

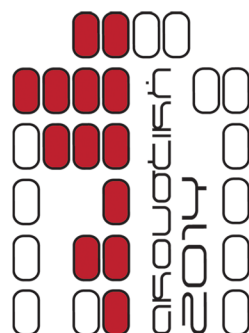
# Πρακτικά Συνεδρίου

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.*

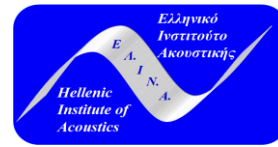
Ρήγας Κωτσάκης, *Υποψήφιος Δρ. Ηλεκτρολόγος Α.Π.Θ.*

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*

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**

12.30 - 13.30 **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 Αποθρονοποίηση 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

## ***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 Καυταντζόγλου" 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 οιωνί 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 καμία 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

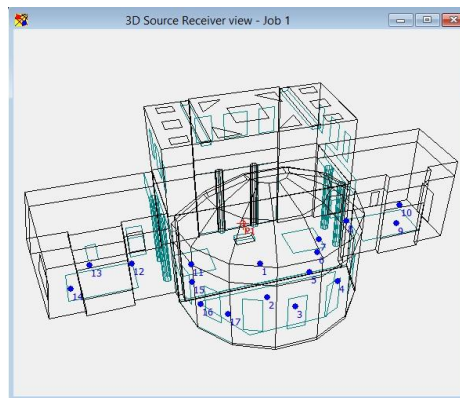
Το πρόγραμμα 'Odeon' βασίζεται σε αλγόριθμους πρόβλεψης (μέθοδος εικόνα-πηγή και ανίχνευσης ακτίνας) επιτρέποντας αξιόπιστες προβλέψεις σε μέτριους χρόνους υπολογισμού. Είναι ιδανικό για την πρόβλεψη της ακουστικής του χώρου σε μεγάλα και πολύπλοκα δωμάτια. Το σημείο εκκίνησης της προσομοίωσης στο 'Odeon' 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.

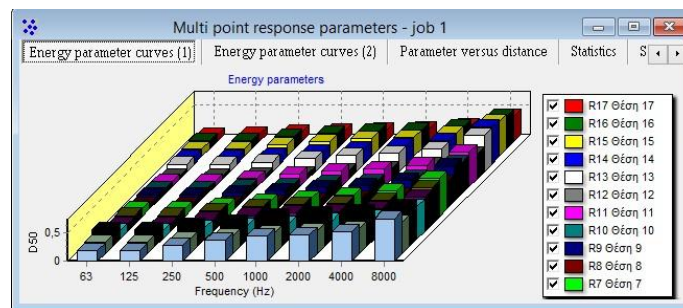
Σχήμα 3.1. Τριδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας της αίθουσας



#### 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.

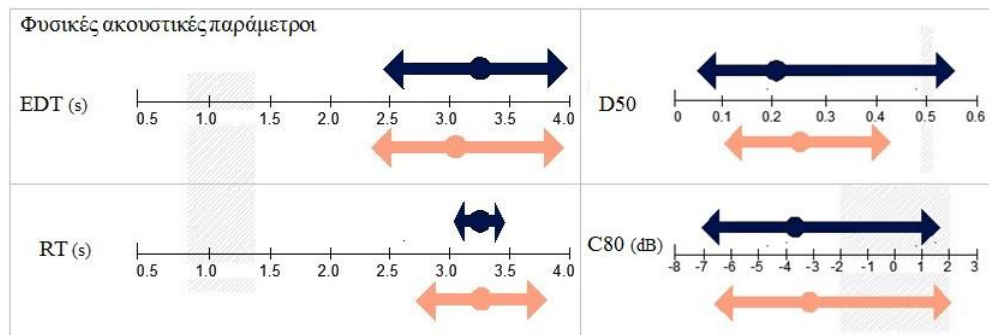
Σχήμα 4.1. Μετρήσεις του κλάσματος των πρώτων ανακλάσεων (D-50) στις δεκαεπτά θέσεις μέτρησης της αίθουσας ‘Καυταντζόγλου’, στον οϊωνί χώρο



Έχοντας μετρήσει τις ακουστικές παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν σε αυτή την

εργασία τόσο στον πραγματικό όσο και στον οιδνί 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 οιδνί χώρο)



### 5. Ερμηνεία και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Αναλύοντας τα αποτελέσματα καταλαβαίνουμε ότι οι αποκλίσεις των μετρήσεων στον οιδνί 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 οωνί 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 οωνί 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.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Barron M., «Subjective study of British symphony concert halls» *Acustica*66 pp1-14 (1988)
- [2] Α. Σωτηροπούλου, Εμβάθυνση στο σχεδιασμό χώρων ακρόασης Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείου Αθήνα (1996)
- [3] Τσινίκας Νίκος, Ακουστικός σχεδιασμός χώρων, University Studio Press, Θεσσαλονίκη 2005
- [4] Ν. Λεμπέσης, Ι. Ταμβάκος «Συγκριτική μελέτη μεταξύ μετρήσεων στον πραγματικό χώρο και στον οωνί χώρο, ακουστικών παραμέτρων αιθουσών διδασκαλίας» Διπλωματική εργασία, επιβλεψη: αν, καθ. Α. Σωτηροπούλου. Σχολή Πολ. Μηχ., ΕΜΠ, Αθήνα (2009)
- [5] Πουλάκος Γ. Μελέτη της ποιότητας της προφορικής επικοινωνίας σε συνάρτηση με την αντήχηση για την ελληνική γλώσσα. (1989)
- [6] 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)
- [7] Astolfi A., Corrado V. «Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms» *Applied Acoustics* 69 (2008)
- [8] 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)
- [9] Δ. Φιλιππίδης, Η ζωή και το έργο του αρχιτέκτονα Λύσανδρου Κανταντζόγλου 1811-1885, Πολιτιστικό Ίδρυμα Ομίλου Πειραιώς, (1995)
- [10] Christensen C.L. ODEON version 9.0 room acoustics program: version 9.0, industrial, auditorium and combined editions. Denmark: Technical University of Denmark;2003.
- [11] Sotiropoulou A., Hawkes R. G., Fleming D. B. Concert hall acoustic evaluations by ordinary concert-goers: 1, Multi-dimensional description of evaluations. *Acustica.* (1995).
- [12] Πουλάκος Γ., Κορωναίος Αιμ. Τεχνικά υλικά, Τόμος 2, Αθήνα.(2005)

[13] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Ελληνική Ακουστική Εταιρεία. Ακουστική – 82, ηχομόνωση – πρότυπα - Γ.Ο.Κ.

[14] Parkin P.H., Humphreys. Acoustics noise and buildings, Faber and Faber Ltd, London (1969)

[15] Βιάζης Γ. Ηχοπροστασία, Γενικές γνώσεις – Νομοθεσία – Μελέτες. (2005)

[16] Ζυμβρακάκης Γεώργιος, «Θόρυβος - Ηχομόνωση –Υλικά εφαρμογών», Διπλωματική Εργασία, Ηράκλειο (2012)

[17] Κ. Μπακογιάννης, «Ακουστική μελέτη σχολικών αιθουσών μέσης εκπαίδευσης», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Μάρτιος (2011)

[18] Α. Λιάμπα, «Δημιουργία πρότυπου μαθήματος αρχιτεκτονικής μουσικών σπουδών», Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, Ιούνιος (2012)

[19] Β. Χατζηκουτούλη, «Η ακουστική ως κεντρικό αίτημα οργάνωσης του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού», Διπλωματική εργασία (2012)

### **Ηλεκτρονικές αναφορές**

[20] [http://www.eie.gr/archaeologia/gr/arxeio\\_more.aspx?id=206](http://www.eie.gr/archaeologia/gr/arxeio_more.aspx?id=206)

[21] <http://www.ntua.gr/history.html>

[22] <http://www.europanostra.org>

[23] [http://www.avmentor.gr/howto/room\\_acoustics\\_0.htm](http://www.avmentor.gr/howto/room_acoustics_0.htm)

[24] <http://dty.ntua.gr/erga/averwf/>

[25] [http://www.sae.edu/reference\\_material/pages/Coefficient%20Chart.htm](http://www.sae.edu/reference_material/pages/Coefficient%20Chart.htm)

