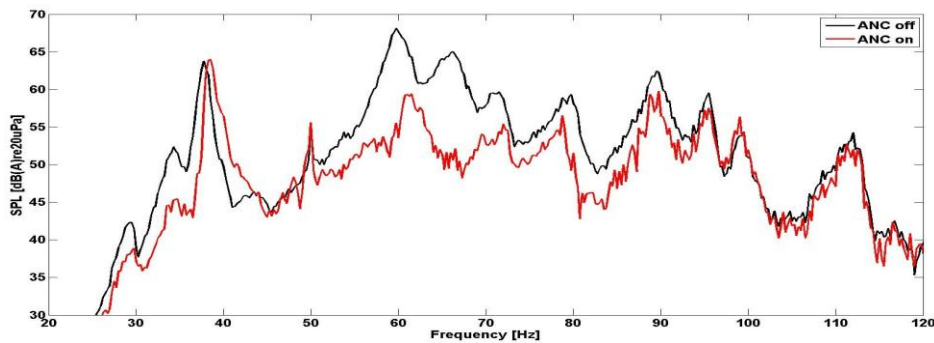
### 3.1 Λευκός θόρυβος (εκπαίδευση του αλγορίθμου)

Αρχικά τα ηχεία οδηγήθηκαν με λευκό θόρυβο για να υπολογιστούν τα κατάλληλα βέλτιστα φίλτρα από τον αλγόριθμο. Μετά από 15-20 λεπτά ο αλγόριθμος συνέκλινε σε ένα σετ φίλτρων και μόλις σταθεροποιήθηκε η μείωση σε κάθε μικρόφωνο, τότε έγινε καταγραφή της μείωσης στο ακουστικό πεδίο με τη χρήση του περιστροφικού μικροφώνου (rotating microphone boom). Τα

αποτελέσματα αυτής της καταγραφής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.1, ενώ ο αντίστοιχος χωρικός μέσος όρος της ακουστικής πίεσης φαίνεται στο Σχήμα 3.1.2. Η μείωση είναι κυρίως αποτελεσματική σε τρεις συντονισμούς μεταξύ 50 Hz και 70 Hz. Ο πρώτος συντονισμός του δωματίου δεν μειώνεται αποτελεσματικά, λόγω πιθανότατα του μικρού αριθμού ηχείων και της τοποθέτησης τους.



Σχήμα 3.1.1. Ακουστική πίεση στα τέσσερα μικρόφωνα του συστήματος. Μαύρο: Χωρίς Ενεργό Έλεγχο, Κόκκινο: Με Ενεργό Έλεγχο.

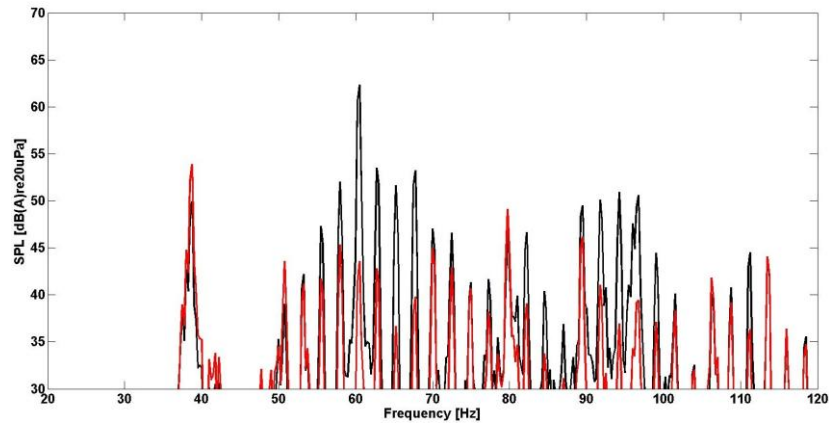


Σχήμα 3.1.2. Χωρικός μέσος όρος της ακουστικής πίεσης στη περίπτωση λευκού θορύβου. Μαύρο: Χωρίς Ενεργό Έλεγχο, Κόκκινο: Με Ενεργό Έλεγχο.

### 3.2 Μουσικό σήμα (φίλτρα με σταθερούς συντελεστές)

Τα φίλτρα που εκπαιδεύτηκαν στο προηγούμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν για την ακύρωση ενός μουσικού σήματος με ισχυρές χαμηλές συχνότητες. Στο Σχήμα 3.2.1 παρουσιάζεται η μείωση στο πεδίο των συχνοτήτων για ένα κομμάτι ηλεκτρονικής μουσικής (train pulse signal), το οποίο είναι ένα άθροισμα πολλαπλών αρμονικών. Η καλύτερη μείωση επιτυγχάνεται στα 60 Hz, γύρω στα 19 dB(A),

λόγω της μεγάλης συσχέτισης μεταξύ του σήματος αναφοράς και του μετρούμενου θορύβου από τα μικρόφωνα



Σχήμα 3.2.1 Χωρικός μέσος όρων της ακουστικής πίεσης στο πεδίο των συχνοτήτων στο χώρο του δωματίου για μια καταγραφή 20 δευτερολέπτων ενός μουσικού σήματος. Μαύρο: Χωρίς Ενεργό Έλεγχο, Κόκκινο: Με Ενεργό Έλεγχο.

#### 4. Συμπέρασμα

Η μείωση της μουσικής γίνεται αντιληπτή μεταξύ 60-100 Hz, λόγω της καλής απόδοσης του συστήματος κατά την εκπαίδευση του με λευκό θόρυβο. Συνεπώς είναι σημαντικό το σύστημα να αποδίδει καλή μείωση με λευκό θόρυβο πριν την εφαρμογή του σε ένα πρόβλημα κτυπογενούς θορύβου, αφού το σετ των φίλτρων που προκύπτει έχει αναγνωρίσει όλους του συντονισμούς του φυσικού συστήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι όποιο σήμα αναφοράς και αν τροφοδοτείται σαν είσοδος να μην χρειάζεται το σύστημα να εκπαιδευτεί ξανά και μάλιστα να αποδίδει βέλτιστη μείωση σε συχνότητες όπου έχουν αναγνωριστεί με μικρό σφάλμα.

#### 5. Αναφορές

- [1] S. Laugesen, S.J. Elliott, «Multichannel Active Noise Control of Random Noise in Small Reverberant Room», IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, vol. I, no. 2, pp. 241-249, (1993).
- [2] S.J. Elliott, «Signal Processing for Active Control», Academic Press, pp. 151-154 (2001).

## ***Ακουστική μελέτη στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου***

Αριστείδης Καρατζούνης<sup>a</sup>, Χρυσούλα Σοφιανού<sup>b</sup>, Κωνσταντίνος Μπακογιάννης<sup>c</sup> &  
Γεώργιος Καμπουράκης<sup>d</sup>

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών & Μηχ/κών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [arounas@hotmail.com](mailto:arounas@hotmail.com), <sup>b</sup> [chryssosf@hotmail.com](mailto:chryssosf@hotmail.com), <sup>c</sup> [kostas\\_bako@hotmail.com](mailto:kostas_bako@hotmail.com), <sup>d</sup> [gcamb@cs.ntua.gr](mailto:gcamb@cs.ntua.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η έκθεση σε θορυβώδη περιβάλλοντα είναι χαρακτηριστικό των καιρών μας για το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού, ειδικά στα αστικά κέντρα. Η κατάσταση αυτή επηρεάζει καταλυτικά το σύνολο σχεδόν των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ειδικά αυτών οι οποίες προδιαθέτουν ησυχία, όπως η εκπαιδευτική δραστηριότητα.*

*Αν και η σύγχρονη νομοθεσία περιλαμβάνει κάποια στοιχειώδη μέριμνα για τις αναγκαίες ακουστικές συνθήκες για την τέλεση της εκπαιδευτικής δραστηριότητας, η πραγματικότητα απέχει από αυτές. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε όλες τις βαθμίδες και ειδικά στην τριτοβάθμια, όπου η εκπαιδευτική διαδικασία αφορά πολλές δεκάδες ακροατηρίου. Ο χώρος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου βρίσκεται σε campus, επομένως θεωρητικά τουλάχιστον η θορυβική επιβάρυνση από την οδική κυκλοφορία είναι περιορισμένη. Η καταγραφή και η αξιολόγηση όμως των ακουστικών συνθηκών εντός του ιδρύματος είναι αναγκαία για τη βελτίωση της ακαδημαϊκής διαδικασίας. Η εργασία αυτή περιλαμβάνει μία πρώτη τέτοια απόπειρα.*

## ***Acoustic Study in the National Technical University of Athens***

### **ABSTRACT**

*Population in urban areas is constantly exposed to noisy environment. This, affects almost every human activity, but mainly those which demand quietness, such as educational activity. Even though modern legislation describes the prerequisite conditions for a proper educational activity, those are not thoroughly implemented. This situation is more noticeable in university education, which involves dozens of audience. National Technical University of Athens is stated in a campus where traffic noise is limited. Nonetheless, recording and evaluating the acoustic circumstances of the University is crucial for the improvement of the academic procedure. This paper claims to be a beginning of this task.*

## **Εισαγωγή**

Αυτή η εργασία πραγματεύεται τη μερική αξιολόγηση των ακουστικών συνθηκών εντός του χώρου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου οι οποίες επηρεάζουν την εκπαιδευτική διαδικασία. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, έγιναν δειγματοληπτικές μετρήσεις σε σημεία κλειδιά αναφορικά με τη σημεία ενδιαφέροντός μας, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά του χώρου του ιδρύματος.

## **1. Μεθοδολογία**

### *1.1. Μετρήσεις*

Στην παρούσα μελέτη ασχοληθήκαμε επιλεκτικά με κάποια αμφιθέατρα των πέντε πολυπληθέστερων σχολών της Πολυτεχνειούπολης (Ηλεκτρολόγοι, Μηχανολόγοι, Πολιτικοί, Τοπογράφοι, Χημικοί Μηχανικοί), τους χώρους συνάθροισης και τα κυλικεία που γειτνιάζουν με τα αμφιθέατρα αυτά. Θεωρήσαμε ότι σε αυτούς τους χώρους περιορίζεται κατά κύριο λόγο η μετακίνηση των φοιτητών που περνούν την ημέρα τους στις συγκεκριμένες σχολές.

Επιπλέον ελήφθησαν μετρήσεις περιμετρικά του χώρου του Πολυτεχνείου στην πλευρά της Λεωφόρου Κατεχάκη, όπου παρατηρείται αυξημένος θόρυβος λόγω του αυτοκινητόδρομου, και αντίστοιχες μετρήσεις κοντά στα πρώτα κτήρια που συναντούμε καθώς εισερχόμαστε στις εγκαταστάσεις.

Σε κάθε θέση έγιναν δειγματοληπτικές μετρήσεις διάρκειας τουλάχιστον 15 λεπτών σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους: το πρωί, το μεσημέρι και το βράδυ, καθώς επίσης και σε διαφορετικές συνθήκες: σε ώρα μαθήματος και διαλείμματος. Τέλος κρίθηκαν χρήσιμες ορισμένες μετρήσεις στο εστιατόριο και σε μια βιβλιοθήκη (επιλέχθηκε αυτή των Ηλεκτρολόγων).

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το ηχόμετρο, της εταιρίας Brüel&Kjaer, τύπου 2270. Παράλληλα, τις στιγμές των μετρήσεων έγινε ηχογράφηση με H/Y και κατόπιν επεξεργασία τους μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab.

### *1.2. Μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν*

Τα ακουστικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιήσαμε για να προβούμε στις αξιολογήσεις μας είναι η ισοδύναμη στάθμη θορύβου (LAeq), τα ποσοστομοριακά επίπεδα L10, L50 και L90, καθώς η τριτοκταβική φασματική ανάλυση.

## **2. Παράθεση αποτελεσμάτων / Συμπεράσματα**

### *2.1. Μετρήσεις που αφορούν τον εξωτερικό κυκλοφοριακό θόρυβο*

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε τρία σημεία. Έξω από την κεντρική πύλη του ιδρύματος επί της Λ. Κατεχάκη, στο μέσο και στην άκρη της περιφράξης του

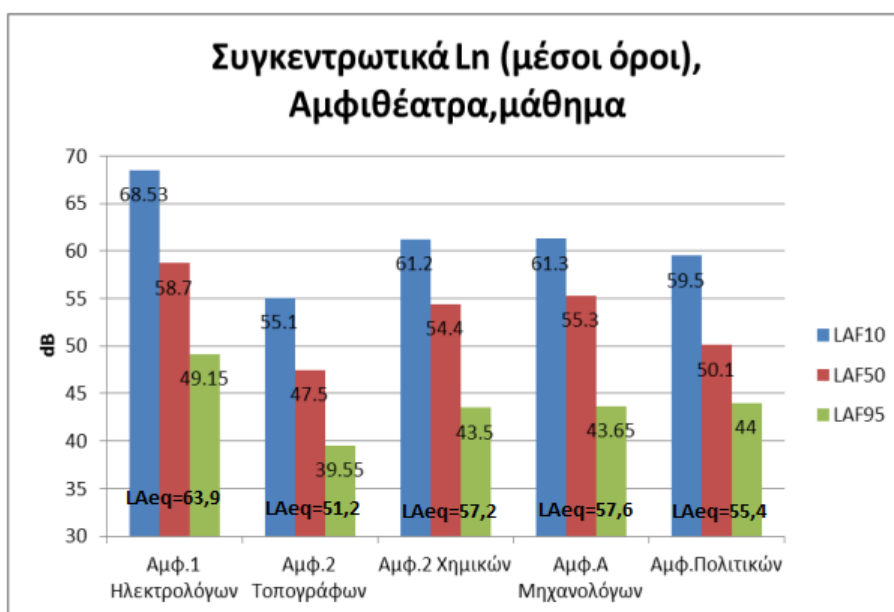


ιδρύματος επί της λεωφόρου. Παράλληλα, έγιναν μετρήσεις στη νοητή κάθετο των σημείων αυτών με την Κατεχάκη στο σημείο στο οποίο συναντάται το πρώτο κτήριο. Οι τιμές που καταγράφηκαν όσον αφορά το LAeq είναι αντίστοιχα για τα εξωτερικά και τα αντίστοιχα εσωτερικά σημεία 92,5 – 69,1, 93,8 – 74,2, 91,3 – 69,8 dBA.

Παρατηρούμε ότι τα 100 τουλάχιστον μέτρα απόστασης της λεωφόρου από το πρώτο κτήριο εντός του ιδρύματος, καθώς και η συστάδα δέντρων που μεσολαβεί εξασφαλίζει μια μείωση της τάξης των 20dBA σε σχέση με τον αυξημένο κυκλοφοριακό θόρυβο. Τα 70 περίπου dBA τα οποία μετρούνται στις προσόψεις των κτηρίων, αφορούν ως επί το πλείστον την «πλάτη» των κτηρίων και όποια παράθυρα υπάρχουν, μειωμένης ηχομονωτικής ικανότητας, είναι γραφείων και όχι αιθουσών στις οποίες να συντελείται κάποια εκπαιδευτική δραστηριότητα.

## 2.2. Μετρήσεις που αφορούν δραστηριότητες εντός του ιδρύματος

### 2.2.1. Αμφιθέατρα



Εικόνα 2.1. Ποσοστομοριακά μεγέθη στα αμφιθέατρα

Τα αμφιθέατρα αποτελούν το χώρο διεξαγωγής των μαθημάτων και ως εκ τούτου είναι οι χώροι με τη μεγαλύτερη σημασία. Παρατηρούμε σε όλα ικανοποιητικό θόρυβο βάθους, το οποίο όπως φαίνεται και από τους υπόλοιπους δείκτες εξασφαλίζει ικανοποιητικό SNR για την αντιληπτότητα της ομιλίας του καθηγητή. Τα φασματογραφήματά τους υποδηλώνουν σαφώς φάσματα ομιλίας, ενώ τυχόν εξωτερικός θόρυβος δεν εισέρχεται μέσα στα αμφιθέατρα.

### 2.2.2. Κυκλικία

Τα κυκλικία είναι ως επί το πλείστον ο χώρος στον οποίο περνά ο φοιτητής το ολιγόλεπτο διάλειμμά του ανάμεσα από τις παραδόσεις. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικοί χώροι αναφορικά με την εκπαιδευτική διαδικασία γιατί πρέπει θεωρητικά να προσφέρουν στιγμές χαλάρωσης και ανασυγκρότησης. Παρολ' αυτά, οι τιμές της LAeq είναι ιδιαίτερος υψηλές σε όλες τις περιπτώσεις, κάνοντας το χώρο ακουστικά μη ικανό να ανταπεξέλθει στο ρόλο του. Αναλυτικότερα, για τους Ηλεκτρολόγους, τους Μηχανολόγους, τους Χημικούς, τους Τοπογράφους και τους Πολιτικές οι τιμές που καταγράφηκαν είναι αντίστοιχα 80,8, 75,2, 75,3, 76,9, 75,8dBA.

### 2.2.3. Αντιπροσωπευτικοί χώροι με ενδιαφέρον

#### Διάδρομος Πολιτικών Μηχανικών

Πρόκειται για έναν στενό, χαμηλοτάβανο διάδρομο στον οποίο βρίσκονται οι είσοδοι των σημαντικότερων αιθουσών διδασκαλίας της σχολής των Πολ. Μηχ. ενώ παράλληλα φιλοξενεί πολλούς φοιτητές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας καθότι εκεί βρίσκονται οι χώροι των φοιτητικών συλλογικοτήτων. Τόσο τα ποσοστομοριακά μεγέθη, όσο και οι ισοδύναμες στάθμες θορύβου παρουσιάζουν ιδιαίτερος κοντινές τιμές κατά τη διάρκεια του μαθήματος και στο διάλειμμα (69,2 και 70,9 dBA το LAeq αντίστοιχα), αποδεικνύοντας την έντονη επιβάρυνση του διαδρόμου στις γειννιάζουσες αίθουσες. Η μελέτη του διαδρόμου αυτή έγινε για να συμβάλει στον προβληματισμό αναλογικά με τη σωστή χωροταξική κατανομή των δραστηριοτήτων οι οποίες συντελούνται εντός του ιδρύματος.

#### Βιβλιοθήκη Ηλεκτρολόγων

Πρόκειται για μια τυπική βιβλιοθήκη τμήματος η οποία έχει τόσο τη λειτουργία του δανεισμού βιβλίων όσο και του αναγνωστηρίου. Το φασματογράφημα υποδηλώνει ότι οι βασικές συνιστώσες θορύβου είναι οι χαμηλές. Ο θόρυβος βάθους καταγράφεται λίγο μικρότερος από 50dBA, τιμή ικανοποιητική ενώ υπάρχουν στον χώρο τουλάχιστον 20 φοιτητές. Το LAeq είναι αρκετά χαμηλό, περίπου 58dBA.

#### Εργαστήριο Ηλεκτρολόγων

Πρόκειται για εργαστήριο με ήπιο εξοπλισμό (παλμογράφοι, γεννήτριες, τροφοδοτικά κλπ), το οποίο φιλοξενεί παράλληλα 25ομάδες των 2-3 ατόμων. Ο θόρυβος βάθους καταγράφηκε στα 46,3Dba ενώ το LAeq στα 57,9. Η βασική πηγή θορύβου είναι ως επί το πλείστον η ομιλία του διδάσκοντος και οι ομιλίες μεταξύ των συνεργατών φοιτητών σε κάθε ομάδα. Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου δε διαμορφώνει έντονο θόρυβο βάθους, επομένως αν οι ίδιοι οι φοιτητές διατηρήσουν ένα επίπεδο ησυχίας τότε δε θα παρατηρηθούν έντονα προβλήματα.

### Εστιατόριο

Το εστιατόριο του ιδρύματος είναι ένας χώρος πολλών τετραγωνικών με πολλά τραπέζοκαθίσματα, μεγάλη κουζίνα, ψύκτες και ψυγεία, χώρους συγκομιδής δίσκων, χώρος «λάντζας» κ.α. Η πληθώρα δραστηριοτήτων στο χώρο αυτό διαμορφώνει συνθήκες θορύβου σε όλο το εύρος συχνοτήτων, όπως δείχνει το φασματογράφημα, με έμφαση στις μεσαίες συχνότητες, κυρίως στις συχνότητες ομιλίας. Ο θόρυβος βάθους και το LAeq είναι πολύ κοντινά (70 και 74dBA αντίστοιχα), υποδηλώνοντας ότι δεν υπάρχουν διακυμάνσεις στις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο. Αν και ο χώρος αυτός δεν έχει τη λειτουργία της ξεκούρασης ανάμεσα στα μαθήματα, η παρατεταμένη παρουσία σε αυτόν ενδεχομένως να δημιουργήσει κόπωση.

#### *2.3. Γενικά συμπεράσματα*

Στο campus επικρατούν σε γενικές γραμμές ικανοποιητικές συνθήκες ησυχίας, ενώ ο κυκλοφοριακός θόρυβος εξωτερικά του ιδρύματος δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ακουστική κατάσταση εσωτερικά του ιδρύματος. Επομένως, ο κυρίαρχος παράγοντας στον οποίο οφείλεται ο όποιος θόρυβος επιβαρύνει την εκπαιδευτική δραστηριότητα, αυτός είναι ο ανθρώπινος και δη η ομιλία. Στα αμφιθέατρα ως επί το πλείστον οι συνθήκες διδασκαλίας είναι

### **3. Αναφορές**

- [1] Καμπουράκης Γεώργιος «Η ακουστική των αιθουσών διδασκαλίας και οι επιπτώσεις της στην επικοινωνία» Τεχνικά Χρονικά Διμηναία Έκδοση ΤΕΕ τεύχ. 3 σελ. 21 (Μάιος - Ιούν. 2005)
- [2] Κωνσταντίνος Μπακογιάννης, Γεώργιος Καμπουράκης, Τηλέμαχος Καραντζάς «Ακουστική Μελέτη Σχολικών Αιθουσών Μέσης Εκπαίδευσης» 6<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Ακουστικής, ΕΛ.ΙΝ.Α., Κέρκυρα (2012)
- [3] Οργανισμός Σχολικών Κτιρίων «Οδηγός Μελετών για διδακτήρια όλων των βαθμίδων εκπαίδευσης», Αθήνα (2008)
- [4] Kurt Eggenschwiler, «Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement», ForumAcusticum (2005)
- [5] Κωνσταντίνος Μπακογιάννης «Ακουστική Μελέτη Σχολικών Αιθουσών Μέσης Εκπαίδευσης» διπλωματική εργασία, επιβλέπων Γεώργιος Καμπουράκης, HMMY ΕΜΠ 2011

## ***The QUIET-TRACK Project - Noise Mitigation Measures at ISAP Line 1***

Konstantinos Vogiatzis<sup>1a</sup>, Charalampos Antoniadis<sup>1b</sup>, Vassilios Liapis<sup>2a</sup>, Nikos Konstantopoulos<sup>2b</sup> & Alexandros Argyropoulos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> University of Thessaly, Civil Eng. Dept., LTEA, Pedion Areos, 383 34 Volos, <sup>a</sup>[kvogiatz@uth.gr](mailto:kvogiatz@uth.gr) / <sup>b</sup>[xantoniadis@civ.uth.gr](mailto:xantoniadis@civ.uth.gr)

<sup>2</sup> STASY SA, 67, Athinas str. 105 52 Athens, <sup>a</sup>[billy\\_liapis@yahoo.gr](mailto:billy_liapis@yahoo.gr) / <sup>b</sup>[nkonstantopoulos@stasy.gr](mailto:nkonstantopoulos@stasy.gr)

<sup>3</sup> KASTOR SA / Amarisias – Artemidos, 151 24 Marousi, [Alargyropoulos@aktor.gr](mailto:Alargyropoulos@aktor.gr)

### **ABSTRACT**

*Within the framework of the European Project QUIET TRACK (Project N°604891: Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures), which was approved by the Commission In the context of the "7th Framework Programme for research and technological development and demonstration activities", and especially within the relevant working package, (WP4), the project aims to develop novel mitigation solutions at the level of noise and bearing track and the successful combination. As a prototype test site has been selected by the program, the Attiko Metro line 1 (former ISAP) in Athens, where the system RHEDA is installed. This paper presents the first very interesting results on antinoise mitigation measures introducing the implementation of sound absorption prefabricated panels «SounSorb».*

### ***Το πρόγραμμα QUIET-TRACK – Μέτρα περιορισμού του θορύβου στην γραμμή 1 του ΗΣΑΠ***

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος QUIET TRACK (Project N° 604891: Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures), το οποίο εγκρίθηκε από την Commission στο πλαίσιο του «7th Framework Programme for research and technological development and demonstration activities», και ιδιαίτερα μέσω του ειδικού working package, (WP4), τέθηκε σαν στόχος η ανάπτυξη και ο επιτυχής συνδυασμός πρωτότυπων αντιθορυβικών λύσεων σε επίπεδο τροχιάς και έδρασης της. Ως πρωτότυπο «test site» έχει επιλεγεί από το πρόγραμμα, η γραμμή Μετρό 1 (πρώην ΗΣΑΠ) στην Αθήνα, όπου έχει εγκατασταθεί το σύστημα RHEDA. Στην παρούσα εργασία δίνονται τα πρώτα ιδιαίτερος ενδιαφέροντα αποτελέσματα αποτελεσματικής αντιθορυβικής προστασίας με την εφαρμογή ηχο-απορροφητικών προκατασκευασμένων πανέλων «SoundSorb».*

## Introduction

Noise level to which populations along the railway lines are submitted is largely generated and/or amplified by the infrastructure and this total noise emission is subject to limitation coming from national environmental regulations, harmonized under other European legislative instruments. The QUIET-TRACK is an FP7-SST-2013-RTD-1 project, under activity code SST.2013.1-1: Railway infrastructure optimization and monitoring for further noise reduction [1].

The project has started on June 1, 2013 and has a duration of 36 months. The objective is to provide step changing track based noise mitigation systems and maintenance schemes, to provide reliable improved TSI based rolling noise calculation procedures with harmonized monitoring of the required input parameters and to provide track noise management tools, for use in noise mapping and hot spot action plans according to the END, for use as engineering tools and solutions in new railway projects and in refurbishment projects and for use by the track maintenance managers and track maintenance industry. In particular new track solutions, including embedded track systems, will be developed which to yield a noise reduction performance of at least 6 dB(A) in comparison with the global rolling noise measured on a well maintained standard track in the network of the participating infra managers. The solutions will be applicable to tram, LRT and metro tracks as well as to conventional tracks in the whole European Union. The developed solutions should not back-up a poor initial design. This is why attention is paid to a good initial design with a procedure for selecting the best rail type and the best rail hardness in terms of minimizing the noise related wear. A procedure for checking the economic viability of the solutions will be developed. This will result in holistic noise management plans for the introduction of the noise abatement solutions.

Quiet- Track is expected to develop strategies for optimal acoustic grinding and rail wear correction, to combine existing solutions for a better global performance, especially for situations where this potential is available such as concrete slab tracks where it is possible to deal independently with measures at the rail (e.g. damping) and at the track surface (e.g. absorption) [2]. The expected impact focus on

- Development and standardization of operational monitoring systems for track based on the track emissions parameters identified in the Noise Technical Specification for Interoperability (TSI).
- Development of innovative solutions (design) for a reduction of track related noise.
- Development of concepts and tools for economic maintenance of track considering the whole life-cycle with the aim to achieve a track optimization and further noise reduction.
- Contribution to the expected revision of TSI – noise.
- Development of a test procedure for in situ characterization of NRD Insertion Loss.

## 1. The Work Package WP4 - Athens test site at ISAP line 1

TT&E Consultants SA, with the support of the Laboratory of Transportation Environmental Acoustics (LTEA) of the University of Thessaly and STASY S.A the operator of ISAP line 1, participates in this project. The relevant Work Package WP4 aims at the Development and validation of high performance solutions for reduction of track related noise. The objectives of WP4 are to develop and validate a methodology for combining existing noise mitigation solutions for high performance; to develop innovative track solutions, based upon the concept of rail roughness growth rate reduction; to develop a low noise embedded track system; and finally to recommend a rail type and hardness for low noise emission.

Within Task 4.1 of the above WP the combination of existing track solutions, is accessed in order to yield a global performance of at least 6 dB(A). This is to be done by simulating the combined effect using the enhanced W/R Noise software. It will be validated in the network of ISAP line 1 where an existing outside concrete slab track (RHEDA track) which exhibits high airborne. Noise will be evaluated for noise reduction using a combination of existing solutions. The experimental process that was projected in the relevant working package - actually under execution - foresees a series of the 3 distinct implementations presented hereafter, aiming at a successful environmental noise attenuation, but not having any effect whatsoever in the normal operation of the railway track of the STASY S.A with the assistance of the contractor KASTOR S.A. :

- **Action 1:** implementation of the foreseen sound absorbing precast elements (panel type) overlaid in the track bed based of pumice and precast elements of sound absorbing material "SoundSorb" by CSI. After the completion of the implementation there will be noise acoustical measurements in order to compare them with the above Base scenario measurements, so as to verify the reduction of the noise due to reflection of the fixed track work in between and in sideways of the railway track. This action is fully analyzed and evaluated in this paper
- **Action 2:** Implementation of a barrier length  $\approx 100\text{m}$  in the limit of the railway track towards the school installation of a relevant height equivalent to the height of the station platform (train floor level) with embedding of the internal side with the above sound absorbing material "SoundSorb" by CSI. The construction will be fully funded by the European project, with the support of the existing contractor (so as to minimize operational deficiencies), and in the crown of the barrier there will be the possibility of installing the new fence that will be supplied by STASY so as to complete the construction in terms of safety and boundaries. After the completion of the installation, there will be a new acoustical measurement campaign, so as to compare them with the base scenario measurements, as well as with the measurements of the installed noise absorbing material described in action 1 and hence verify the combined noise reduction due to Action 1&2.
- **Action 3:** Installation of rail dampers in the selected track (direction towards Piraeus) with the support of the existing contractor, (so as to minimize operational deficiencies).. After the completion of the implementation of this last action there will be again a new measurement campaign, so that with the relevant comparison of the above described measurements, so as to verify the

total combined noise reduction of noise mitigation measures of actions 1+2+3 above.

## 2. Action 1: Sound absorbing precast elements

As of today, the first of the above solutions (absorbing track panels) has been installed and its effect has been measured. "SoundSorb" by CSI a cementitious, open-cellular material that integrates with concrete was implemented between the rails and on the both external sides as well, at an area from K.P 15+500 until 15+600 adjacent to an education installation (59<sup>th</sup> High school) at the ISAP line 1 towards Piraeus where the Rheda 2000 fixation system is implemented. The technical characteristics are presented hereafter along with views (figure 1) of the absorbing panel to be implemented on both 1 and 2 action as described above:

- Height: 200 mm +/- 10 mm
- Dimensions of central panel (between rails): 1.080 mm +/- 10 mm by 638 mm +/- 10 mm
- Dimensions of external panels: 1.281 mm +/- 10 mm by 285 mm +/- 10 mm
- Cement type: CEM 52,5 N - Grey colour
- Weight of central panel: 90 kg, +/- 5kg
- Weight of external panel: 70 kg, +/- 5kg
- Noise absorption : >4,5 dB (A) / EN 1793-1

The area of the absorption implementation (as well as the measurement locations from the relevant campaign according to EN ISO 3095:2005(E) with monitoring equipment according to EN 61672-1/EN 61672-2 as analyzed hereafter) is presented in figure 2.2 hereafter. In figure 2.2 the rail track after the "SoundSorb" implementation is presented also.

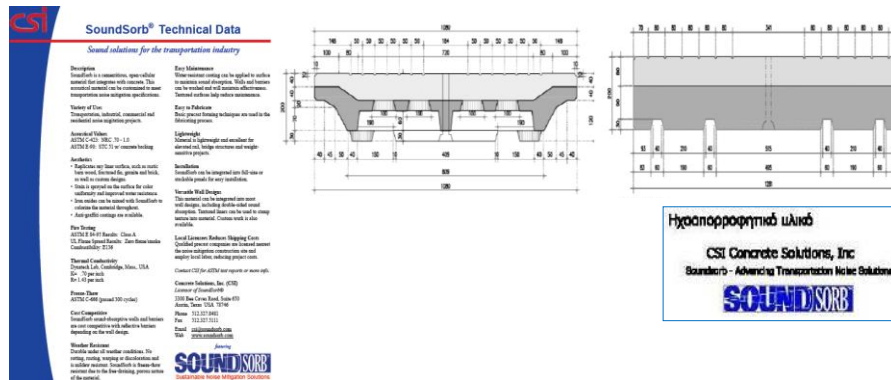


Figure 2.1 "SoundSorb" by CSI



Figure 2.2 Implementation of "SoundSorb" in the Test area & Measurements location according to EN ISO 3095:2005(E) with monitoring equipment according to EN 61672-1/EN 61672-2

This acoustical material can be customized to meet transportation noise mitigation specifications, and follows the standards ASTM C-423: NRC .70 - 1.0 and ASTM E-90: STC 51 w/ concrete backing. Furthermore in figure relevant recent absorption acoustical tests were made in National technical University of Athens and the relevant results are shown in figure 2.3 [3].

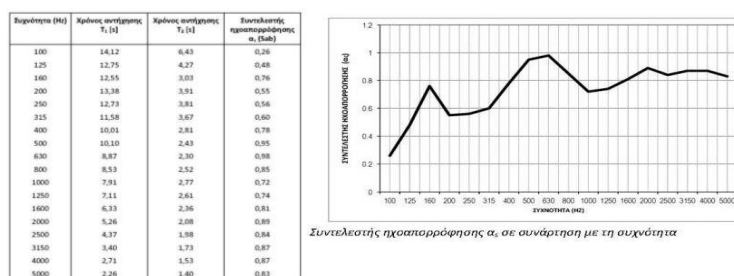


Figure 2.3 Sound absorption data for "SoundSorb" by CSI

### 3. Action 1 measurements set-up & Results

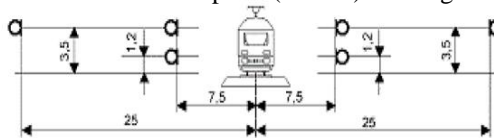
Before the following step by step implementation of the foreseen actions - which are presented afterwards - a full program of acoustic noise measurements, in conditions of train normal operation, according to the standard EN ISO 3095:2005 [4] using a state of the art dB4 class 1 multi channel noise (ACOEM-01dB) measurement equipment fulfilling all standards e.g. EN 61260, EN 60942, EN 61672-1 & EN 61672-2, was completed introducing:

- a 1st series of acoustic measurements of the existing airborne noise (including both time series and 1/3 octave band analysis) for some 10-15 train passbys towards Piraeus - prior to any mitigation implementation in two locations near the rail and at the facade of the school),



- a 2nd series of acoustic measurements of the existing airborne noise in the above exact locations and the same ISAP vehicle operating, after the implementation of the - as above described - sound absorbing precast elements "SoundSorb".

The Standard EN ISO 3095:2005 has been prepared by Technical Committee CEN/TC 256 "Railway applications", the secretariat of which is held by DIN, in collaboration with Technical Committee ISO/TC 43 "Acoustics". According to the standard and in view of the particularities of the test site a frequency analysis was also required, made at least in one third octave bands according to EN ISO 266, ensuring that the lower frequency limit is chosen to ensure that the product of the lowest bandwidth and signal duration exceeds unity. The microphone positions axis was always horizontal and directed perpendicularly to the track. The free field area around the microphones had a radius more than 3 times the measurement distance on both sides free of large reflecting objects like barriers, hills, rocks, bridges or buildings. In the vicinity of the microphones, no obstacles disturbing the sound field were permitted including persons. Furthermore the area between the tram vehicle and the microphones was completely free as possible of sound absorbing matter (e.g. snow, tall vegetation, other tracks) or reflective covering (e.g. water, ice). The ground cover in both test sites was an asphalt (tarmac) coverage.



Regarding the meteorological conditions during the test the wind speed measured at the microphone height was below 1 m/s and there was no falling rain or snow. Temperature and humidity were in normal levels (15°C and 70 to 80% respectively). All airborne acoustic measurements were conducted according to the above standard of railway acoustical measurements EN ISO 3095:2005 with the 1st set of 2 microphones placed in 7,5 meters distance from the centre of the track and in a height of 1,2 meters as well as the 2nd set of 2 microphones placed in 25 meters distance from the centre of the track and in a height of 4 meters as per the provisions of the recent 2002/49/CE directive. Two distinct measurement scenario were executed involving measurements "WITH" & "WITHOUT" the "SoundSorb" implementation. The instrumentation system, including the microphones, cables and recording devices was in accordance with the requirements for a type 1 instrument specified in EN 61672-1. The microphones have an essentially flat frequency response in a free sound field. The 1/3 octave band filters met the requirements of class 1 according to EN 61260. Before and after each series of measurements a sound calibrator meeting the requirements of class 1 according to EN 60942 was applied to the microphone(s) for verifying the calibration of the entire measuring system. The compliance of the instrumentation system with the requirements of EN 61672-1 and EN 61672-2 were recently verified.

The measurement results for action 1 and both locations (ch1 at 7,5m and ch2 at 25m) are presented hereafter in 1.3 octave band analysis for the same vehicle in "with & without absorption conditions" (figure 3.2). The results of the implementation of the "SoundSorb" absorbing material in precast panels indicates a significant attenuation of approx **2,3 - 3,5 dB(A)** and **3,3- 4,3 dB(A)** (as per table

3.1) in the position of the 1st (7,5m) and the 2nd (25m) measurement locations respectively after the implementation of Action 1 for the same ISAP vehicle comparison.

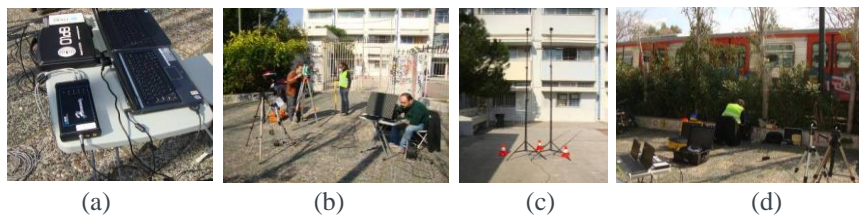


Figure 3.1 Measurement set-up "WITH & WITHOUT" absorption on track ; (a) measurement recording equipment, (b) set up at 7,5 m, (c) set-up in the school facade (at 25m and 4,0m height), and (d) train passage during measurements.

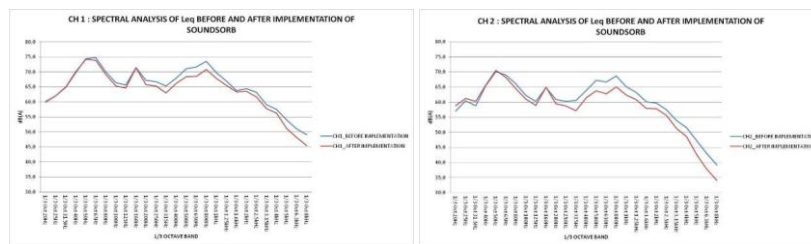


Figure 3.2 1/3 octave band analysis for "with & without absorption conditions" at ISAP line 1

Table 3.1 Results of the implementation of the "SoundSorb" absorbing material

Train Number	Ch1 (7.5m) Before	Ch2 (25m) Before	Ch1 (7.5m) After	Ch2 (25m) After
16	78,1	73,7	76,7	70,8
17	77,9	73,5	76,1	70,2
20	79,4	74,4	78,4	73,7
1	79,4	74,6	76,0	70,6
3	77,4	72,7	75,9	70,1
5	78,3	74,0	74,8	69,0
11	78,5	73,9	74,2	68,6
12	77,1	72,3	75,8	70,1
13	78,3	73,2	77,3	71,5
15	79,7	75,7	75,9	70,1

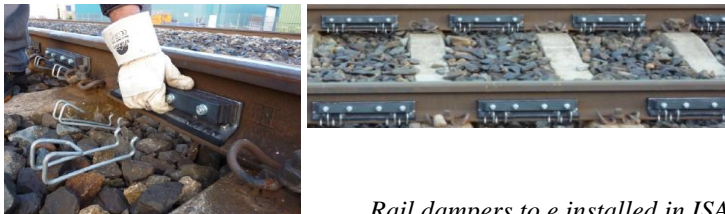
#### 4. Discussion - Next steps

The implementation of absorbing material between an adjacent to the rails in precast panels proven to ensure a significant attenuation. In a second phase a specified action is foreseen introducing the implementation of a concrete barrier of an approx. length  $\approx 100\text{m}$  in the boundaries of the railway track towards the above school installation with embedding of its internal side a vertical absorbing panel from the above sound absorbing material "SoundSorb". The construction including a new fence supplied by STASY is recently complete (see figure 4.1) and a new acoustical measurement campaign, is actually foreseen by mid Sept.2014 in order to compare the combined actions 1 & 2 with the base scenario measurements.



*Figure 4.1 Noise barrier completed at Quiet Track test site in ISAP line 1*

Furthermore within action 3 the installation of rail dampers in the selected track (direction towards Piraeus) is also in progress and expected to be completed by end of September. Rail dampers are an alternative source measure to reduce the noise emission of rail traffic. Because a noise reduction of 3 dB(A) corresponds with halving the noise and because a rail damper reduces only the noise radiation of the rail itself, this would imply that the rail itself is sometimes responsible for more than half of the total noise radiated. However, several investigations have demonstrated that in most cases the contribution of the rail itself in the total noise contribution is rather limited and that the noise radiation of the wheel is at least as important in the total noise. The proposed rail damper for the Quiet Track site is presented in figure 4.2. After completion of installation a final acoustical measurement campaign, will be executed by end of Sept.2014 in order to compare all combined actions 1, 2 & 3 with the base scenario measurements.



*Figure 4.2 Rail dampers to be installed in ISAP line 1 test site*

In this perspective the above ISAP line 1 test site track solutions - easily applicable to Tram, LRT and Metro tracks as well as to conventional tracks in the whole European Union - may ensure the project goal of noise reduction performance of at least 6 dB(A) in comparison with the global rolling noise measured on a well maintained standard track

## 5. References

- [1] QUIET-TRACK: Project full title: " Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures " Grant agreement no: 604891- THEME [SST.2013.1-1.] Railway infrastructure optimization and monitoring for further noise reduction
- [2] <http://www.quiet-track.eu/>
- [3] ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΧΟΤΕΧΝΙΑΣ - ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΔΟΚΙΜΗΣ υπ.αρ. Η1/2013 - αρ. διπλ. ΓΕ 1299/13: Μέτρηση ηχοαπορροφητικής ικανότητας προκατασκευασμένων πλακών από υλικό "SoundSorb"- 15/7/2013 - Εντολέας ΑΣΠΡΟΚΑΤ ΑΒΕΕ
- [4] INTERNATIONAL STANDARD ISO 3095 Second edition 2005-08-15 : Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by rail bound vehicles Applications ferroviaires - Acoustique - Mesurage du bruit émis par les véhicules circulant sur rails Reference number : ISO 3095:2005(E)
- [5] [http://www.quiet-track.eu/wpcontent/uploads/2014/05/604891\\_Newsletter01.pdf](http://www.quiet-track.eu/wpcontent/uploads/2014/05/604891_Newsletter01.pdf)

## **Ηχοαπορροφητική επένδυση γραμμής στο δίκτυο ΗΣΑΠ· συμβολή στην αστική ηχοπροστασία**

Γεώργιος Πουλάκος<sup>1,a</sup>, Αθανάσιος Μπαλλής<sup>2,b</sup>, Αλεξάνδρα Σωτηροπούλου<sup>1,2,c</sup>,  
Αικατερίνη Στογιάννου<sup>2,d</sup> & Ευδοκία Χατζηλιάδη<sup>3,e</sup>

<sup>1</sup> Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>2</sup> Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

<sup>3</sup> Δ.Π.Μ.Σ., Ε.Μ.Π.

<sup>a</sup> [gpoulako@central.ntua.gr](mailto:gpoulako@central.ntua.gr), <sup>b</sup> [abal@central.ntua.gr](mailto:abal@central.ntua.gr), <sup>c</sup> [alexia@central.ntua.gr](mailto:alexia@central.ntua.gr), <sup>d</sup> [kater.stog@gmail.com](mailto:kater.stog@gmail.com),  
<sup>e</sup> [chatziliadi@gmail.com](mailto:chatziliadi@gmail.com)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Εναλλακτικές τεχνικές αντιμετώπισης του σιδηροδρομικού θορύβου σε αστικές περιοχές παρατίθενται συνοπτικά. Η τεχνική εξ' αυτών, που αφορά στην τοποθέτηση ηχοαπορροφητικής επένδυσης γραμμής στο δίκτυο του ΗΣΑΠ, μελετάται μέσα από αντίστοιχες μετρήσεις θορύβου επί τόπου. Εν γένει, επιβεβαιώθηκε ότι η ενόχληση που εισπράτουν οι περίοικοι με και χωρίς το υλικό αντίστοιχα, δεν μεταβλήθηκε, όπως αυτό εκφράζεται με τις εν χρήση ακουστικές παραμέτρους. Τελικά, η συμβολή του υλικού στην αστική ηχοπροστασία δεν κατέστη δυνατόν να αποτιμηθεί, διότι επικαλύπτεται από άλλους, μη ελεγχόμενους από το πείραμα παράγοντες, που επικρατούσαν κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά των περιορισμών και των δυσκολιών, των συνυφασμένων με το σχεδιασμό και τη διεξαγωγή πειραμάτων με επί τόπου μετρήσεις.*

### ***Sound absorbing treatment along urban railways in Athens (HSAIP); contribution to environmental noise control***

#### **ABSTRACT**

*There are reviewed various techniques for the attenuation of railway noise in urban areas. Amongst them, the use of absorptive treatment along the Athens-Piraeus urban railway is studied through noise measurements in the field. Noise annoyance was evaluated in terms of current acoustic parameters; the results indicate that annoyance remained unchanged in the urban neighbourhood, before and after treatment. The noise attenuation performance of the new material could not be evaluated, as it was overlapped by many parameters, which were not under control in the present field measurements. The present results are indicative of the difficulties and limitations associated with field experiments.*

## Εισαγωγή

Ο θόρυβος αστικών σιδηροδρόμων αποτελεί σύνηθες πρόβλημα στις σύγχρονες πόλεις καθώς έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον των γειτονικών οικιστικών και όχι μόνο περιοχών. Ο ΗΣΑΠ αναγνωρίζοντας το πρόβλημα, έχει καταβάλλει προσπάθειες για την αντιμετώπισή του. Στην κατεύθυνση αυτή, πρόσφατα, τοποθετήθηκαν ηχοαπορροφητικές πλάκες κατά μήκος μεγάλου τμήματος της γραμμής του ΗΣΑΠ, με στόχο τη μείωση του περιβαλλοντικού θορύβου όπως αυτός διαμορφώνεται από τα διερχόμενα τρένα.

Η παρούσα εργασία διερευνά την αποτελεσματικότητα αυτής της επέμβασης. Επίσης, γίνεται σύντομη αναδρομή σε σχετικές εναλλακτικές τεχνικές μείωσης του θορύβου από διελεύσεις συρμών σε αστικές περιοχές.

### 1. Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης του σιδηροδρομικού θορύβου

Για την αντιμετώπιση του σιδηροδρομικού θορύβου έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται πολλές εναλλακτικές τεχνικές (Σχήμα 1.1) οι οποίες διακρίνονται σε: α) τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή, β) τεχνικές που εφαρμόζονται στον τροχό και γ) ηχοπετάσματα.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν:

ο Τα ελαστικά υποθέματα. Τοποθετούνται εκ κατασκευής μεταξύ σιδηροτροχιάς και στρωτήρα για να συμβάλλουν στην επίτευξη της επιθυμητής ελαστικότητας της γραμμής. Λόγω της ελαστικότητάς τους απορροφούν μέρος των ταλαντώσεων του τροχού και της σιδηροτροχιάς και μειώνουν το θόρυβο [1]. Μία άλλη λύση που εφαρμόζεται στην σταθερή επιδομή είναι το ελαστικό περίβλημα που περιβάλλει τους στρωτήρες σκυροδέματος (Εικόνα 1.1). Μία ακόμη αποτελεσματική αλλά ιδιαίτερα δαπανηρή λύση είναι και η τεχνική της «πλωτής πλάκας».

ο Τα ηχοαπορροφητικά πάνελ (επί της γραμμής) τοποθετούνται μεταξύ των σιδηροτροχιών καθώς και εξωτερικά των σιδηροτροχιών (Σχήμα 1.1). Ο ΗΣΑΠ έχει πρόσφατα τοποθετήσει στο δίκτυο του ηχοαπορροφητικά πάνελ. Η μέτρηση της αποτελεσματικότητας της λύσης αυτής εξετάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

ο Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων τοποθετούνται στον κορμό της σιδηροτροχιάς και απορροφούν τις ταλαντώσεις που δημιουργούν θόρυβο [2]. Ο θόρυβος κύλισης μπορεί να μειωθεί επίσης και με τη λείανση της επιφάνειας της σιδηροτροχιάς.

ο Τα βελτιωτικά τριβής εφαρμόζονται είτε στον τροχό είτε στη σιδηροτροχιά, δια χειρός ή με ειδικές συσκευές έκχυσης. Επιτυγχάνουν επιθυμητές τιμές για τον συντελεστή τριβής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς και μειώνουν το θόρυβο και τις φθορές τροχού και σιδηροτροχιάς [3].

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τεχνικές που αφορούν στον τροχό (τόρνευση τροχού, ελαστικοί τροχοί, αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών, σύστημα πέδησης).

ο Η τόρνευση των τροχών των σιδηροδρομικών οχημάτων πραγματοποιείται σε ειδικές εγκαταστάσεις. Μετά από περιοδικό έλεγχο, γίνεται (εφόσον αυτό κριθεί αναγκαίο) τόρνευση των τροχών καθώς με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι φθορές

του τροχού. Ένα θετικό συνεπακόλουθο αποτέλεσμα είναι και η μείωση του θορύβου κύλισης.

ο Οι ελαστικοί τροχοί έχουν ειδική κατασκευή ώστε να περιλαμβάνουν μία ενδιάμεση ελαστική ζώνη μεταξύ του σώτρου και του επισώτρου. Υπάρχουν σοβαρές επιφυλάξεις για την τεχνική αυτή καθώς η αστοχία ενός ελαστικού τροχού 1998 στη Γερμανία οδήγησε σε πολύνεκρο δυστύχημα [4].

ο Οι αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών έχουν τη μορφή κυκλικού δίσκου και τοποθετούνται σε ειδικές εσοχές στο σώτρο του τροχού ώστε να απορροφούν μέρος των ταλαντώσεων που μεταφέρονται στο φορείο και στο όχημα [5].

ο Η μείωση θορύβου στα συστήματα πέδησης αφορά στους εμπορικούς συρμούς, τα φρένα των οποίων επιδρούν απευθείας επί των τροχών. Ως λύση προτείνεται η αντικατάσταση του υλικού τριβής (χυτοσίδηρος) με συνθετικά υλικά που παράγουν λιγότερο θόρυβο (φρένα τύπου K ή τύπου LL). Η μετασκευή του συστήματος πέδησης των συμβατικών φορταμαξών για να εξοπλιστούν με φρένα τύπου K είναι αρκετά δαπανηρή καθώς απαιτείται η μετασκευή των μηχανικών μερών του μηχανισμού πέδησης γι' αυτό και προτείνεται η τοποθέτησή τους σε νέα οχήματα. Τα φρένα τύπου LL μπορούν να τοποθετηθούν στα συμβατικά συστήματα πέδησης και έχουν λάβει προσωρινή πιστοποίηση από τη Διεθνή Ένωση Σιδηροδρόμων (UIC) [2].

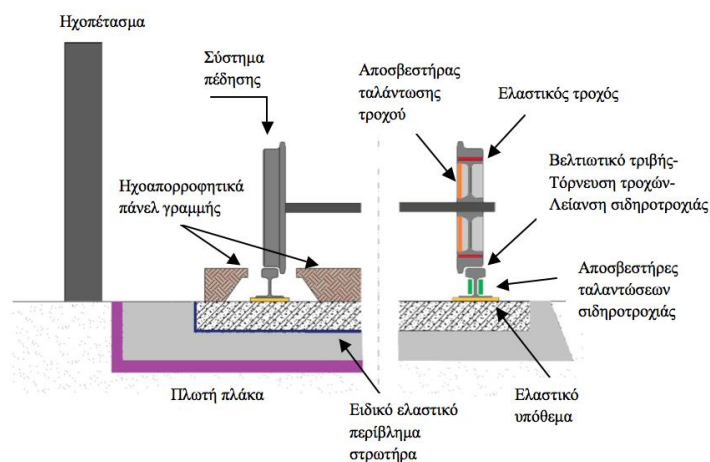
Η τελευταία ομάδα από τις εξεταζόμενες τεχνικές περιλαμβάνει τα ηχοπετάσματα. Τα προπετάσματα κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία, αλουμίνιο, πλαστικό, διαφανή υλικά ή από οπλισμένο σκυρόδεμα με φύτευση. Τοποθετούνται παράπλευρα και κατά κανόνα παράλληλα προς τη σιδηροδρομική γραμμή. Η επιλογή του υλικού κατασκευής και της μορφής τους εξαρτάται από τεchnοοικονομικούς παράγοντες, κανόνες ασφαλείας καθώς και αρχές αισθητικής [6].

Πίνακας 1.2. Συγκριτική παρουσίαση τεχνικών μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ			
Τεχνικές μείωσης	Περιγραφή	Αποτελεσματικότητα	Πηγή
<i>Τεχνικές που εφαρμόζονται στην επιδομή</i>			
<i>Ελαστικά υποθέματα</i>	<i>Ελαστικά που τοποθετούνται στην κάτω επιφάνεια του πέλματος της σιδ/χιάς</i>	<i>6 dBA, 2 dBA</i>	<i>[7, 19]</i>
		<i>8-9 dBA (με ηχοπετάσματα)</i>	<i>[8]</i>
		<i>6-8 dBA (αυγό Κολωνίας)</i>	
<i>Ηχοαπορροφητικά πάνελ</i>	<i>Πάνελ που τοποθετούνται ανάμεσα και πλευρικός των σιδηροτροχιών</i>	<i>3 dBA</i>	<i>[18]</i>

Αποσβεστήρες ταλαντώσεων σιδ/χιών	Συσκευές στον κορμό της σιδ/χιάς για την απορρόφηση των ταλαντώσεων	3.4, 6.7 dBA (με/χωρίς ελεγχόμενη ταχύτητα)	[18]
		3-4, 6, 7.5 dBA	[16, 15, 19]
Ελαστικοί σύνδεσμοι		3 dBA	[17]
Λείανση σιδ/χιάς		3-6 dBA	[19]
		2.1, 5.6-7.2 dBA (επιβατικοί/εμπορικοί συρμοί)	
		2-10 dBA (μετά από συγκόλληση σιδ/χιών)	
		max 20 dBA (με τοννεμένο τροχό)	
Βελτιωτικά τριβής	Ρύθμιση συντελεστή τριβής τροχού-σιδ/χιάς	14.3-12.8 dBA (δια χειρός/μηχανικά), 12 dBA	[3, 13]
<i>Τεχνικές που εφαρμόζονται στον τροχό ή στο σύστημα πέδησης</i>			
Τόρνευση τροχού		3 dBA, 3-6 dBA	[19,14]
Ανασχεδιασμός τροχού	Αλλαγή διαμέτρου, αναδιαμόρφωση επισώτρου	1 dBA, 5 dBA	[14,19]
		4 dBA, 1 dBA (θεωρητικά/πειραματικά)	[14]
Ελαστικοί τροχοί	Ελαστικό στρώμα μεταξύ επισώτρου-σώτρου	2 dBA, 4 dBA	[5,19]
Αποσβεστήρες ταλαντώσεων τροχών	Υλικό που τοποθετείται στο σώτρο για την απορρόφηση των ταλαντώσεων	4 dBA, 3-5 dBA	[17, 15]
		9 dBA (με τροχούς μικρότερης διαμέτρου)	[9]
Αντικατάσταση συστήματος πέδησης	Αντικατάσταση φρένων από χυτοσίδηρο με:	10 dBA	[15, 19, 11]
		10 dBA	[11]
		5-7, 10 dBA	[11,14]
<i>Ηχοπετάσματα</i>			
Ηχοπετάσματα		5.5-8.1 dBA, 3-10 dBA, max 10 dBA	[12, 15, 5]
Πράσινα ηχοπετάσματα	Δασικές ζώνες κατά μήκος της γραμμής	1-2 dBA	[15]





Σχήμα 1.1. Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης σιδηροδρομικού θορύβου

## 2. Ηχοαπορροφητική επένδυση γραμμής στο δίκτυο του ΗΣΑΠ

### 2.1 Σχεδιασμός πειραμάτων – Μεθοδολογία

Ακουστικές μετρήσεις διεξήχθησαν επί τόπου πριν και μετά την τοποθέτηση του ηχοαπορροφητικού υλικού. Τα δείγματα ορίστηκαν σε τρεις ημίωρες καταγραφές κατά τη διάρκεια μιας τυπικής εργάσιμης ημέρας, αντίστοιχα πριν και μετά την τοποθέτηση του υλικού. Αυτή η επιλογή υπαγορεύθηκε αφενός από την ανάγκη καταγραφής του θορύβου σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της ημέρας και αφετέρου από τους συμφυείς χρονικούς κλπ. περιορισμούς προς την εκπόνηση σπουδαστικών εργασιών

Ανάμεσα στους περιορισμούς της παρούσας μελέτης είναι το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν με δείγμα ένα περιορισμένο τμήμα της περιοχής του ΗΣΑΠ· αυτό το δείγμα ταυτίζεται με την τελευταία διαθέσιμη περιοχή πριν υλοποιηθεί και εκεί η επίστρωση με το υλικό. Άλλος περιορισμός ήταν η χρονική απόσταση μεταξύ των μετρήσεων πριν και μετά τη διάστρωση του ηχοαπορροφητικού υλικού. Σε σχέση με αυτό το δεδομένο γίνεται η παραδοχή ότι οι λοιπές παράμετροι παραγωγής θορύβου που διαμορφώνουν τον αστικό θόρυβο στην περιοχή παρέμειναν σταθερές πριν και μετά την επέμβαση. Παραδοχή σταθερής τιμής έγινε και για την ταχύτητα όσων συρμών διήλθαν καθ' όλες τις διάρκειες των μετρήσεων τόσο πριν όσο και μετά την εφαρμογή του υλικού.

Η μέτρηση του θορύβου προγραμματίστηκε να γίνει ανά οκταβική ζώνη και σε dB(A). Από την καταγραφή αυτή, προσδιορίζονται παράμετροι όπως η ισοδύναμη στάθμη θορύβου ( $L_{eq}$ ), που θεωρείται ότι αποτιμά την αντιλαμβανόμενη από τον άνθρωπο ενόχληση από τέτοιου είδους θορύβους, η μέγιστη στάθμη  $L_{max}$  που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηχομόνωσης εκτεθειμένων στο θόρυβο κτιρίων καθώς και λοιπές σχετικές παράμετροι. Τέλος, έγιναν μετρήσεις του

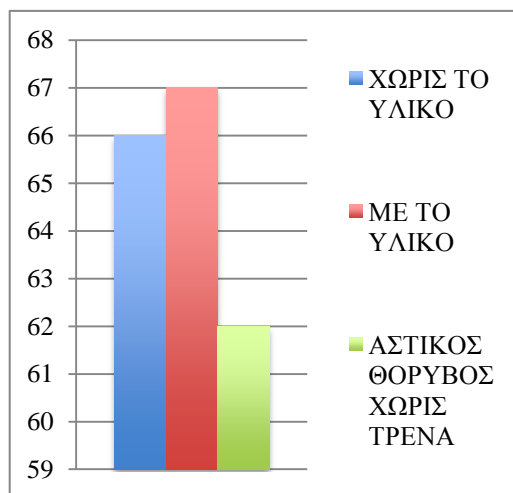
αστικού θορύβου της περιοχής σε μικρότερα χρονικά διαστήματα λίγων λεπτών, όσο δηλαδή επιτρεπόταν ανάμεσα στη διέλευση δύο διαδοχικών συρμών.

## 2.2. Πειραματική διαδικασία – Αποτελέσματα

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν με χρήση ενός βαθμονομημένου/πιστοποιημένου ηχομέτρου υψηλής ακριβείας, και των εξαρτημάτων αυτού (τρίποδο, calibrator κλπ), το οποίο τοποθετήθηκε σε σημείο, στο όριο της σιδηροδρομικής γραμμής με τον αστικό χώρο, σύμφωνα, κατά το δυνατόν, με τα προβλεπόμενα στο αντίστοιχο διεθνές πρότυπο ISO 3095:1975. Η χιλιομετρική θέση που επελέγη ήταν στην διαδρομή μεταξύ των σταθμών Ν. Ηρακλείου και Ν. Ιωνίας. Η καμπυλότητα της σιδηροδρομικής γραμμής στο σημείο της μέτρησης ήταν αμελητέα, ενώ η σιδηροτροχιά στο σημείο εκείνο, διέθετε σταθερή επιδομή, κατάλληλη ώστε να δεχτεί αργότερα την επίστρωση του ηχοαπορροφητικού υλικού. Σε κάθε ημίωρο κύκλο μετρήσεων αντιστοιχούσαν 8 έως 10 διελεύσεις από αμότερες τις κατευθύνσεις των συρμών. Οι μετρήσεις πριν την τοποθέτηση του υλικού έγιναν μήνα Απρίλιο με ήπιες καιρικές συνθήκες, χωρίς άνεμο και με θερμοκρασία γύρω στους 20 βαθμούς κελσίου. Οι μετρήσεις μετά την τοποθέτηση του υλικού, καθώς και οι μετρήσεις του αστικού θορύβου χωρίς διέλευση τραινών, ακολούθησαν έναν μήνα αργότερα χωρίς ιδιαίτερη διαφοροποίηση των καιρικών συνθηκών.

*Πίνακας 2.1. Ισοδύναμες στάθμες θορύβου πριν και μετά την εφαρμογή του υλικού, ισοδύναμες στάθμες του αστικού θορύβου χωρίς την συμμετοχή διερχόμενων τραινών και μέσοι όροι των τιμών που σημειώθηκαν.*

ΑΣΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ ΜΕ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ ΤΡΑΙΝΩΝ			ΑΣΤΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ ΤΡΑΙΝΩΝ	
ΠΕΙΡΑΜΑ	ΧΩΡΙΣ ΤΟ ΥΛΙΚΟ, Leq(A)	ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ Leq(A)	ΠΕΙΡΑΜΑ	Leq(A)
ΗΜΙΩΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 1	66,3	67,8	1ο	60,4
ΗΜΙΩΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 2	64,7	65,7	2ο	60,8
ΗΜΙΩΡΗ ΜΕΤΡΗΣΗ 3	67	67,3	3ο	64
M.O.	66	67	M.O.	62



Σχήμα 2.2. Γραφική απεικόνιση των μέσων όρων των ισοδύναμων στάθμων θορύβου του Πίνακα 2.1 σε dBA

Πίνακας 2.3. Μέγιστες τιμές Leq θορύβου πριν και μετά την τοποθέτηση του υλικού, αντίστοιχα, από 10 διαφορετικά στιγμιότυπα διέλευσης συρμού.

Α/Α	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ Leq ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗ (dBA)		ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΤΑΘΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ
	ΧΩΡΙΣ ΤΟ ΥΛΙΚΟ	ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ	
1	82,5	77,4	-5,1
2	77,1	80,1	3
3	76,4	79,5	3,1
4	77,2	76,9	-0,3
5	77,5	81,8	4,3
6	75,6	77,3	1,7
7	74,2	76,9	2,7
8	76,5	76,7	0,2
9	70,7	75,2	4,5
10	79,5	77,3	-2,2
M.O.	76,72	77,91	1,19

### 2.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τις τιμές της παραμέτρου  $L_{eq}$ , πριν και μετά την τοποθέτηση του υλικού δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση (Πίνακας 2.1). Διαπιστώνουμε δηλαδή ότι η ενόχληση που εισπράττεται από τους περιοίκους δεν μεταβάλλεται.

Το παραπάνω μπορεί να σημαίνει είτε ότι ο θόρυβος λόγω της διελεύσεως των συρμών επικαλύπτεται από τον τοπικό αστικό θόρυβο της περιοχής, είτε ότι άλλης προέλευσης θόρυβοι αναφορικά με τον συρμό, όπως το είδος της μηχανής, η συντήρηση των τροχών, η παλαιότητα, η πληρότητα, η οδική συμπεριφορά του οδηγού (π.χ. ταχύτητα, τυχαία φρεναρίσματα κ.α.), επικάλυψαν το ενδεχόμενο όφελος από το νέο υλικό.

Για να ελέγξουμε την πρώτη από τις παραπάνω δύο υποθέσεις, απομονώσαμε τον θόρυβο μεταξύ διαδοχικών διελεύσεων δύο συρμών για τρία διαφορετικά μεσοδιαστήματα και υπολογίσαμε τα  $L_{eq}$  αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.1 και δείχνουν ότι η στάθμη του αστικού θορύβου χωρίς διελεύσεις τραίνω ήταν σαφώς χαμηλότερη, της τάξεως μεγέθους των 60dB<sub>A</sub>, ενώ η ισοδύναμη στάθμη θορύβου όπως αυτή μετρήθηκε στα τυπικά ημίωρα που περιλάμβαναν διελεύσεις τρένων ήταν της τάξης μεγέθους 65-68 dB<sub>A</sub>. Η διαπιστωθείσα διαφορά των περίπου 6dB<sub>A</sub> υποδηλώνει ότι η ως άνω πρώτη υπόθεση, ότι δηλαδή ο θόρυβος των συρμών επικαλύπτεται από τον τοπικό αστικό θόρυβο της περιοχής, δεν επαληθεύεται.

Για τον έλεγχο της ως άνω δεύτερης υπόθεσης αξιολογήσαμε μεμονωμένες χρονικά τις διελεύσεις συρμών όπως αυτές είχαν καταγραφεί μέσα στα τυπικά ημίωρα των μετρήσεών μας, και συγκρίναμε τις μέγιστες τιμές που σημειώθηκαν κατά τις διελεύσεις, πριν και μετά την τοποθέτηση του υλικού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2.3 και δείχνουν ότι οι διαφορές που προκύπτουν είναι άλλοτε θετικές και άλλοτε αρνητικές μη έχοντας μια σαφή βελτίωση. Αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι η διακύμανση του θορύβου του διερχόμενου συρμού λόγω των άλλων παραγόντων που προαναφέρθηκαν είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη διαφορά θορύβου λόγω της εφαρμογής των πλακών ηχοαπορροφητικού υλικού· συνεπώς η τελευταία δεν είναι δυνατόν να αποτιμηθεί, τουλάχιστον βάσει των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα μας.

### 3. Συμπεράσματα

Εν γένει επιβεβαιώθηκε ότι η ενόχληση που εισπράτουν οι περίοικοι με και χωρίς το υλικό, δεν άλλαξε όπως αυτό εκφράζεται με τις εν χρήση ακουστικές παραμέτρους.

Τελικά, η συμβολή του υλικού δεν κατέστη δυνατόν να αποτιμηθεί, διότι επικαλύπτεται από άλλους μη ελεγχόμενους παράγοντες που επικράτησαν κατά τη διέλευση του συρμού την ώρα των μετρήσεων.

Μολονότι η ηχοαπορροφητική απόδοση του υλικού όπως αυτή αποτιμήθηκε στο εργαστήριο, ήταν ικανοποιητική [20], αυτό δε μπόρεσε να επιβεβαιωθεί μέσα από τις παρούσες μετρήσεις στον πραγματικό χώρο για τους λόγους που εξηγήσαμε παραπάνω. Τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά των περιορισμών και των δυσκολιών των συνυφασμένων με το σχεδιασμό και τη διεξαγωγή επι τόπου μετρήσεων.

Βεβαίως, η σχετική θέση τοποθέτησης ενός ηχοαπορροφητικού υλικού αναφορικά με την πηγή του θορύβου, εν προκειμένω ως προς τον συρμό, μπορεί να επηρεάζει την αποτελεσματικότητά του και άρα τις τελικές στάθμες του θορύβου που εισπράττει ο περίοικος, και αυτό αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

#### 4. Αναφορές

- [1] Κ. Λυμπέρης Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές-Τόμος Ι Συμμετρία, Αθήνα (2009)
- [2] UIC «Railway noise technical measures catalogue» διαθέσιμο στο <http://www.uic.org/>, (2013)
- [3] D. T. Eadie, M. Santoro, W. Powell, «Local control of noise and vibration with KELTRACK friction modifier and Protector trackside application: an integrated solution», *Journal of Sound and Vibration* **267** pp 761-772 (2003)
- [4] B. Suarez, J. A. Chover, P. Rodríguez and F.J. González «Effectiveness of resilient wheels in reducing noise and vibrations» in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F* (2011)
- [5] L. G. Kurzweil «Wheel/rail noise – means for control» *Journal of Sound and Vibration* **87**(2) pp 197-220 (1983)
- [6] Χ. Πυργίδης «Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών Υποδομή-Τροχάιο Υλικό-Εκμετάλλευση» Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2009)
- [7] A. Wang, J.E. Cox, D. Gosling, J.E. Prudhoe «Railway bridge noise control with resilient baseplates» *Journal of Sound and Vibration* **231**(3) pp 907-911 (1999)
- [8] G. P. Wilson «Rail System Noise and Vibration Control» *Proceedings of ACOUSTICS* (2004)
- [9] B. Barsikow, W. F. King, III and E. Pfizenmaier «Wheel/rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones» *Journal of Sound and Vibration* **118**(1) pp 99-122 (1987)
- [10] B. Muller, J. Oertli «Combating Curve Squeal: Monitoring existing applications» *Journal of Sound and Vibration* **293** pp 728-734 (2005)
- [11] P. H. de Vos, M. Bergendorff, M. Brennan, F. van der Zijpp «Implementing the retrofitting plan for the European rail freight fleet» *Journal of Sound and Vibration* **293** pp 1051-1057 (2005)
- [12] Μ. Πατσή, Κ. Βογιατζή «Ακουστική μελέτη εφαρμογής ηχοπετάσματος στο δίκτυο του ΗΣΑΠ» ΗΣΑΠ, (2006)
- [13] D. T. Eadie, M. Santoro «Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction» *Journal of Sound and Vibration* **293** pp 747-757 (2006)
- [14] N. Van Domininck, L. Schillemans «Environmental integration of measures to reduce railway noise in the Brussels Capital Region» *Journal of Sound and Vibration* **267** pp 419-429 (2003)
- [15] C. Talotte, P.-E. Gautier, D. J. Thompson, C. Hanson «Identification, modeling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey» *Journal of Sound and Vibration* **267** pp 447-468 (2003)

- [16] A. Frid «Skirts and barriers for reduction of wayside noise from railway vehicles - an experimental investigation with application to the BR185 locomotive» *Journal of Sound and Vibration* **267** pp 709-719 (2003)
- [17] G. Xiaoan «Railway environmental noise control in China» *Journal of Sound and Vibration* **293** pp 1078-1085 (2005)
- [18] Δ. Αργυρόπουλος «Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης θορύβου από τη λειτουργία της γραμμής του Η.Σ.Α.Π.» Τεχνική Έκθεση, ΗΣΑΠ (2010)
- [19] Μ. Υδραΐος, «Πρόγνωση Σιδηροδρομικού Θορύβου» ΕΜΠ (2005)
- [20] Πιστοποιητικό ηχοαπορρόφησης υλικού, Η1 2013, ΕΜΠ

## ***Η μέχρι σήμερα πορεία της στρατηγικής χαρτογράφησης του περιβαλλοντικού θορύβου στην Ελλάδα***

Βασίλειος Κ. Δαλαμάγκας<sup>1,a</sup>, Κωνσταντίνος Βογιατζής<sup>2,b</sup>, Χαράλαμπος Αντωνιάδης<sup>2,c</sup> & Νικόλαος Κωλέττης<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> Ειδική Υπηρεσία Επιθεωρητών Περιβάλλοντος, Λ. Κηφισίας 1-3, 115 23 Αθήνα

<sup>2</sup> Τμήμα Πολ. Μηχ/κών – ΕΠΑΣΕ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, 383 34 Βόλος

<sup>3</sup> Περιβαλλοντολόγος - Ακουστικός / Θράκης 66, Βριλήσσια

<sup>a</sup> [v.dalamagas@prv.ypeka.gr](mailto:v.dalamagas@prv.ypeka.gr), <sup>b</sup> [kvogiatz@uth.gr](mailto:kvogiatz@uth.gr), <sup>c</sup> [xantoniadis@civ.uth.gr](mailto:xantoniadis@civ.uth.gr), <sup>d</sup> [n\\_kolettis@dynacoustics.gr](mailto:n_kolettis@dynacoustics.gr)

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο Περιβαλλοντικός θόρυβος αποτελεί περιβαλλοντικό παράγοντα με σημαντική συνεισφορά στην υποβάθμιση του αστικού ακουστικού περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής, ιδιαίτερα σε χώρες, όπως η Ελλάδα, που οι κλιματικές συνθήκες αποτελούν ευνοϊκό παράγοντα για την ανάπτυξη δραστηριοτήτων εκτός στεγασμένων χώρων καθώς επίσης και για ανάπτυξη νυχτερινής ζωής. Η αξιολόγηση, επομένως, του εν λόγω είδους θορύβου, αποτελεί αναγκαιότητα ως εργαλείο σχεδιασμού σε επίπεδο Πολεοδομικού συγκροτήματος, αλλά και εκτίμησης του ποσοστού του πληθυσμού που εκτίθεται σε υψηλές στάθμες περιβαλλοντικού θορύβου. Η αξιολόγηση αυτή προκύπτει από εκτιμήσεις με την χρήση υπολογιστικών προτύπων (μοντέλων) θορύβου και από μετρήσεις. Στην χώρα μας, η Στρατηγική Χαρτογράφηση Θορύβου (Σ.Χ.Θ.) ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2010 και βρίσκεται σε εξέλιξη. Ολοκληρώθηκαν οι μελέτες Σ.Χ.Θ. για τις πόλεις: Λάρισα, Βόλος, Ηράκλειο, Χανιά, Πάτρα. Βρίσκονται: στην Τέταρτη φάση οι μελέτες για τα Ιωάννινα και την Καβάλα, στην δεύτερη φάση για Κέρκυρα, Αγρίνιο, Θεσσαλονίκη και Νεάπολη και το κέντρο της Αθήνας και στην πρώτη φάση η Σ.Χ.Θ. για την πόλη των Σερρών. Έχουν επιλεγεί ανάδοχοι για τον Πειραιά και την βόρεια Αθήνα. Είναι σε εξέλιξη η διαδικασία επιλογής αναδόχου για την Νότια, την Δυτική Αθήνα και την Ανατολική Αττική. Στην παρουσίαση θα αναφερθούμε στη διαδικασία Σ.Χ.Θ. και στα ευρήματα της Σ.Χ.Θ. κάποιων πολεοδομικών συγκροτημάτων (Π.Σ.).

### ***The so far progress of the strategic mapping of environmental noise in Greece***

#### **ABSTRACT**

*Environmental noise is a major environmental factor with great contribution to the deterioration of the urban acoustic environment and the quality of life, particularly in countries such as Greece, where climate conditions are a favorable*

*factor for the development of activities outside covered areas as well as for the development of nightlife. Therefore the evaluation of this kind of noise consists a necessity as a planning tool at agglomerations, but also estimate the proportion of the population exposed to high levels of environmental noise. Such an evaluation comes out from estimates using computational standards (models) of noise and measurements. In our country the strategic noise mapping began in August 2010 and is ongoing. Strategic Noise Mapping studies (S.N.M.S.) have been developed and completed for Urban areas of Larissa, Volos, Heraklion Of Crete, Chania and Patras. S.N.M.S. are in the fourth phase for Urban areas of Ioannina and Kavala. In the second phase are S.N.M.S. for Urban areas of Corfu, Agrinio, Thessaloniki, Neapoli and the centre of Athens. Finally, in the phase is the S.N.M.S. for the urban area of Serres. Contractors have been selected for Piraeus and northern Athens. It is in the process of selecting a contractor for Southern and Western Athens and Eastern Attica. In this presentation we will be referred to the process and the findings of Strategic Noise Mapping for some agglomerations.*

## **Εισαγωγή**

Η Χαρτογράφηση του Περιβαλλοντικού Θορύβου όπως προσδιορίζεται στην Οδηγία 2002/49/ΕΚ ενσωματώθηκε στο Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο με την Κ.Υ.Α 13586/724/Β/ΦΕΚ/384/28.3.2006 (Εναρμόνιση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ «Περί αξιολόγησης και διαχείρισης του περιβαλλοντικού θορύβου» στην Ελληνική Νομοθεσία). Η Οδηγία 2002/49/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου, αποβλέπει στον καθορισμό μιας κοινής προσέγγισης για την αποφυγή, πρόληψη ή περιορισμό, βάσει ιεράρχησης προτεραιοτήτων, των δυσμενών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένης της ενόχλησης, από έκθεση στον περιβάλλοντα θόρυβο. Η οδηγία αυτή αποβλέπει, επίσης, στην παροχή βάσης για την ανάπτυξη κοινοτικών μέτρων για τον περιορισμό του θορύβου που εκπέμπουν οι μείζονες πηγές και, ιδίως, τα τροχοφόρα οχήματα, ο σιδηρόδρομος και η σχετική υποδομή, τα αεροσκάφη, ο υπαίθριος και ο βιομηχανικός εξοπλισμός και οι λιμένες. Έχει ως αντικείμενο τον περιβαλλοντικό θόρυβο, ο οποίος γίνεται αντιληπτός από τον πολίτη στο εσωτερικό της κατοικίας του και γύρω από αυτήν, στις σχετικά ήσυχες ζώνες μιας αστικής περιοχής (κατοικίας) ή της εξοχής, εντός των νοσοκομείων και πέριξ αυτών, εντός των σχολείων και στον περίγυρό τους, καθώς και στο εσωτερικό άλλων κτιρίων. Επισημαίνεται ότι η Οδηγία αυτή δεν καλύπτει το θόρυβο που προκαλεί το ίδιο το άτομο, ούτε το θόρυβο ο οποίος γίνεται αντιληπτός εντός των μέσων μεταφοράς, αλλά ούτε και αυτόν, ο οποίος προκαλείται από οικιακές δραστηριότητες, στη γειτονιά στο χώρο εργασίας ή από κέντρα διασκέδασης και λοιπές επιχειρήσεις υγειονομικού ενδιαφέροντος.

Μέχρι σήμερα έχουν υπογραφεί συμβάσεις εκπόνησης Στρατηγικών χαρτών θορύβου (Σ.Χ.Θ.) μεταξύ της Δ/σης Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Θορύβου (Ε.Α.Ρ.Θ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής (Υ.Π.Ε.Κ.Α.) και διαφορετικών αναδόχων, για την εκπόνηση μελετών Αξιολόγησης του Περιβαλλοντικού Θορύβου στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ για τα Πολεοδομικά Συγκροτήματα:

1. Λάρισας & Βόλου: Ολοκληρώθηκε επιτυχώς.



- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 2. Ηρακλείου και Χανίων:               | Ολοκληρώθηκε επιτυχώς.              |
| 3. Πάτρας:                             | Ολοκληρώθηκε επιτυχώς.              |
| 4. Ιωαννίνων & Καβάλας:                | Ευρίσκεται στην τέταρτη φάση.       |
| 5. Αγρινίου & Κέρκυρας:                | Ευρίσκεται στην δεύτερη φάση.       |
| 6. Θεσσαλονίκης & Νεαπόλεως:           | Ευρίσκεται στην δεύτερη φάση.       |
| 7. Κέντρου Αθήνας:                     | Ευρίσκεται στην δεύτερη φάση.       |
| 8. Σερρών:                             | Ευρίσκεται στην πρώτη φάση.         |
| 9. Βόρειας Αθήνας:                     | Ευρίσκεται στην προκαταρκτική φάση. |
| 10. Πειραιώς:                          | Ευρίσκεται στην προκαταρκτική φάση. |
| 11. Ανατολική, Δυτική και Νότια Αθήνα: | Υπό αξιολόγηση.                     |

Το αντικείμενο και ο σκοπός των εν λόγω μελετών είναι η υλοποίηση της εφαρμογής της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ για τα αναφερθέντα πολεοδομικά συγκροτήματα, και αφορά περιβάλλοντα θόρυβο από οδική και σιδηροδρομική κυκλοφορία καθώς και βιομηχανικό θόρυβο, θόρυβο λιμένων και αεροπορικό θόρυβο, όπου υπάρχουν αεροδρόμια μέσα στα Πολεοδομικά συγκροτήματα. Επισημαίνεται ότι το έργο του σχεδιασμού και ανάπτυξης της νέας Ευρωπαϊκής διαδικασίας αξιολόγησης περιβαλλοντικού θορύβου στην Ελλάδα περιλαμβάνει τις αρχικές και πλέον απαραίτητες ενέργειες, προκειμένου η χώρα μας να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις συλλογής και επεξεργασίας στοιχείων που απορρέουν από την υιοθέτηση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου (ως περιβαλλοντικός θόρυβος στις μελέτες εννοείται ο θόρυβος περιβάλλοντος που προέρχεται από την οδική κυκλοφορία των οχημάτων, τα συγκοινωνιακά μέσα πάσης φύσεως και τις βιομηχανικές δραστηριότητες).

Στις μελέτες Σ.Χ.Θ. θα αναπτυχθεί η -υποχρεωτική για την χώρα μας- διαδικασία τήρησης και παροχής δεδομένων που αφορούν την έκθεση και προσδιορισμό της ενόχλησης του πληθυσμού των μεγάλων αστικών κέντρων από τον περιβαλλοντικό θόρυβο βάσει μιας ευρωπαϊκά κοινής επιστημονικής προσέγγισης η οποία στηρίζεται κυρίως σε μεθόδους πρόβλεψης αλλά θα επιβληθεί και από μετρήσεις. Επίσης, στις μελέτες θα γίνει σύνδεση της διαδικασίας χαρτογράφησης με τοπικά Σχέδια Δράσης (ΣΔ) αντιμετώπισης του θορύβου με προτάσεις συγκεκριμένων απαιτήτων έργων, χρονοδιαγράμματα υλοποίησης αυτών, πηγές χρηματοδότησης κ.λ.π. Τα Σχέδια Δράσης που θα αναπτυχθούν, θα αποσκοπούν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων περιβαλλοντικού θορύβου στις αναφερθείσες πόλεις και θα πρέπει να καταστρώνονται από τις αρμόδιες αρχές σε συνδυασμό με διαδικασίες ενημέρωσης του κοινού σύμφωνα με την Οδηγία.

Η τελική Έκθεση, σύμφωνα με το Άρθρο 10 (1) της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ, η οποία προβλέπεται να υποβληθεί στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή, για κάθε Πολεοδομικό Συγκρότημα (Π.Σ.) περιλαμβάνει:

- \* Γενική περιγραφή των πολεοδομικών συγκροτημάτων
- \* Χαρακτηριστικά των περιχώρων: πολεοδομικά συγκροτήματα, χωριά, εξοχή ή άλλο τι, πληροφορίες περί των χρήσεων γης, άλλες σημαντικές πηγές θορύβου.
- \* Προγράμματα ελέγχου των θορύβων εκτελεσθέντα στο παρελθόν και εφαρμοζόμενα μέτρα κατά του θορύβου.
- \* Εφαρμοζόμενες μέθοδοι υπολογισμού και μέτρησης.
- \* Εκτιμώμενος συνολικός αριθμός ατόμων (σε εκατοντάδες) εκτός πολεοδομικών συγκροτημάτων που ζουν σε κατοικίες εκτεθειμένες σε μια

από τις ακόλουθες ζώνες τιμών του  $L_{den}$  (σε dB(A)), σε ύψος τεσσάρων μέτρων από το έδαφος, στην πιο εκτεθειμένη πρόσοψη: 55-59, 60-64, 65-69, 70-74, > 75. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρεται, εφόσον υπάρχουν κατάλληλα στοιχεία και είναι σκόπιμο, πόσα άτομα των παραπάνω κατηγοριών ζουν σε κτίρια τα οποία έχουν ειδική μόνωση κατά του συγκεκριμένου θορύβου και ήσυχη πρόσοψη.

- \* Ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός ατόμων (σε εκατοντάδες) εκτός πολεοδομικών συγκροτημάτων που ζουν σε κατοικίες εκτεθειμένες σε κάποια από τις ακόλουθες ζώνες τιμών του  $L_{night}$  (σε dB(A)), σε ύψος τεσσάρων μέτρων από το έδαφος στην πιο εκτεθειμένη πρόσοψη: 50-54, 55-59, 60-64, 65-69, >70. Τα στοιχεία αυτά μπορούν επίσης να υπολογισθούν για τη ζώνη τιμών των 45-49 πριν από την ημερομηνία που προβλέπεται στο άρθρο 11 παράγραφος 1.
- \* Επιπλέον, θα πρέπει να αναφέρεται, εφόσον υπάρχουν κατάλληλα στοιχεία και είναι σκόπιμο, πόσα άτομα των παραπάνω κατηγοριών ζουν σε κτίρια τα οποία έχουν ειδική μόνωση κατά του συγκεκριμένου θορύβου και ήσυχη πρόσοψη.
- \* Η συνολική έκταση (σε  $km^2$ ) που εκτίθεται σε τιμές του  $L_{den}$  υψηλότερες των 55, 65 και 75 dB, αντιστοίχως. Επιπλέον, ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός κτιρίων (σε εκατοντάδες) και ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός ατόμων (σε εκατοντάδες) που ζουν σε καθεμία από τις προαναφερόμενες περιοχές.
- \* Οι ισοθορυβικές καμπύλες 55 και 65 dB πρέπει να εμφανίζονται επίσης σε έναν ή περισσότερους χάρτες, όπου περιλαμβάνονται πληροφορίες για τη γεωγραφική θέση των χωριών, πόλεων και πολεοδομικών συγκροτημάτων εντός των καμπυλών αυτών.
- \* Περίληψη του σχεδίου δράσης, και πρόταση αντιθορυβικών μέτρων, με όλες τις σημαντικές πτυχές που αναφέρονται στο Παράρτημα V.

Συνοπτικά, για τα Πολεοδομικά Συγκροτήματα για τα οποία εκπονείται Σ.Χ.Θ., θα εξασφαλισθούν οι ακόλουθες δράσεις:

- προσδιορισμός της έκθεσης στον περιβάλλοντα θόρυβο με στρατηγική χαρτογράφηση θορύβου (ΣΧΘ), σύμφωνα με τις υποχρεωτικές ευρωπαϊκές μεθόδους και δείκτες αξιολόγησης,
- μέριμνα ώστε να είναι διαθέσιμες στο κοινό πληροφορίες σχετικά με τον περιβαλλοντικό θόρυβο και τις επιπτώσεις του,
- θέσπιση κατάλληλων σχεδίων δράσης, βασισμένων στα αποτελέσματα της χαρτογράφησης θορύβου, με στόχο:
  - ♦ την πρόληψη και τον περιορισμό του περιβαλλοντικού θορύβου όπου χρειάζεται, και ιδίως όπου τα επίπεδα έκθεσης του πληθυσμού σε αυτόν μπορούν να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και,
  - ♦ την διαφύλαξη της ποιότητας του ακουστικού περιβάλλοντος όπου αυτή είναι καλή.

Στο πλαίσιο της Σ.Χ.Θ. θα γίνει εφαρμογή του **Position Paper [3] και των νέων Ευρωπαϊκών δεικτών  $L_{den}$  &  $L_{night}$**  σύμφωνα με την ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 6ης Αυγούστου 2003 και την Γαλλική μέθοδο υπολογισμού «NMPC-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB), με την ερμηνεία που του δίνεται στην ΚΥΑ13586/724/2006 και την προβλεπόμενη κατανομή των χρονικών περιόδων ημέρας, βραδιού και νύκτας ως εξής :

$$L_{den} = 101g \frac{1}{24} \left( 12 * 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{evening} + 5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{night} + 10}{10}} \right) \quad (1)$$

όπου:

- ✓  $L_{day}$  είναι η Α-σταθμισμένη μακροπρόθεσμη μέση ηχοστάθμη, όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 1996-2: 1987, προσδιορισμένη επί του συνόλου των περιόδων ημέρας ενός έτους,
- ✓  $L_{evening}$  είναι η Α-σταθμισμένη μακροπρόθεσμη μέση ηχοστάθμη, όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 1996-2: 1987, προσδιορισμένη επί του συνόλου των βραδινών περιόδων ενός έτους,
- ✓  $L_{night}$  είναι η Α-σταθμισμένη μακροπρόθεσμη μέση ηχοστάθμη, όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 1996-2: 1987, προσδιορισμένη επί του συνόλου των νυχτερινών περιόδων ενός έτους.

Σύμφωνα με την νέα ΚΥΑ με αριθμ. οικ. 211773/2012 (ΦΕΚ 1367/Β/27-4-2012), η οποία αποσκοπεί στην αντιμετώπιση και διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του άρθρου 14 του Ν.1650/86, και των άρθρων 2, 3 και 5 της ΚΥΑ 13586/724/ΦΕΚ/384/Β/28-3-2006 [4], με την οποία έγινε η εναρμόνιση της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ στην ελληνική νομοθεσία, και στον καθορισμό ορίων οδικού κυκλοφοριακού, σιδηροδρομικού και αεροπορικού θορύβου, καθορίζονται επίσης:

- ✓ οι δέκτες που χρήζουν προστασίας από τον περιβαλλοντικό συγκοινωνιακό θόρυβο,
- ✓ οι τεχνικές προδιαγραφές σύνταξης και έγκρισης των Ειδικών Ακουστικών Μελετών Υπολογισμού & Εφαρμογής (ΕΑΜΥΕ) αντιθορυβικών πετασμάτων για την αντιμετώπιση του οδικού και του σιδηροδρομικού θορύβου, καθώς και
- ✓ οι τεχνικές προδιαγραφές σύνταξης και έγκρισης συστημάτων και προγραμμάτων παρακολούθησης του περιβαλλοντικού συγκοινωνιακού θορύβου

Οι δείκτες και τα όρια εφαρμόζονται για δέκτες κατοικίας ευρισκομένης εντός των πάσης φύσεως - εν ισχύ - θεσμοθετημένων ορίων οικιστικής ανάπτυξης όπως ΓΠΣ, σχεδίων πόλης, οικισμών κλπ. για τα οποία υπάρχει σχετική απόφαση καθορισμού ορίων και όρων δόμησης. Επιπλέον, εφαρμόζονται για την προστασία ακουστικά ευαίσθητων δεκτών όπως:

- ✓ **Εγκαταστάσεις Υγείας και Εκπαίδευσης (σχολεία, νοσοκομεία κλπ),**
- ✓ **Γηροκομεία, οίκοι τυφλών και συναφή ιδρύματα,**
- ✓ **Χώροι πολιτιστικών/ κοινωνικών εκδηλώσεων (ανοικτά θέατρα, συνεδριακά κέντρα κλπ) .**

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε ενδεικτικά στα αποτελέσματα της Σ.Χ.Θ. για τα Π.Σ. Λάρισας, Βόλου, Ηρακλείου και Χανίων

## **1. Στρατηγική Χαρτογράφηση Πολεοδομικών Συγκροτημάτων Λάρισας & Βόλου**

Ο συνολικός πληθυσμός που εισήχθη στη γεωγραφική βάση δεδομένων είναι 125.121 άτομα για το πολεοδομικό συγκρότημα της Λάρισας, ενώ για το αντίστοιχο του Βόλου είναι 107.348 άτομα [5]. Τα οικοδομικά τετράγωνα τα οποία εισήχθησαν

στην γεωγραφική βάση δεδομένων φθάνουν τα 3053 Ο.Τ. για το πολεοδομικό συγκρότημα της Λάρισας, ενώ τα 2968 Ο.Τ. για το αντίστοιχο του Βόλου. Ο αριθμός των κτιρίων τα οποία εισήχθησαν στην γεωγραφική βάση δεδομένων είναι 25.801 κτίρια για το πολεοδομικό συγκρότημα της Λάρισας, ενώ για το αντίστοιχο του Βόλου είναι 27.517 κτίρια. Τα οδικά τμήματα τα οποία εισήχθησαν στην γεωγραφική βάση δεδομένων είναι 7.594 (ή 456χλμ.) για το πολεοδομικό συγκρότημα της Λάρισας, ενώ για το αντίστοιχο του Βόλου είναι 7.084 (ή 383.3χλμ.). Στο πλαίσιο της μελέτης διαμορφώθηκε πρόγραμμα ακουστικών μετρήσεων που περιλάμβανε 67 ημερήσιες (24ωρες) μετρήσεις (31 για την Λάρισα και 36 για τον Βόλο) με παρουσίαση ωριαίας ανάλυσης των δεικτών θορύβου  $L_{den}$ ,  $L_{day}$ ,  $L_{evening}$ ,  $L_{night}$ , (βάσει των απαιτήσεων της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ),  $L_{eq}$ (24ωρών),  $L_{10}$ (18ωρ),  $L_1$ ,  $L_{10}$  &  $L_{50}$ , ανά επί μέρους ΠΣ (εντός ΣΧΘ στο σύνολο των Δήμων που εμπεριέχει) που καλύπτουν διαφορετικές πηγές περιβαλλοντικού θορύβου (οδικός και σιδηροδρομικός θόρυβος). Ο διαμορφωμένος ΣΧΘ συγκρίθηκε αναλυτικά με τα μετρηθέντα στοιχεία του προγράμματος και διαπιστώθηκε υψηλή συσχέτιση θεωρητικών-μετρηθέντων τιμών των δεικτών  $L_{den}$  &  $L_{night}$  σε κάθε ΠΣ. Στους κάτωθι πίνακες παρουσιάζεται η Κατανομή πληθυσμού ανά ζώνη οδικού+σιδηροδρομικού θορύβου για τη Λάρισα και Βόλο αντίστοιχα.

Πίνακας 1.1 Κατανομή πληθυσμού ανά ζώνη οδικού+σιδηροδρομικού θορύβου στο Π.Σ. Λάρισας

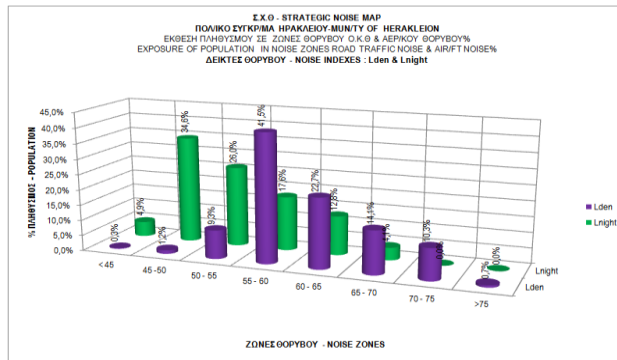
Ζώνη Θορύβου dB(A)	Κατανομή Πληθυσμού ανά Δείκτη Θορύβου (κάτοικοι & %)			
	$L_{den}$	$L_{night}$	$L_{den}$	$L_{night}$
< 45	226	5326	0,2%	4,3%
45 -50	1651	50988	1,3%	40,8%
50 – 55	5617	38331	4,5%	30,7%
55 – 60	64343	9583	51,5%	7,7%
60 – 65	25179	18160	20,1%	14,5%
65 – 70	9287	2650	7,4%	2,1%
70 – 75	17637	0	14,1%	0,0%
>75	1098	0	0,9%	0,0%
ΣΥΝΟΛΟ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ σε κατοίκους και % αναλογία ανά ζώνη θορύβου =	125038	125038	100,0%	100,0%

Πίνακας 1.2 Κατανομή πληθυσμού ανά ζώνη οδικού+σιδηροδρομικού θορύβου στο Π.Σ. Βόλου

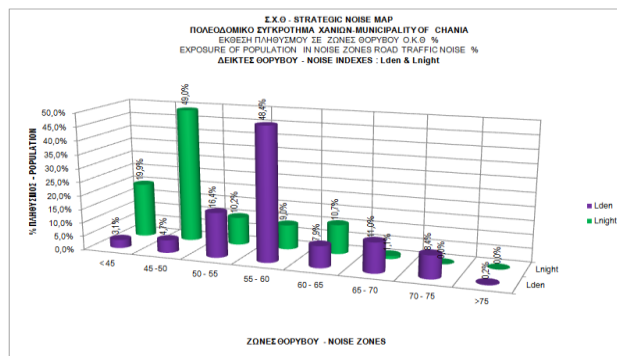
Ζώνη Θορύβου dB(A)	Κατανομή Πληθυσμού ανά Δείκτη Θορύβου (κάτοικοι & %)			
	L <sub>den</sub>	L <sub>night</sub>	L <sub>den</sub>	L <sub>night</sub>
< 45	272	2287	0,3%	2,1%
45 -50	913	5212	0,9%	4,9%
50 – 55	1755	70092	1,6%	65,3%
55 – 60	14731	16150	13,7%	15,0%
60 – 65	65918	9131	61,4%	8,5%
65 – 70	13902	4476	13,0%	4,2%
70 – 75	7555	0	7,0%	0,0%
>75	2302	0	2,1%	0,0%
ΣΥΝΟΛΟ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ σε κατοίκους και % αναλογία ανά ζώνη θορύβου =	107348	107348	100,0%	100,0%

## 2. Στρατηγική Χαρτογράφηση Πολεοδομικών Συγκροτημάτων Ηρακλείου & Χανίων

Ο συνολικός πληθυσμός που εισήχθη στη γεωγραφική βάση δεδομένων είναι **144.774** άτομα για το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου, ενώ για το αντίστοιχο των Χανίων είναι **64.272**. [6] Τα οικοδομικά τετράγωνα τα οποία εισήχθησαν στην γεωγραφική βάση δεδομένων φθάνουν τα 2678 Ο.Τ. για το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου, ενώ τα 1232 Ο.Τ. για το αντίστοιχο των Χανίων. Ο αριθμός των κτιρίων τα οποία εισήχθησαν στην γεωγραφική βάση δεδομένων είναι 41.615 κτίρια για το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου, ενώ για το αντίστοιχο των Χανίων είναι 16.861 κτίρια. Τα οδικά τμήματα τα οποία εισήχθησαν στην γεωγραφική βάση δεδομένων είναι 8192 (ή 560.8χλμ.) για το πολεοδομικό συγκρότημα του Ηρακλείου, ενώ για το αντίστοιχο Χανίων είναι 3252 (ή 230.6χλμ.). Στο πλαίσιο της μελέτης διαμορφώθηκε πρόγραμμα ακουστικών μετρήσεων που περιλάμβανε 70 ημερήσιες (24ωρες) μετρήσεις (39 για το Ηράκλειο και 31 για τα Χανιά) με παρουσίαση ωριαίας ανάλυσης των δεικτών θορύβου L<sub>den</sub>, L<sub>day</sub>, L<sub>evening</sub>, L<sub>night</sub>, (βάσει των απαιτήσεων της Οδηγίας 2002/49/EK), L<sub>eq</sub>(24ωρών), L<sub>10</sub>(18ωρ), L<sub>1</sub>, L<sub>10</sub> & L<sub>50</sub>, ανά επί μέρους ΠΣ (εντός ΣΧΘ στο σύνολο των Δήμων που εμπεριέχει) που καλύπτουν διαφορετικές πηγές περιβαλλοντικού θορύβου (οδικός, αεροπορικός και σιδηροδρομικός θόρυβος). Ο διαμορφωμένος ΣΧΘ συγκρίθηκε αναλυτικά με τα μετρηθέντα στοιχεία του προγράμματος και διαπιστώθηκε πολύ υψηλή συσχέτιση θεωρητικών-μετρηθέντων τιμών των δεικτών L<sub>den</sub> & L<sub>night</sub> σε κάθε ΠΣ. Στα κάτωθι γραφήματα παρουσιάζεται η Κατανομή Πληθυσμού περιοχής μελέτης ανά ζώνη οδικού κυκλοφοριακού + αεροπορικού - Δείκτες L<sub>den</sub> & L<sub>night</sub>.



Σχήμα 2.1 Στρατηγικός Χάρτης Θορύβου Πολεοδομικού Συγκροτήματος Ηρακλείου



Σχήμα 2.2 Στρατηγικός Χάρτης Θορύβου Πολεοδομικού Συγκροτήματος Χανίων

### 3. Συζήτηση

Σε ότι αφορά την έκθεση του πληθυσμού σε κάθε κτήριο κατοικίας, θεωρήθηκε ότι το σύνολο του καταγεγραμμένου πληθυσμού ανά κτήριο, ευρίσκεται εκτεθειμένο στην πλέον θορυβώδη πλευρά του κτηρίου εξασφαλίζοντας συνεπώς συνθήκες δυσμενούς σεναρίου έκθεσης και αξιολόγησης. Προκειμένου δε να καλυφθούν οι σχετικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2002/49/ΕΚ και να ληφθούν υπόψη στο σύνολο τους τα κτήρια κατοικιών και ο πληθυσμός που αντιστοιχεί, έγινε η παραδοχή όπως τα κτήρια κατοικιών με υψόμετρο < 4μ. ελήφθησαν στην στατιστική επεξεργασία με υψόμετρο ίσο με 4 μ. ώστε να είναι

δυνατός ο υπολογισμός έκθεσης του πληθυσμού σε κάθε πρόσοψη ώστε να αποφευχθεί η αποκλεισμός κτηρίων / πληθυσμού ελαφρά χαμηλότερου υψομέτρου. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με την σχετική Ευρωπαϊκή Οδηγία 2002/49/ΕΚ, οι ισοθροβικές καμπύλες 55 και 65 dB εμφανίζονται στους συνημμένους χάρτες, όπου περιλαμβάνονται πληροφορίες για τη γεωγραφική θέση των δήμων και πολεοδομικών συγκροτημάτων εντός των καμπυλών αυτών.

#### 4. Αναφορές

- [1] 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».
- [2] ΚΥΑ αρ. 13586/724 (ΦΕΚ Β΄384 28.3.2006) περί «Καθορισμού μέτρων, όρων και μεθόδων για την αξιολόγηση και τη διαχείριση του θορύβου στο περιβάλλον, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2002/49/ΕΚ "σχετικά με την αξιολόγηση και τη διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου" του Συμβουλίου της 25.6.2002".
- [3] Position Paper (Final Draft) Good Practice for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure, Version 2, 13<sup>th</sup> January 2006).
- [4] Η ΚΥΑ με αριθμ. οικ. 211773/2012 (ΦΕΚ 1367/Β/27-4-2012), η οποία αποσκοπεί στην αντιμετώπιση και διαχείριση του περιβαλλοντικού θορύβου στο πλαίσιο εφαρμογής των διατάξεων του άρθρου 14 του Ν.1650/86, και των άρθρων 2, 3 και 5 της ΚΥΑ 13586/724/ΦΕΚ/384/Β/28-3-2006 καθώς και τον καθορισμό ορίων 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 Οδηγία 2002/49/ΕΚ.
- [5] Σ.Σ.Ε & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ Α.Ε. *Αξιολόγηση Περιβαλλοντικού Θορύβου στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ για τα πολεοδομικά συγκροτήματα Λάρισας & Βόλου* Ενδιάμεση Έκθεση Δ Σταδίου, (2013).
- [6] ΑΔΚ ΑΡΩΝΗΣ-ΔΡΕΤΤΑΣ-ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε. & ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΩΛΕΤΤΗΣ *Αξιολόγηση Περιβαλλοντικού Θορύβου στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2002/49/ΕΚ για τα πολεοδομικά συγκροτήματα Ηρακλείου & Χανίων* Ενδιάμεση Έκθεση Δ Σταδίου, (2013).