



**Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών**  
**Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος**

**Διπλωματική Εργασία**

**«Μελέτη ακουστικής αξιολόγησης και προτάσεις βελτίωσης  
σε αίθουσες πολιτιστικών και εκπαιδευτικών  
δραστηριοτήτων του Δήμου Γλυφάδας»**

Τατιάνα Μεχίλη

A. M.: 68871

Επιβλέπων καθηγητής

Μπάρκας Νικόλαος

Συνεπιβλέπουσα Καθηγήτρια

Χουρμουζιάδου Καλλιόπη

Πάτρα, Ιούνιος 2024

© ΕΑΠ, 2024

Η παρούσα διατριβή, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ΘΕ ΑΣΠΔΕ, και τα λοιπά αποτελέσματα της αντίστοιχης Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα και το ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε η ΔΕ καθώς και τον επιβλέποντα και την επιτροπή κρίσης.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν σε όλο το στάδιο του μεταπτυχιακού μου εγχειρήματος. Ιδιαίτέρως, τον καθηγητή μου Νικόλαο Μπάρκα, για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση σε όλη αυτή τη χρονοβόρα, δύσκολη και λεπτομερή μελέτη, έως και την πλήρη ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον ευχαριστώ ιδιαίτερα την διευθύντρια της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας κ. Αποστόλου Βικτωρία, για την εμπιστοσύνη της και την άριστη συνεργασία μας. Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καθηγητές των θεματικών ενοτήτων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος "Ακουστικός Σχεδιασμός και Ψηφιακός Ήχος" για την επιστημονική παρουσίαση του συνόλου της ύλης του προγράμματος.

Τατιάνα Μεχίλη

**Μελέτη ακουστικής αξιολόγησης και προτάσεις βελτίωσης  
σε αίθουσες πολιτιστικών και εκπαιδευτικών  
δραστηριοτήτων του Δήμου Γλυφάδας**

Τατιάνα Μεχίλη

**Ονοματεπώνυμο**

**Επιβλεπόντων**

Δρ. Νικόλαος Μπάρκας

Δρ. Καλλιόπη Χουρμουζιάδου

**Ονοματεπώνυμο**

**Μέλους 1**

**Ονοματεπώνυμο**

**Μέλους 2**

**Study of acoustic evaluation and suggestions for improvement in cultural and educational activity halls of the Municipality of Glyfada.**

Tatiana Mechili

**Full Name**  
**Supervisors**

**Full Name**  
**1<sup>st</sup> Member**

**Full Name**  
**2<sup>nd</sup> Member**

Dr. Nikolaos Barkas

Dr. Kalliope Chourmouziadou

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη Ακουστικής Αξιολόγησης και Προτάσεις Βελτίωσης σε Αίθουσες Πολιτιστικών και Εκπαιδευτικών Δραστηριοτήτων του Δήμου Γλυφάδας», παρουσιάζει μια εις βάθος ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών και απόδοσης της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας. Πρωταρχικός στόχος είναι ο εντοπισμός υφιστάμενων ακουστικών ζητημάτων και η πρόταση βιώσιμων λύσεων για τη βελτιστοποίηση της αίθουσας για εκπαιδευτικές και πολιτιστικές εκδηλώσεις.

Η σημασία της ακουστικής σε εκπαιδευτικούς και πολιτιστικούς χώρους δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί, καθώς οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ευκρίνειας της ομιλίας, της μουσικής καθαρότητας και της συνολικής ακουστικής άνεσης. Η αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, που χρησιμοποιείται συχνά για διάφορες εκδηλώσεις, αποτελεί το επίκεντρο αυτής της μελέτης. Για να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση του ακουστικού περιβάλλοντος της αίθουσας, διεξήχθη μια σειρά από αυστηρές μετρήσεις.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν περιλάμβαναν βασικές ακουστικές παραμέτρους όπως ο χρόνος αντήχησης (RT60), ο πρώτος χρόνος αντήχησης (EDT), η ευκρίνεια (C50 και C80) και η διακριτότητα (D50). Η ανάλυση της πρώτης μέτρησης, που λήφθηκε από την πίσω δεξιά θέση, αποκάλυψε σημαντική αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες, η οποία σταδιακά μειώθηκε στις υψηλότερες συχνότητες. Αυτή η τάση ήταν συνεπής στις επόμενες μετρήσεις, με διακυμάνσεις στις μετρήσεις ευκρίνειας και διακριτότητας που υποδεικνύουν διαφορές θέσης στην ακουστική απόδοση. Συγκεκριμένα, η κεντρική τοποθέτηση απέδωσε πιο ισορροπημένα χαρακτηριστικά αντήχησης, ενώ οι μετρήσεις κοντά στη σκηνή έδειξαν μειωμένους χρόνους αντήχησης και βελτιωμένη ευκρίνεια, υπογραμμίζοντας την επίδραση των άμεσων ηχητικών διαδρομών και των ανακλαστικών επιφανειών.

Οι υπάρχουσες ακουστικές συνθήκες της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας διαπιστώθηκε ότι παρουσιάζουν υπερβολική αντήχηση, ιδιαίτερα στις χαμηλές συχνότητες, επηρεάζοντας αρνητικά την ευκρίνεια της ομιλίας και τη

μουσική καθαρότητα. Αυτό κατέστησε αναγκαία τη διερεύνηση υφιστάμενων στρατηγικών για τη βελτιστοποίηση της ακουστικής των σχολικών αιθουσών. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας υπογράμμισε την αποτελεσματικότητα των ηχοαπορροφητικών υλικών, τη στρατηγική τοποθέτηση επιφανειών διάχυσης και την εφαρμογή συστημάτων ενίσχυσης ήχου στον μετριασμό των ακουστικών ελλείψεων.

Οι προτεινόμενες λύσεις για την αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας περιλάμβαναν την εγκατάσταση απορροφητικών πάνελ σε τοίχους και οροφές για την αντιμετώπιση της αντήχησης χαμηλής συχνότητας, την εφαρμογή διαχυτικών στοιχείων για την εξασφάλιση ομοιόμορφης κατανομής ηχητικής ενέργειας και την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ενίσχυσης ήχου για την ενίσχυση της ευκρίνειας ομιλίας και μουσική παράσταση. Οι προτάσεις σχεδιασμού για την ανακαίνιση της αίθουσας περιλάμβαναν την ενσωμάτωση μεταβλητών ακουστικών στοιχείων για την υποδοχή διαφορετικών τύπων εκδηλώσεων, βελτιστοποιημένη διάταξη καθισμάτων για την ελαχιστοποίηση της ακουστικής σκίασης και στρατηγική τοποθέτηση ηχείων για μεγιστοποίηση της άμεσης ηχητικής κάλυψης.

Τα βασικά ευρήματα από τη μελέτη τόνισαν την κρίσιμη ανάγκη αντιμετώπισης της αντήχησης χαμηλής συχνότητας και ενίσχυσης των μετρήσεων ευκρίνειας για τη βελτίωση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας. Οι προτεινόμενες ακουστικές βελτιστοποιήσεις και στρατηγικές ενίσχυσης ήχου προσφέρουν ένα ισχυρό πλαίσιο για την επίτευξη αυτών των στόχων. Οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις που προτείνονται περιλαμβάνουν την εξερεύνηση προηγμένων τεχνικών ακουστικής μοντελοποίησης, διαχρονικές μελέτες για τον αντίκτυπο των ακουστικών βελτιώσεων και έρευνες για το ρόλο της παρουσίας του κοινού στην ακουστική απόδοση.

Συμπερασματικά, η παρούσα διατριβή παρέχει μια λεπτομερή αξιολόγηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας και προσφέρει πρακτικές λύσεις για την αναβάθμισή της. Τα ευρήματα και οι προτάσεις που παρουσιάζονται εδώ συμβάλλουν στις γνώσεις στον τομέα της ακουστικής δωματίου, χρησιμεύοντας ως αναφορά για παρόμοια έργα βελτιστοποίησης σε εκπαιδευτικά και πολιτιστικά περιβάλλοντα. Μέσα από στοχευμένες ακουστικές παρεμβάσεις μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά το ακουστικό

περιβάλλον της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, διασφαλίζοντας την καταλληλότητά του για ένα ευρύ φάσμα εκπαιδευτικών και πολιτιστικών εκδηλώσεων.

**Λέξεις – κλειδιά:** Χρόνος αντήχησης, καταληπτότητα ομιλίας, δείκτης ευκρίνειας, ακουστικές μετρήσεις, ανάλυση κρουστικής απόκρισης, ακουστική αξιολόγηση, ηχοαπορρόφηση, ακουστική αμφιθεάτρου, ακουστική αίθουσας πολλαπλών χρήσεων.

## **Abstract**

This thesis, titled "Study of Acoustic Evaluation and Suggestions for Improvement in Cultural and Educational Activity Halls of the Municipality of Glyfada," presents an in-depth analysis of the acoustic characteristics and performance of the Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall. The primary objective is to identify existing acoustic issues and propose viable solutions to optimize the hall for educational and cultural events.

The significance of acoustics in educational and cultural spaces cannot be overstated, as optimal acoustic conditions are crucial for ensuring speech intelligibility, musical clarity, and overall auditory comfort. The Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall, frequently utilized for various events, serves as the focal point of this study. To achieve a comprehensive understanding of the hall's acoustic environment, a series of rigorous measurements were conducted using the Room EQ Wizard (REW) software. These measurements were taken from four distinct positions within the hall: back right, back left, center, and stage. The speaker placements remained consistent throughout the measurement process, with two speakers positioned on the stage and three on the walls.

The collected data encompassed key acoustic parameters such as reverberation time (RT60), early decay time (EDT), clarity (C50 and C80), and definition (D50). The analysis of the first measurement, taken from the back right position, revealed significant reverberation at low frequencies, which progressively decreased at higher frequencies. This trend was consistent across the subsequent measurements, with variations in clarity and definition metrics indicating positional differences in acoustic performance. Notably, the central positioning yielded more balanced reverberation characteristics, while measurements near the stage showed reduced reverberation times and enhanced clarity, underscoring the influence of direct sound paths and reflective surfaces.

The existing acoustic conditions of the Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall were found to exhibit excessive reverberation, particularly at low frequencies, adversely affecting speech intelligibility and musical clarity. This necessitated the exploration of existing strategies for optimizing school auditorium acoustics. The



literature review highlighted the efficacy of sound-absorbing materials, strategic placement of diffusive surfaces, and the implementation of sound amplification systems in mitigating acoustic deficiencies.

The proposed solutions for the Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall involved the installation of absorptive panels on walls and ceilings to address low-frequency reverberation, the application of diffusive elements to ensure even sound energy distribution, and the deployment of advanced sound reinforcement systems to enhance speech intelligibility and musical performance. Design recommendations for the renovation of the hall included the integration of variable acoustic elements to accommodate diverse event types, optimized seating arrangements to minimize acoustic shadowing, and strategic speaker placement to maximize direct sound coverage.

Key findings from the study emphasized the critical need to address low-frequency reverberation and enhance clarity metrics to improve the hall's acoustic performance. The proposed acoustic treatments and sound amplification strategies offer a robust framework for achieving these objectives. Future research directions suggested include the exploration of advanced acoustic modeling techniques, longitudinal studies on the impact of acoustic improvements, and investigations into the role of audience presence on acoustic performance.

In conclusion, this thesis provides a detailed evaluation of the Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall's acoustic characteristics and offers practical solutions for its enhancement. The findings and recommendations presented herein contribute valuable insights to the field of room acoustics, serving as a reference for similar optimization projects in educational and cultural settings. Through targeted acoustic interventions, the auditory environment of the Experimental S.A.E.K. Glyfadas hall can be significantly improved, ensuring its suitability for a wide range of educational and cultural events.

**Keywords:** Reverberation time, speech intelligibility, intelligibility index, acoustic measurements, shock response analysis, acoustic evaluation, sound absorption, auditorium acoustics, multi-purpose hall acoustics.

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Περίληψη.....   | 5  |
| Abstract.....   | 8  |
| 1. Εισαγωγή.....  | 17 |
| 1.1 Στόχοι της έρευνας.....   | 17 |
| 1.2 Εισαγωγή στην κατάσταση του προβλήματος.....  | 17 |
| 1.3 Ιστορικό και σκεπτικό της μελέτης.....  | 18 |
| 2. Θεωρητική προσέγγιση - Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....                                     | 20 |
| 2.1 Εισαγωγή.....   | 20 |
| 2.2 Θεωρητικό πλαίσιο ακουστικής δωματίου.....  | 20 |
| 2.2.1 Βασικές αρχές της διάδοσης του ήχου.....  | 20 |
| 2.2.2 Χρόνος αντήχησης (RT60).....  | 20 |
| 2.2.3 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....   | 21 |
| 2.2.4 Δείκτες ευκρίνειας (C50, C80).....  | 21 |
| 2.2.5 Δείκτες διακριτότητας (D50, D80).....   | 21 |
| 2.3 Πολύπλευροι παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική απόδοση στα<br>αμφιθέατρα.....      | 22 |
| 2.3.1 Γεωμετρία.....  | 22 |
| 2.3.2 Υλικά και επιφάνειες.....   | 22 |
| 2.3.3 Κοινό και καθίσματα.....  | 22 |
| 2.3.4 Ηλεκτροακουστικά συστήματα.....   | 23 |
| 2.4 Ανασκόπηση προηγούμενων χειρισμών στην ακουστική για αίθουσες πολλαπλών<br>χρήσεων..... | 23 |
| 2.4.1 Τεχνικές μέτρησης.....  | 23 |
| 2.4.2 Όργανα και εξοπλισμός.....  | 23 |
| 2.4.3 Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων.....   | 24 |
| 2.4.4 Πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές.....   | 24 |
| 3. Μεθοδολογία.....   | 25 |
| 3.1 Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.....                     | 25 |
| 3.2 Όργανα και εργαλεία για τη συλλογή δεδομένων.....                                       | 25 |
| 3.3 Τεχνικές ανάλυσης δεδομένων.....  | 28 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 Ευρήματα και συμπεράσματα.....   | 29 |
| 3.5 Τα κριτήρια επιλογής του χώρου.....  | 29 |
| 3.6 Τεχνικές ανάλυσης των δεδομένων.....   | 30 |
| 3.7 Περιγραφή και απεικόνιση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ.<br>Γλυφάδας..... | 31 |
| 3.7.1 Όγκος, εμβαδόν και μεμονωμένες διαστάσεις.....                                 | 33 |
| 3.7.2 Διαμορφώσεις εντός του χώρου.....  | 34 |
| 3.7.3 Διάφορες εκδοχές διατάξεων.....  | 34 |
| 3.7.4 Εσωτερικές επενδύσεις και ανοίγματα.....                                       | 35 |
| 3.7.5 Φυσικός ήχος και ηλεκτροακουστική εγκατάσταση.....                             | 35 |
| 3.8 Διάφορες θέσεις πηγής και δέκτη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.....              | 36 |
| 3.8.1 Πρώτη μέτρηση (πίσω δεξιά).....  | 37 |
| 3.8.2 Δεύτερη μέτρηση (πίσω αριστερά).....   | 37 |
| 3.8.3 Τρίτη μέτρηση (κέντρο).....  | 38 |
| 3.8.4 Τέταρτη μέτρηση (σκηνή).....   | 38 |
| 4. Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.....                                     | 39 |
| 4.1 Πρώτη μέτρηση (πίσω δεξιά).....  | 39 |
| 4.1.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....  | 40 |
| 4.1.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T <sub>opt</sub> ).....                            | 40 |
| 4.1.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80).....  | 41 |
| 4.1.4 Δείκτης διακριτότητας (D50).....   | 42 |
| 4.1.5 Ανάλυση και επιπτώσεις.....  | 42 |
| 4.2 Δεύτερη μέτρηση (πίσω αριστερά).....   | 43 |
| 4.2.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....  | 44 |
| 4.2.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T <sub>opt</sub> ).....                            | 45 |
| 4.2.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80).....  | 45 |
| 4.2.4 Δείκτης διακριτότητας (D50).....   | 46 |
| 4.2.5 Ανάλυση και επιπτώσεις.....  | 46 |
| 4.3 Τρίτη μέτρηση (κέντρο).....  | 47 |
| 4.3.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....  | 48 |
| 4.3.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T <sub>opt</sub> ).....                            | 49 |
| 4.3.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80).....  | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.4 Δείκτης διακριτότητας (D50).....   | 50 |
| 4.3.5 Ανάλυση και επιπτώσεις.....  | 50 |
| 4.4 Τέταρτη μέτρηση (σκηνή).....   | 51 |
| 4.4.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....  | 52 |
| 4.4.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (Topt).....   | 53 |
| 4.5 Αξιολόγηση χρόνου αντήχησης, καταληπτότητας ομιλίας και μετάδοσης ήχου...53  |    |
| 4.6 Εκτίμηση των τιμών στόχου για τον χρόνο αντήχησης, σε περίπτωση λόγου και μουσικής.....  | 57 |
| 4.7 Αναλυτικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης κατά Sabine.....   | 60 |
| 5. Η υφιστάμενη κατάσταση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας και προτάσεις βελτιστοποίησής της .....  | 66 |
| 5.1 Εξέταση της ακουστικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων.....   | 66 |
| 5.1.1 Το ακουστικό περιβάλλον και η επίδρασή του στην ακουστική συμπεριφορά...66   |    |
| 5.2 Επισκόπηση πιθανών λύσεων βελτιστοποίησης ακουστικής της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων και εφαρμογή ηχοαπορροφητικών υλικών, ακουστικών επεξεργασιών και συστημάτων ενίσχυσης ήχου..... | 69 |
| 5.2.1 Στρατηγικές ακουστικής βελτιστοποίησης.....  | 69 |
| 5.2.2 Ηχοαπορροφητικά υλικά.....   | 69 |
| 5.2.3 Συστήματα ενίσχυσης ήχου.....  | 72 |
| 5.3 Διερεύνηση της ακουστικής της αίθουσας: αναλυτικός υπολογισμός και προτεινόμενες βελτιώσεις.....   | 74 |
| 5.3.1 Χρήση του λογισμικού προσομοίωσης Catt-Acoustic για επιπλέον υπολογισμούς και προτάσεις βελτίωσης της αίθουσας.....  | 82 |
| 6. Συστάσεις και συμπεράσματα.....   | 96 |
| 6.1 Εισαγωγή.....  | 96 |
| 6.2 Χρόνος αντήχησης (RT60).....   | 96 |
| 6.3 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT).....  | 96 |
| 6.4 Δείκτες ευκρίνειας (C50, C80).....   | 97 |
| 6.5 Δείκτης διακριτότητας (D50).....   | 97 |
| 6.6 Ευρήματα σημείων και θέσεων.....   | 98 |
| 6.7 Συστάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.....   | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.8 Συνέπειες για δασκάλους, μαθητές και συμμετέχοντες.....  | 101 |
| 6.9 Πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί.....   | 104 |
| 6.9.1 Επιπτώσεις για τους χρήστες.....   | 104 |
| 6.9.2 Περιβαλλοντική μεταβλητότητα.....  | 104 |
| 6.9.3 Περιορισμοί μέτρησης.....  | 105 |
| 6.9.4 Περιορισμοί ακουστικής προσομοίωσης.....   | 105 |
| 6.9.5 Συμπέρασμα.....  | 105 |
| 6.10 Προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας.....   | 106 |
| 6.10.1 Προηγμένη ακουστική μοντελοποίηση.....  | 106 |
| 6.10.2 Μελέτες ακουστικής απόδοσης.....  | 106 |
| 6.10.3 Πληροτητα και ακουστική επίδραση.....   | 106 |
| 6.10.4 Ψυχοακουστικές έρευνες.....   | 107 |
| 6.10.5 Καινοτόμα ακουστικά υλικά.....  | 107 |
| 6.10.6 Ενσωμάτωση εικονικών ακουστικών προσομοιώσεων.....  | 107 |
| 6.10.7 Αποτελεσματικότητα ακουστικής βελτίωσης.....  | 108 |
| 6.10.8 Περιβαλλοντικές ακουστικές μελέτες.....   | 108 |
| 6.11 Συμπεράσματα και τελικές παρατηρήσεις.....  | 108 |
| Βιβλιογραφικές αναφορές.....   | 111 |
| Παράρτημα Α: Μοντελοποίηση αίθουσας Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας μέσω<br>του λογισμικού Catt-Acoustic v9.1g..... | 113 |

## Ευρετήριο Εικόνων

|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 1:</b> Μικρόφωνο Behringer EMC8000.....   | 26 |
| <b>Εικόνα 2:</b> Μικρόφωνο miniDSP UMIK-1 USB.....  | 26 |
| <b>Εικόνα 3:</b> Ηχεία Genelec 8040A.....   | 26 |
| <b>Εικόνα 4:</b> Κάρτα ήχου Behringer UMC204HD.....   | 27 |
| <b>Εικόνα 5:</b> Κάρτα ήχου RME Babyface Pro.....   | 27 |
| <b>Εικόνα 6:</b> Κονσόλα ήχου Behringer Europower PMP3000.....  | 27 |
| <b>Εικόνα 7:</b> Ολοκληρωμένη κάτοψη της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.....  | 31 |
| <b>Εικόνα 8:</b> Κάτοψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.....  | 32 |
| <b>Εικόνα 9:</b> Κεντρική άποψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας από τη σκηνή.....   | 32 |
| <b>Εικόνα 10:</b> Κεντρική άποψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας από το χώρο του ακροατηρίου.....   | 33 |
| <b>Εικόνα 11:</b> Θέσεις μετρήσεων της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.....   | 36 |
| <b>Εικόνα 12:</b> Πάνελ απορρόφησης της εταιρείας GIK Acoustics 244 Bass Trap με τεχνολογία FlexRange.....  | 76 |
| <b>Εικόνα 13:</b> Διαχυτής της εταιρείας RPG Skyline Diffusor.....  | 77 |
| <b>Εικόνα 14:</b> Διάτρητα ακουστικά πάνελ 4A Alpha Pro Series Panel Diffusor / Absorber (100mm) της εταιρείας GIK Acoustics.....   | 78 |
| <b>Εικόνα 15:</b> Κάτοψη της αίθουσας έπειτα από τις προτεινόμενες βελτιώσεις με απορροφητικά πάνελ στους τοίχους, διαχυτές στο πίσω μέρος και μασοπαγίδες στις γωνίες..... | 81 |
| <b>Εικόνα 16:</b> Τομή της αίθουσας έπειτα από τις προτεινόμενες βελτιώσεις με απορροφητικά πάνελ στους τοίχους, διαχυτές στο πίσω μέρος και μασοπαγίδες στις γωνίες.....   | 82 |
| <b>Εικόνα 17:</b> Τρισδιάστατη αναπαράσταση της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.....  | 83 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Εικόνα 18:</b> Αξονομετρικό σχήμα των πλευρών της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.....         | 83 |
| <b>Εικόνα 19:</b> Οι θέσεις μέτρησης και πηγής σε κάτοψη της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic..... | 83 |
| <b>Εικόνα 20:</b> Συγκεντρωτικά σχήματα της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic...                    | 84 |
| <b>Εικόνα 21:</b> Γραφική αναπαράσταση των εκτιμώμενων χρόνων αντήχησης κατά Sabine και Eyring.....       | 85 |
| <b>Εικόνα 22:</b> Απεικόνιση του απευθείας επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPLdir) στην αίθουσα.....            | 86 |
| <b>Εικόνα 23:</b> Γράφημα του απευθείας επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPLdir) στην αίθουσα.....               | 86 |
| <b>Εικόνα 24:</b> Απεικόνιση του επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPL) στην αίθουσα.....                         | 87 |
| <b>Εικόνα 25:</b> Γράφημα του επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPL) στην αίθουσα.....                            | 87 |
| <b>Εικόνα 26:</b> Απεικόνιση του πρώιμου χρόνου αντήχησης (EDT) στην αίθουσα.....                         | 88 |
| <b>Εικόνα 27:</b> Γράφημα του πρώιμου χρόνου αντήχησης (EDT) στην αίθουσα.....                            | 88 |
| <b>Εικόνα 28:</b> Απεικόνιση του χρόνου αντήχησης T30 στην αίθουσα.....                                   | 89 |
| <b>Εικόνα 29:</b> Γράφημα του χρόνου αντήχησης T30 στην αίθουσα.....                                      | 89 |
| <b>Εικόνα 30:</b> Απεικόνιση του δείκτη ευκρίνειας C50 στην αίθουσα.....                                  | 90 |
| <b>Εικόνα 31:</b> Γράφημα του δείκτη ευκρίνειας C50 στην αίθουσα.....                                     | 90 |
| <b>Εικόνα 32:</b> Απεικόνιση του δείκτη ευκρίνειας C80 στην αίθουσα.....                                  | 91 |
| <b>Εικόνα 33:</b> Γράφημα του δείκτη ευκρίνειας C80 στην αίθουσα.....                                     | 91 |
| <b>Εικόνα 34:</b> Απεικόνιση του δείκτη διακριτότητας D50 στην αίθουσα.....                               | 92 |
| <b>Εικόνα 35:</b> Γράφημα του δείκτη διακριτότητας D50 στην αίθουσα.....                                  | 92 |

## Ευρετήριο Πινάκων

|  |    |
|--|----|
| <b>Πίνακας 1:</b> Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης.....  | 39 |
| <b>Πίνακας 2:</b> Αποτελέσματα δεύτερης μέτρησης.....  | 44 |
| <b>Πίνακας 3:</b> Αποτελέσματα τρίτης μέτρησης.....  | 48 |
| <b>Πίνακας 4:</b> Αποτελέσματα τέταρτης μέτρησης.....  | 52 |
| <b>Πίνακας 5:</b> Ιδανικός χρόνος αντήχησης ανά συχνότητα για πλήρη πληρότητα της αίθουσας. ....   | 61 |
| <b>Πίνακας 6:</b> Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για πλήρη πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση.....  | 62 |
| <b>Πίνακας 7:</b> Αποτελέσματα απορρόφησης επιφανειών με μισή πληρότητα της αίθουσας. ....   | 64 |
| <b>Πίνακας 8:</b> Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για μισή πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση. ....  | 65 |
| <b>Πίνακας 9:</b> Αρχικές τιμές RT60 της αίθουσας χωρίς κοινό. ....  | 75 |
| <b>Πίνακας 10:</b> Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα για το απορροφητικό πάνελ GIK Acoustics 244 Bass Trap. ....                                 | 76 |
| <b>Πίνακας 11:</b> Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα για τα διάτρητα ακουστικά πάνελ 4A Alpha Pro Series Panel Diffusor / Absorber (150mm). .... | 77 |
| <b>Πίνακας 12:</b> Σύνοψη των συντελεστών απορρόφησης κάθε υλικού ανά συχνότητα.....   | 79 |
| <b>Πίνακας 13:</b> Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για μισή πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση.....  | 80 |
| <b>Πίνακας 14:</b> Εκτιμώμενοι χρόνοι αντήχησης κατά Sabine και Eyring.....  | 85 |



## **1. Εισαγωγή**

### **1.1 Στόχοι της έρευνας**

Πρωταρχικός στόχος της παρούσας έρευνας είναι η διεξαγωγή συνολικής ακουστικής αξιολόγησης της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας και η πρόταση στοχευμένων βελτιώσεων με στόχο τη βελτίωση των ακουστικών συνθηκών αυτού του χώρου. Αυτή η μελέτη επιδιώκει να αντιμετωπίσει την κρίσιμη ανάγκη για βέλτιστα ακουστικά περιβάλλοντα σε αίθουσες εκπαιδευτικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων, αναγνωρίζοντας τον σημαντικό αντίκτυπό τους στην αποτελεσματική επικοινωνία, τις μαθησιακές εμπειρίες και τη συνολική ευημερία.

### **1.2 Εισαγωγή στην κατάσταση του προβλήματος**

Η ακουστική ποιότητα σε εκπαιδευτικούς και πολιτιστικούς χώρους είναι υψίστης σημασίας, ιδιαίτερα σε αίθουσες πολλαπλών χρήσεων που φιλοξενούν ποικίλες δραστηριότητες που κυμαίνονται από διαλέξεις και παρουσιάσεις έως μουσικές παραστάσεις και θεατρικές παραγωγές. Οι κακές ακουστικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη ευαισθησία της ομιλίας, αυξημένη κόπωση του ακροατή και γενική δυσφορία, η οποία με τη σειρά της μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις εκπαιδευτικές και πολιτιστικές εμπειρίες των χρηστών.

Η Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, ένα εξέχον εκπαιδευτικό ίδρυμα του Δήμου Γλυφάδας, διαθέτει αίθουσα πολλαπλών χρήσεων που χρησιμοποιείται για διάφορες εκδηλώσεις και δραστηριότητες. Οι προκαταρκτικές παρατηρήσεις και τα σχόλια από τους χρήστες έχουν δείξει πιθανά ζητήματα που σχετίζονται με την ακουστική ποιότητα, όπως η υπερβολική αντήχηση, η ανεπαρκής κατανομή του ήχου και οι διαταραχές θορύβου. Αυτά τα ζητήματα υπογραμμίζουν την αναγκαιότητα για μια συστηματική ακουστική αξιολόγηση για τον εντοπισμό συγκεκριμένων προβλημάτων και την ανάπτυξη αποτελεσματικών λύσεων προσαρμοσμένων στα μοναδικά χαρακτηριστικά αυτών των χώρων.

### **1.3 Ιστορικό και σκεπτικό της μελέτης**

Η μελέτη της ακουστικής σε αίθουσες εκπαιδευτικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξανόμενης αναγνώρισης του αντίκτυπού της στη γνωστική λειτουργία, την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας και τη συνολική εμπειρία του χρήστη. Η ακουστική ποιότητα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία του δωματίου, τα υλικά των επιφανειών, η ηχοαπορρόφηση και οι ιδιότητες διάχυσης, καθώς και η παρουσία συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) (Bradley, 2002; Hodgson, 1999).

Η έρευνα έχει δείξει ότι οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες ενισχύουν την καταληπτότητα της ομιλίας, μειώνουν την κόπωση του ακροατή και δημιουργούν ένα πιο ελκυστικό και άνετο περιβάλλον τόσο για τους παρουσιαστές όσο και για το κοινό (Sato & Bradley, 2008). Σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, η αποτελεσματική ακουστική είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την προώθηση ενός περιβάλλοντος που ευνοεί τη μάθηση, καθώς η κακή ακουστική μπορεί να οδηγήσει σε παρεξηγήσεις, μειωμένο εύρος προσοχής και συνολικά μειωμένα εκπαιδευτικά αποτελέσματα (Mealings et al., 2015).

Το σκεπτικό αυτής της μελέτης έχει τις ρίζες της στην αναγκαιότητα βελτίωσης των ακουστικών συνθηκών της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, ενισχύοντας έτσι τη λειτουργικότητά τους και τη συνολική εμπειρία των χρηστών. Διεξάγοντας μια ενδεδειγμένη ακουστική αξιολόγηση και προτείνοντας στοχευμένες βελτιώσεις, αυτή η έρευνα στοχεύει να αντιμετωπίσει τα αναγνωρισμένα ακουστικά ζητήματα και να συμβάλει στο ευρύτερο σύνολο γνώσεων σχετικά με την ακουστική βελτιστοποίηση σε εκπαιδευτικούς και πολιτιστικούς χώρους.

Ο Δήμος Γλυφάδας, γνωστός για τις έντονες πολιτιστικές και εκπαιδευτικές του δραστηριότητες, περιλαμβάνει διάφορες εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν ποικίλες εκδηλώσεις και συγκεντρώσεις. Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην υποστήριξη αυτών των δραστηριοτήτων, λειτουργώντας ως χώρος για εκπαιδευτικές συνεδρίες, πολιτιστικές εκδηλώσεις και κοινοτικές συγκεντρώσεις. Η διασφάλιση ότι τέτοιου

είδους αίθουσες διαθέτουν βέλτιστες ακουστικές συνθήκες είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της χρησιμότητας και της αποτελεσματικότητάς τους στη φιλοξενία ενός ευρέος φάσματος εκδηλώσεων.

Συνοπτικά, η παρούσα μελέτη στοχεύει να παρέχει μια λεπτομερή ακουστική αξιολόγηση της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας και να προσφέρει πρακτικές συστάσεις για βελτίωση. Αντιμετωπίζοντας τις αναγνωρισμένες ακουστικές προκλήσεις, αυτή η έρευνα επιδιώκει να βελτιώσει την ποιότητα του ακουστικού περιβάλλοντος, υποστηρίζοντας έτσι τις εκπαιδευτικές και πολιτιστικές αποστολές του ιδρύματος και της ευρύτερης κοινότητας.

## **2. Θεωρητική προσέγγιση - Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

### **2.1 Εισαγωγή**

Στον τομέα της αρχιτεκτονικής ακουστικής, η μελέτη της ηχητικής συμπεριφοράς εντός κλειστών χώρων παραμένει ένας κεντρικός τομέας έρευνας. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών των αιθουσών πολιτιστικών και εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων του Δήμου Γλυφάδας. Αυτή η μελέτη στοχεύει να παρέχει μια εις βάθος ανάλυση των τρεχουσών ακουστικών συνθηκών και να προτείνει βελτιώσεις για τη βελτιστοποίηση αυτών των χώρων για διαφορετικές ακουστικές εμπειρίες.

### **2.2 Θεωρητικό πλαίσιο ακουστικής δωματίου**

#### **2.2.1 Βασικές αρχές της διάδοσης του ήχου**

Η διάδοση του ήχου σε κλειστούς χώρους διέπεται από πολλές φυσικές αρχές, που αφορούν κυρίως την αλληλεπίδραση των ηχητικών κυμάτων με τα όρια και τα εσωτερικά στοιχεία του δωματίου. Η ταχύτητα του ήχου, η συχνότητα, το μήκος κύματος και το πλάτος είναι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα ηχητικά κύματα ταξιδεύουν και ανακλώνται μέσα σε ένα δωμάτιο. Η απορρόφηση, η ανάκλαση και η διάχυση των ηχητικών κυμάτων υπαγορεύονται από τα υλικά και τη γεωμετρική διαμόρφωση των επιφανειών του δωματίου.

#### **2.2.2 Χρόνος αντήχησης (RT60)**

Ο χρόνος αντήχησης (RT60) είναι μια θεμελιώδης παράμετρος στην ακουστική του δωματίου, που αντιπροσωπεύει το χρόνο που χρειάζεται για να ελαττωθεί ο ήχος κατά 60 dB αφού σταματήσει να εκπέμπει η πηγή. Αυτή η μέτρηση είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των ακουστικών ιδιοτήτων ενός χώρου, ιδιαίτερα όσον αφορά τη σαφήνεια και την ευκρίνεια. Η εξίσωση Sabine, που ορίζεται ως

$$RT_{60} = \frac{0.161V}{A_s}$$

όπου  $V$  ο όγκος του δωματίου και  $A$  η συνολική απορρόφηση του χώρου, παρέχει μια βασική εκτίμηση του  $RT_{60}$  υπό συνθήκες διάχυτου πεδίου (Kuttruff, 2000).

### 2.2.3 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

Ο πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT) μετρά τον χρόνο που απαιτείται για να ελαττωθεί η στάθμη του ήχου κατά 10 dB. Το EDT είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις πρώιμες ανακλάσεις και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αντιληπτή αντήχηση κατά την έναρξη της ελάττωσης του ήχου, η οποία είναι κρίσιμη για την καταληπτότητα της ομιλίας και τη μουσική διαύγεια (Bradley, 1996).

### 2.2.4 Δείκτες ευκρίνειας (C50, C80)

Οι δείκτες ευκρίνειας είναι σημαντικοί για την αξιολόγηση της ευκρίνειας του ήχου μέσα σε ένα δωμάτιο. Τα C50 και C80, που ορίζονται αντίστοιχα για την ομιλία και τη μουσική, ποσοτικοποιούν την αναλογία της πρώιμης προς την καθυστερημένη ηχητική ενέργεια. Το C50 είναι ο δείκτης ευκρίνειας για την ομιλία και το C80 είναι ο δείκτης για την ευκρίνεια της μουσικής (Beranek, 2004).

### 2.2.5 Δείκτες διακριτότητας (D50, D80)

Οι δείκτες διακριτότητας, D50 και D80, μετρούν την αναλογία της χρήσιμης ηχητικής ενέργειας που λαμβάνεται στα πρώτα 50 ms και 80 ms, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τη συνολική ηχητική ενέργεια. Αυτές οι μετρήσεις είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ευκρίνειας της ομιλίας και της μουσικής άρθρωσης μέσα σε ένα χώρο.

## **2.3 Πολύπλευροι παράγοντες που επηρεάζουν την ακουστική απόδοση στα αμφιθέατρα**

### **2.3.1 Γεωμετρία**

Η γεωμετρία ενός αμφιθεάτρου παίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της ακουστικής του απόδοσης. Παράγοντες όπως το σχήμα του δωματίου, το ύψος της οροφής και η παρουσία μπαλκονιών ή προεξοχών επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα ηχητικά κύματα διαδίδονται, ανακλώνται και διαχέονται εντός του χώρου. Τα ορθογώνια δωμάτια τείνουν να παράγουν διακριτούς αξονικούς τρόπους δόνησης, ενώ πιο σύνθετες γεωμετρίες μπορούν να ενισχύσουν τη διάχυση του ήχου, μειώνοντας την flutter echo και τα στάσιμα κύματα (Kuttruff, 2009).

### **2.3.2 Υλικά και επιφάνειες**

Τα υλικά και οι επιφάνειες επηρεάζουν σημαντικά τα ακουστικά χαρακτηριστικά ενός δωματίου. Τα απορροφητικά υλικά, όπως τα χαλιά, οι κουρτίνες και τα ακουστικά πάνελ, μειώνουν τις ανακλάσεις του ήχου και τους χρόνους αντήχησης, ενισχύοντας τη διαύγεια. Αντίθετα, τα ανακλαστικά υλικά όπως το γυαλί και το σκυρόδεμα μπορούν να αυξήσουν την αντήχηση, η οποία μπορεί να είναι ευεργετική ή επιζήμια ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του χώρου. Οι ακουστικές βελτιώσεις βάσει διαχυτών, συμπεριλαμβανομένων ακανόνιστων επιφανειών, διασκορπίζουν τα ηχητικά κύματα, προάγοντας ένα πιο ομοιόμορφο ηχητικό πεδίο (Long, 2006).

### **2.3.3 Κοινό και καθίσματα**

Η παρουσία κοινού και τα καθίσματα μπορούν να αλλάξουν τις ακουστικές ιδιότητες ενός αμφιθεάτρου. Οι ακροατές απορροφούν τον ήχο, μειώνοντας αποτελεσματικά τον χρόνο αντήχησης και αλλάζοντας τη συνολική ακουστική του δωματίου. Οι καρέκλες, τα τραπέζια και άλλα καθίσματα συμβάλλουν στην απορρόφηση και τη διάχυση του ήχου, επηρεάζοντας τη διαύγεια και την ευκρίνεια. Η

κατανόηση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της ακουστικής συμπεριφοράς κάτω από διαφορετικά σενάρια χρήσης (Barron, 1993).

#### **2.3.4 Ηλεκτροακουστικά συστήματα**

Τα ηλεκτροακουστικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ηχείων και των μικροφώνων, διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στα σύγχρονα αμφιθέατρα. Ο σωστός σχεδιασμός και η τοποθέτηση αυτών των συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη της βέλτιστης ενίσχυσης και διανομής του ήχου. Παράγοντες όπως η κατευθυντικότητα των ηχείων, η τοποθέτηση και ο συντονισμός του συστήματος πρέπει να ληφθούν προσεκτικά υπόψη για να αποφευχθούν ζητήματα όπως η ανάδραση, το φιλτράρισμα τύπου χτένας και η ανομοιόμορφη κάλυψη του ήχου (Davis & Patronis, 2006).

### **2.4 Ανασκόπηση προηγούμενων χειρισμών στην ακουστική για αίθουσες πολλαπλών χρήσεων**

#### **2.4.1 Τεχνικές μέτρησης**

Η ακριβής ακουστική μέτρηση είναι θεμελιώδης για την αξιολόγηση της απόδοσης της αίθουσας. Τεχνικές όπως η ανάλυση παλμικής απόκρισης, με τη χρήση εργαλείων όπως η Ακολουθία Μεγίστου Μήκους (MLS) επιτρέπουν λεπτομερή ανάλυση της ακουστικής απόκρισης ενός δωματίου. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν βασικά δεδομένα για παραμέτρους όπως RT60, EDT και δείκτες ευκρίνειας, διευκολύνοντας την ολοκληρωμένη κατανόηση της ακουστικής του χώρου (Meyer, 2009).

#### **2.4.2 Όργανα και εξοπλισμός**

Η επιλογή των οργάνων επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια και την αξιοπιστία των ακουστικών μετρήσεων. Τα μικρόφωνα μέτρησης, τα ηχόμετρα και το εξειδικευμένο λογισμικό είναι απαραίτητα εργαλεία σε αυτή τη διαδικασία. Τα

υψηλής ποιότητας παντοκατευθυντικά μικρόφωνα προτιμώνται για την ικανότητά τους να καταγράφουν ομοιόμορφα το ηχητικό πεδίο, ενώ οι προηγμένες λύσεις λογισμικού επιτρέπουν ακριβή ανάλυση και οπτικοποίηση ακουστικών δεδομένων (Everest & Pohlmann, 2009).

#### **2.4.3 Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων**

Η ανάλυση των ακουστικών δεδομένων απαιτεί ισχυρές στατιστικές και υπολογιστικές μεθόδους. Τεχνικές όπως η ανάλυση Fourier, η στατιστική ανάλυση ενέργειας και η ακουστική μοντελοποίηση δωματίου χρησιμοποιούνται συνήθως. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν στους ερευνητές να ερμηνεύουν πολύπλοκα σύνολα δεδομένων, να αναγνωρίζουν μοτίβα και να κάνουν εμπειριστατωμένες προβλέψεις σχετικά με την ακουστική συμπεριφορά υπό διάφορες συνθήκες (Kuttruff, 2000).

#### **2.4.4 Πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές**

Η τήρηση των διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών εξασφαλίζει συνέπεια και αξιοπιστία στις ακουστικές μετρήσεις και αξιολογήσεις. Πρότυπα όπως το ISO 3382 και το ANSI S12.60 παρέχουν ολοκληρωμένα πλαίσια για τη μέτρηση και την αναφορά ακουστικών παραμέτρων του δωματίου. Αυτές οι οδηγίες βοηθούν στην τυποποίηση των μεθοδολογιών, διευκολύνοντας τις συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών μελετών και διασφαλίζοντας ότι τα ευρήματα είναι επιστημονικά έγκυρα και πρακτικά εφαρμόσιμα (ISO 3382, 2009; ANSI S12.60, 2002).



### **3. Μεθοδολογία**

#### **3.1. Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας. Πρόκειται για μια ευρύχωρη αίθουσα που χρησιμοποιείται για διδασκαλία, διαλέξεις, ομαδικές συζητήσεις, παραστάσεις και παρουσιάσεις πολυμέσων.

Μια μελέτη περίπτωσης είναι μια ερευνητική στρατηγική που περιλαμβάνει μια εμπειρική διερεύνηση ενός σύγχρονου φαινομένου μέσα σε πραγματικό πλαίσιο, χρησιμοποιώντας πολλαπλές πηγές αποδεικτικών στοιχείων (Yin, 2018). Η επιλογή προσέγγισης μιας μελέτης περίπτωσης έγκειται στην ικανότητά της να παρέχει γνώσεις και εμπειρίες μέσα σε περίπλοκα ακουστικά περιβάλλοντα και να διερευνά την ακουστική συμπεριφορά σε μεγάλους, στεγασμένους χώρους, όπως οι αίθουσες πολλαπλών χρήσεων, με μεταβλητές όπως η γεωμετρία του χώρου, οι εσωτερικές επενδύσεις και η χωρητικότητα (Stake, 1995).

Κριτήρια για την επιλογή του χώρου ήταν:

- Η αντιπροσωπευτικότητα ενός εκπαιδευτικού χώρου μεγάλων διαστάσεων, όπου η ακουστική του επηρεάζει καθοριστικά την καταληπτότητα της ομιλίας και την επικοινωνία.
- Η ευκολία πρόσβασης στο χώρο, που επιτρέπει τη διεξαγωγή ολοκληρωμένων μετρήσεων, σε διαφορετικούς χρόνους και υπό διαφορετικές συνθήκες.
- Η ποικιλία των εκδηλώσεων που φιλοξενούνται στην αίθουσα και παρέχουν ένα ευρύ φάσμα ακουστικών σεναρίων (Yin, 2018).

#### **3.2 Όργανα και εργαλεία για τη συλλογή δεδομένων**

Κατά τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) μικρόφωνα υψηλής ακρίβειας, το Behringer EMC8000 και το miniDSP UMIK-1 USB που επιλέχθηκαν για την επίπεδη απόκριση συχνότητας και τα παντοκατευθυντικά πολικά διαγράμματά τους, παρέχοντας ακριβείς λήψεις, χωρίς χρωματισμό (Meyer, 2009).



**Εικόνα 1:** Μικρόφωνο Behringer EMC8000.



**Εικόνα 2:** Μικρόφωνο miniDSP UMIK-1 USB.

Τα αρχεία βαθμονόμησης και για τα δύο μικρόφωνα φορτώθηκαν στο λογισμικό REW (Room EQ Wizard) για να διατηρηθεί η ακρίβεια της μέτρησης.

Για τη δημιουργία δοκιμαστικών σημάτων χρησιμοποιήθηκαν επτά (7) ηχεία, πέντε ηχεία Yamaha, που υπήρχαν στην αίθουσα και δύο ηχεία Genelec μοντέλο 8040A. Τα ηχεία της Yamaha παρείχαν μια αντιπροσωπευτική εικόνα της υφιστάμενης ρύθμισης του ήχου της αίθουσας, ενώ τα ηχεία Genelec 8040A, με επίπεδη απόκριση συχνότητας, χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των μετρήσεων (Genelec, 2023).



**Εικόνα 3:** Ηχεία Genelec 8040A.

Χρησιμοποιήθηκαν κάρτες ήχου Behringer UMC204HD και RME Babyface Pro για τη μετατροπή ήχου υψηλής ανάλυσης, συνδέοντας τα μικρόφωνα μέτρησης και τα ηχεία αναφοράς στους φορητούς υπολογιστές με το λογισμικό REW. Επιπλέον, η κονσόλα ήχου Behringer Europower PMP3000 διαχειριζόταν τη δρομολόγηση και τα επίπεδα του σήματος ήχου, διασφαλίζοντας ακριβή έλεγχο των ακουστικών σημάτων δοκιμής (Behringer, 2023; RME, 2023).



Εικόνα 4: Κάρτα ήχου Behringer UMC204HD.



Εικόνα 5: Κάρτα ήχου RME Babyface Pro.



Εικόνα 6: Κονσόλα ήχου Behringer Europower PMP3000.

Ως κύριο εργαλείο λογισμικού χρησιμοποιήθηκε το Room EQ Wizard (REW) όσον αφορά τη δημιουργία δοκιμαστικών σημάτων και την ανάλυση της ακουστικής

του χώρου (ανάλυση παλμικής απόκρισης, μέτρηση απόκρισης συχνότητας και απεικόνιση του φασματογραφήματος). (REW Manual, 2023).

Πριν από τη διεξαγωγή των μετρήσεων, όλος ο εξοπλισμός βαθμονομήθηκε σχολαστικά. Τα αρχεία βαθμονόμησης των μικροφώνων φορτώθηκαν στο REW και τα επίπεδα εξόδου των ηχείων Yamaha και Genelec προσαρμόστηκαν στα τυπικά επίπεδα αναφοράς, διασφαλίζοντας συνεπείς και ακριβείς ακουστικές μετρήσεις (Everest & Pohlmann, 2015).

Οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με δοκιμαστικά σήματα, μέσω του REW, καταγράφοντας την απόκριση του δωματίου με τα βαθμονομημένα μικρόφωνα. Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές μετρήσεις, σε διαφορετικές θέσεις της αίθουσας. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν:

- Απόκριση ώθησης (Impulse response) για την αποτύπωση της απόκρισης που παρέχει δεδομένα για το χρόνο αντήχησης και τις πρώιμες ανακλάσεις (Kuttruff, 2009).
- Απόκριση συχνότητας για την ανάλυση της απόκρισης σε μια σειρά συχνοτήτων, που επιτρέπει τον προσδιορισμό της λειτουργίας και των ακουστικών ανωμαλιών του χώρου (ISO 3382-1, 2009).
- Ανάλυση φασματογραφήματος, απεικόνιση των ακουστικών χαρακτηριστικών χρόνου - συχνότητας, για τον εντοπισμό τοπικών ακουστικών προβλημάτων.

Αναφέρεται, τέλος, πως οι μετρήσεις στην αίθουσα πραγματοποιήθηκαν με άδεια κινητά καθίσματα, χωρίς κοινό.

### 3.3 Τεχνικές ανάλυσης δεδομένων

Τα ποσοτικά δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω του REW αναλύθηκαν με:

- Την ανάλυση παλμικής απόκρισης, για χαρακτηριστικά όπως ο χρόνος αντήχησης (RT60) και ο πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT) που αποτελούν κρίσιμους δείκτες της ακουστικής ποιότητας ενός χώρου (Kuttruff, 2009).

- Την απόκριση συχνότητας, για τον εντοπισμό κορυφών, οι οποίες είναι ενδεικτικές της ακουστικής λειτουργίας και επιτρέπουν τη διάγνωση λαθών και το σχεδιασμό διορθωτικών μέτρων (Everest & Pohlmann, 2015).

Για την απεικόνιση των χαρακτηριστικών χρόνου - συχνότητας της ακουστικής απόκρισής του αναλύθηκαν τα φασματογραφήματα των μετρήσεων που βοηθούν στον εντοπισμό πηγών θορύβου και ανακλάσεων (ISO 3382-1, 2009).

### 3.4 Ευρήματα και συμπεράσματα

Τα ευρήματα από την ακουστική έρευνα στην αίθουσα πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας παρείχαν πολλές πληροφορίες για την ακουστική συμπεριφορά μεγάλων, κλειστών εκπαιδευτικών χώρων. Στα βασικά αποτελέσματα περιλαμβάνονται:

1. Ο χρόνος αντήχησης (οι μετρημένες τιμές RT60) αξιολογούν την καταλληλότητα της αίθουσας για τους διαφορετικούς τύπους εκδηλώσεων.
2. Η ανάλυση της απόκρισης συχνότητας αποκάλυψε σημαντικές ανωμαλίες σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, υποδεικνύοντας στοχευμένες παρεμβάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής διαύγειας.

### 3.5. Τα κριτήρια επιλογής του χώρου

Το κύριο κριτήριο για την επιλογή του χώρου ήταν η συνάφειά του με τους ερευνητικούς στόχους. Η αίθουσα επιλέχθηκε με βάση τη χρήση της για μια ποικιλία εκδηλώσεων που απαιτούν υψηλή ακουστική ποιότητα, όπως διαλέξεις, παρουσιάσεις και παραστάσεις. Αρχιτεκτονικά και κατασκευαστικά η συγκεκριμένη αίθουσα εμφανίζει ποικίλες διαστάσεις και χαρακτηριστικά. Αυτή η ποικιλία επιτρέπει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές χωρικές διαμορφώσεις επηρεάζουν τη διάδοση του ήχου και την ευκρίνεια (Everest & Pohlmann, 2015).

Η αίθουσα πολλαπλών χρήσεων αντιπροσωπεύει μια ποικιλία ακουστικών σεναρίων, επομένως η μελέτη της καταγράφει όλο το φάσμα των ακουστικών

προκλήσεων που αντιμετωπίζονται σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα (Creswell & Creswell, 2017), καθώς επίσης και τις διακεκριμένες ακουστικές απαιτήσεις των επιμέρους μορφών και χρήσεων.

Στη μεθοδολογία των μετρήσεων συμπεριλήφθηκαν προτάσεις για διαφορετικά μεγέθη κοινού, από μικρές ομάδες έως συγκεντρώσεις πλήρους χωρητικότητας. Αυτή η παραλλαγή επιτρέπει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο τα επίπεδα πληρότητας επηρεάζουν τις ακουστικές παραμέτρους όπως ο χρόνος αντήχησης και η καταληπτότητα της ομιλίας (Kuttruff, 2009).

Προτεραιότητα δόθηκε σε εκδηλώσεις με υψηλές ακουστικές απαιτήσεις, όπως μουσικές και θεατρικές παρουσιάσεις. Αυτά τα γεγονότα απαιτούν ανώτερη ακουστική ποιότητα και βέβαια δικαιολογούν την ονομασία «πολλαπλών χρήσεων», όσον αφορά την εξυπηρέτηση των διακεκριμένων απαιτήσεων λόγου και μουσικής.

### 3.6 Τεχνικές ανάλυσης των δεδομένων

Η ανάλυση της παλμικής απόκρισης είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των χρονικών χαρακτηριστικών της ακουστικής δωματίου και περιλαμβάνει:

- Μέτρηση του χρόνου αντήχησης (RT60), δηλαδή την εξασθένηση του ήχου κατά 60 dB (ISO 3382-1, 2009).
- Μέτρηση του Early Decay Time (EDT), δηλαδή την αρχική εξασθένηση του ήχου, η οποία είναι κρίσιμη για την καταληπτότητα της ομιλίας (Meyer, 2009).

Η ανάλυση της συχνотικής απόκρισης προσδιορίζει τα φασματικά χαρακτηριστικά του δωματίου, όπως:

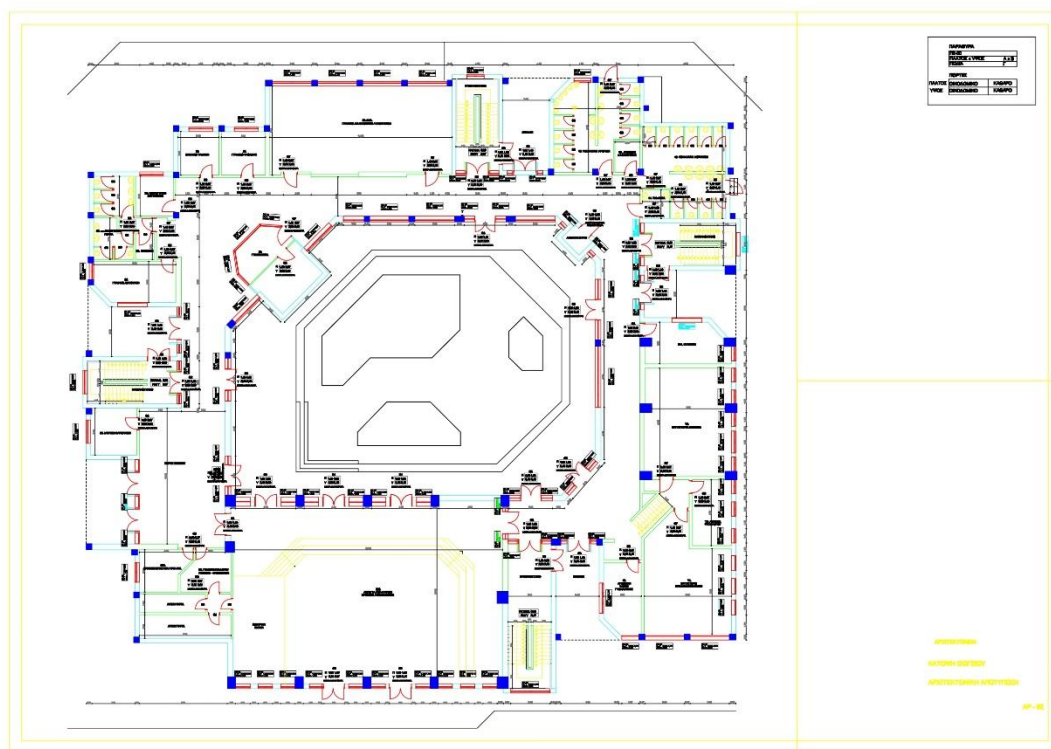
- Τους ρυθμούς του δωματίου (modes), τις συχνότητες συντονισμού που μπορούν να προκαλέσουν κορυφές στην απόκριση συχνότητας (Kuttruff, 2009).
- Τη φασματική ισορροπία, δηλαδή την κατανομή ενέργειας στο φάσμα των συχνοτήτων, η οποία επηρεάζει τη διαύγεια και την ισορροπία του ήχου (Everest & Pohlmann, 2015).

Η ανάλυση χρόνου - συχνότητας, με τα διαγράμματα waterfall και τα φασματογραφήματα, παρέχει μια λεπτομερή εικόνα του τρόπου με τον οποίο η ηχητική ενέργεια διασπάται σε διαφορετικές συχνότητες, επισημαίνοντας πιθανούς συντονισμούς και εντοπίζοντας παροδικά γεγονότα και θόρυβο (Εγχειρίδιο REW, 2023, Meyer, 2009).

### **3.7 Περιγραφή και απεικόνιση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας**

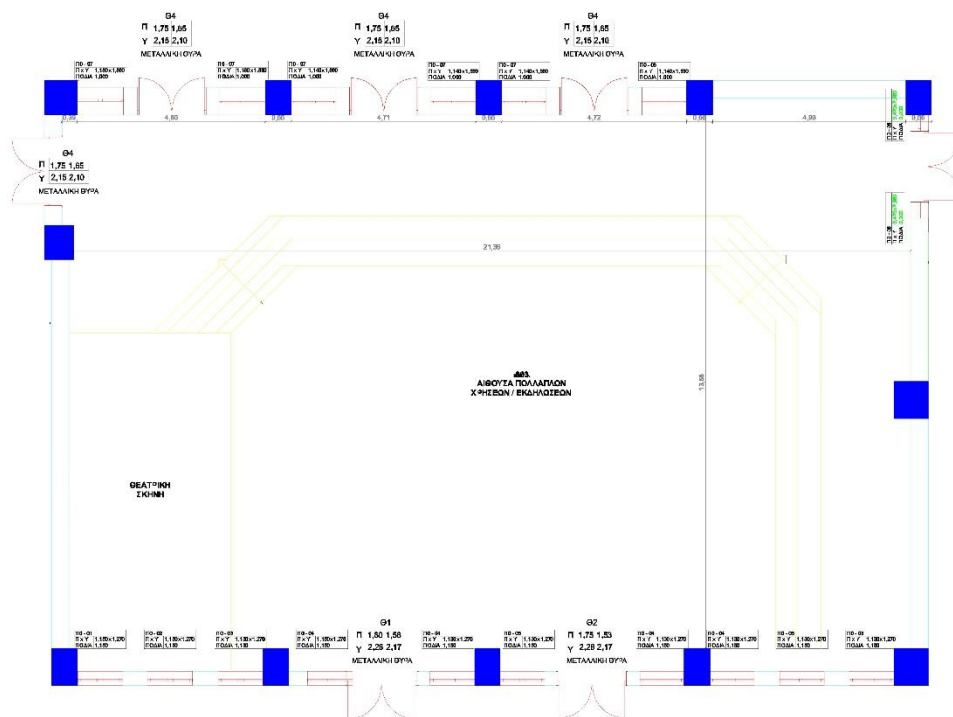
Η κεντρική αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, που προορίζεται για πολιτιστικές και εκπαιδευτικές δραστηριότητες, είναι ένας χώρος εντός των εγκαταστάσεων. Η αίθουσα χαρακτηρίζεται από το μοναδικό πολυγωνικό της σχήμα, που φιλοξενεί ποικίλες εκδηλώσεις και λειτουργίες. Στα σχήματα που ακολουθούν η αίθουσα βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα και τα διάφορα τμήματά της απεικονίζονται με μαύρα σχήματα.





**Εικόνα 7:** Ολοκληρωμένη κάτοψη της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.





Εικόνα 8: Κάτοψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.



Εικόνα 9: Κεντρική άποψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας από τη σκηνή.



**Εικόνα 10:** Κεντρική άποψη της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας από το χώρο του ακροατηρίου.

### 3.7.1 Όγκος, εμβαδόν και μεμονωμένες διαστάσεις

Οι διαστάσεις της αίθουσας είναι οι εξής:

Μήκος: 17,74 meters

Πλάτος: 13,34 meters

Ύψος: 4,20 meters.

Αυτές οι διαστάσεις είναι απαραίτητες για την κατανόηση της ακουστικής συμπεριφοράς, καθώς οι μεγαλύτεροι όγκοι τείνουν να έχουν μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης που μπορεί να επηρεάσουν την ευκρίνεια της ομιλίας και τη συνολική ποιότητα ήχου.

Η επιφάνεια της αίθουσας είναι  $236,65\text{m}^2$ , παρέχοντας άφθονο χώρο για καθίσματα και κίνηση.

Ο όγκος της αίθουσας είναι κρίσιμος παράγοντας για την ακουστική της απόδοση. Δεδομένου του ύψους και του εμβαδού της αίθουσας, ο όγκος της υπολογίζεται ότι είναι  $993,93\text{m}^3$ .

### 3.7.2 Διαμορφώσεις εντός του χώρου

Το εσωτερικό της αίθουσας έχει σχεδιαστεί για να φιλοξενεί διάφορες διαμορφώσεις για την υποστήριξη διαφορετικών τύπων εκδηλώσεων, όπως διαλέξεις, παραστάσεις και συνελεύσεις.

- **Ανισοσταθμίες:** Το πολυγωνικό σχήμα της αίθουσας μπορεί να προκαλέσει ακουστικές ανισορροπίες λόγω ακανόνιστων ανακλάσεων, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις ακουστικές μελέτες.
- **Χώροι καθισμάτων:** Η αίθουσα μπορεί να φιλοξενήσει διάφορους σχηματισμούς ξύλινων κινητών καθισμάτων.
- **Σταθερές κερκίδες:** Η αίθουσα διαθέτει σταθερές κερκίδες με σκαλοπάτια που παρέχουν πολυεπίπεδα καθίσματα, βελτιώνοντας την ορατότητα και την ακουστική για τα μέλη του κοινού που κάθονται πιο μακριά από τη σκηνή ή τον χώρο ομιλίας.
- **Πρόσθετα καθίσματα:** Μπορούν να ενσωματωθούν πρόσθετα καθίσματα για να φιλοξενούν διαφορετικά μεγέθη κοινού και τύπους εκδηλώσεων.

### 3.7.3 Διάφορες εκδοχές διατάξεων

Η αίθουσα μπορεί να διαμορφωθεί σε διαφορετικές διατάξεις ανάλογα με τον τύπο της εκδήλωσης. Κάθε διάταξη επηρεάζει το ακουστικό περιβάλλον και την χωρητικότητα των καθισμάτων.

- **Περιοχή ομιλητών - θεάματος:** Για ομιλίες και παραστάσεις η αίθουσα μπορεί να διευθετηθεί με σαφή διάκριση μεταξύ του χώρου της σκηνής και των θέσεων των θεατών.
- **Καθίσματα ακροατών - θεατών:** Διαρρυθμισμένα ώστε να παρέχουν βέλτιστες γωνίες θέασης και ακουστική κάλυψη. Το σύνολο των καθισμάτων που βρίσκονται στο βασικό χώρο κάτω από τη σκηνή ανέρχεται στα 140. Επιπρόσθετα, τα καθίσματα που βρίσκονται στο πίσω μέρος της αίθουσας, αλλά και στα αριστερά του κεντρικού χώρου πάνω στο διάζωμα ανέρχονται σε

30. Οπότε, το τελικό σύνολο των καθισμάτων για τους ακροατές εντός του χώρου είναι 170.

#### **3.7.4 Εσωτερικές επενδύσεις και ανοίγματα**

Οι εσωτερικές επενδύσεις και τα δομικά χαρακτηριστικά της αίθουσας επηρεάζουν σημαντικά τις ακουστικές της ιδιότητες.

- Οροφή: Η οροφή είναι βαμμένη τσιμεντοκονία πάνω σε σκυρόδεμα
- Δάπεδο: Το υλικό του δαπέδου είναι μαρμάρινη επίστρωση πάνω σε σκυρόδεμα.
- Πλευρικά τοιχώματα: Οι τοίχοι είναι κατασκευασμένοι από βαμμένη τσιμεντοκονία πάνω σε σκυρόδεμα.
- Κουφώματα και ανοιχτά περάσματα: Τα παράθυρα και οι πόρτες που είναι τοποθετημένα στην αίθουσα είναι κατασκευασμένα από μεταλλικά υλικά, επηρεάζοντας τόσο το φυσικό φως όσο και τη μετάδοση του ήχου. Τα μέτρα ηχομόνωσης γύρω από τα κουφώματα και τα ανοιχτά περάσματα είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της ακουστικής ακεραιότητας, μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχει συσταθεί κάποια ιδιαίτερη πρόβλεψη. Οι πόρτες στο σύνολό τους τρεις και είναι διπλές, εκ των οποίων η μια είναι καλυμμένη από κουρτίνα. Τα παράθυρα είναι συνολικά 17, με το μεγαλύτερο πλήθος αυτών να διαθέτει μηχανισμό κάλυψης μέσω ρολού συσκότισης.

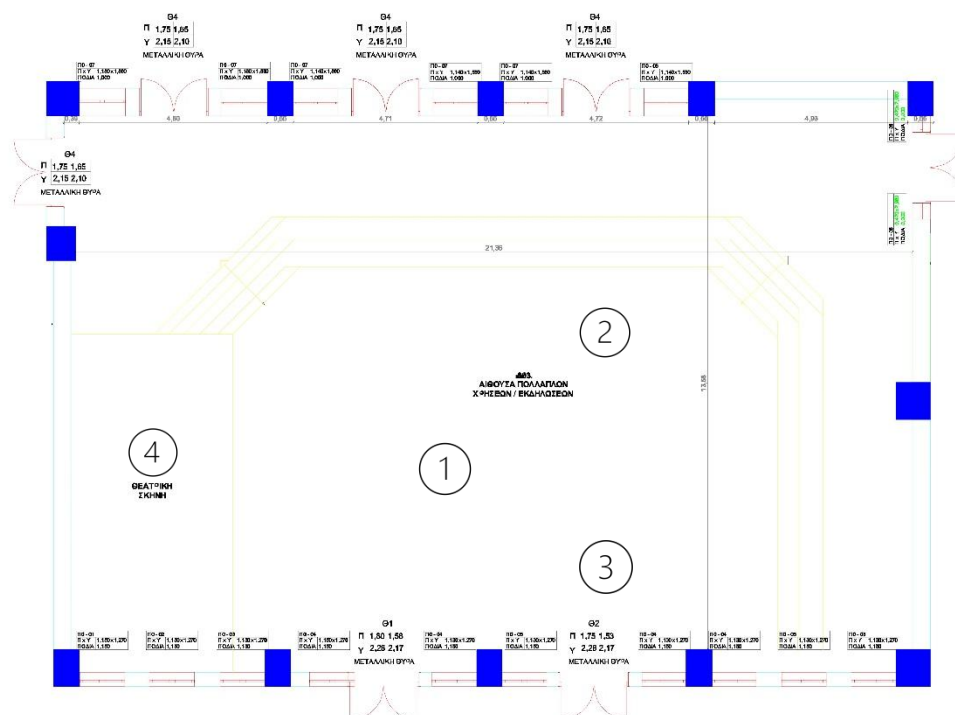
#### **3.7.5 Φυσικός ήχος και ηλεκτροακουστική εγκατάσταση**

Η αποτελεσματική διανομή του ήχου εντός της αίθουσας επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού φυσικής ακουστικής και ηλεκτροακουστικών συστημάτων. Τα ηχεία PA που βρίσκονται στο χώρο είναι πέντε (5) και είναι τοποθετημένα δυο (2) επάνω στη σκηνή, σε δεξιά και αριστερή θέση αντίστοιχα, και τρία (3) τα οποία βρίσκονται επί των τοίχων στην αριστερή πλευρά του χώρου, σε μια προσπάθεια για την εξασφάλιση ομοιόμορφης ηχητικής κάλυψης.

### 3.8 Διάφορες θέσεις πηγής και δέκτη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

Για μια ενδεδειγμένη ακουστική αξιολόγηση, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ήχου σε τέσσερις θέσεις πηγής και δέκτη εντός της αίθουσας. Αυτό βοήθησε στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο ήχος διαδίδεται και γίνεται αντιληπτός σε όλο το χώρο.

Η αξιολόγηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της πολυλειτουργικής αίθουσας στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας κατέστησε αναγκαία μια σχολαστική διάταξη πρωτοκόλλων μετρήσεων. Αυτό περιλάμβανε την τοποθέτηση ενός μικροφώνου μέτρησης σε τέσσερις διακριτές θέσεις εντός της αίθουσας: πίσω δεξιά, πίσω αριστερά, στο κέντρο και στη σκηνή. Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, τα ηχεία που βρίσκονταν στην αίθουσα διατηρήθηκαν ακίνητα, καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα μετακίνησής τους και προστέθηκαν επιπλέον δυο ηχεία επάνω στη σκηνή, για να διασφαλιστεί η συνέπεια στην εκπομπή ήχου.



**Εικόνα 11:** Θέσεις μετρήσεων της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.



### **3.8.1 Πρώτη μέτρηση (πίσω δεξιά)**

Κατά την πρώτη μέτρηση το μικρόφωνο μετρήσεων βρισκόταν στο πίσω δεξιό τεταρτημόριο της αίθουσας, σε αρκετή απόσταση από τον πίσω και τον πλευρικό τοίχο. Η τοποθέτηση του μικροφώνου μέτρησης στο πίσω δεξιό τεταρτημόριο είχε σκοπό να εξετάσει τις ακουστικές ιδιότητες της γύρω περιοχής, εστιάζοντας ιδιαίτερα στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ηχητικών ανακλάσεων και των απορροφητικών συμπεριφορών στα όρια της αίθουσας. Ήταν κρίσιμη για την αποτύπωση της σωρευτικής επίδρασης των ηχητικών ανακλάσεων από αυτές τις επιφάνειες, καθώς αυτή η θέση υποτίθεται ότι παρουσιάζει σημαντική αντήχηση και πιθανά φαινόμενα στάσιμων κυμάτων λόγω της ορθογώνιας τομής των ανακλαστικών επιφανειών. Τέτοια δεδομένα είναι πολύτιμα για την κατανόηση της διάδοσης και της εξασθένησης της ακουστικής ενέργειας σε γωνιακές περιοχές, οι οποίες είναι συχνά ακουστικά προβλήματα λόγω των τοπικών συντονισμών και των ανωμαλιών που προκαλούνται από την ανάκλαση.

### **3.8.2 Δεύτερη μέτρηση (πίσω αριστερά)**

Κατά την δεύτερη μέτρηση το μικρόφωνο μετρήσεων ήταν τοποθετημένο στο πίσω αριστερό τεταρτημόριο της αίθουσας και σε ασφαλή απόσταση από τον πίσω και τον πλευρικό τοίχο. Αντικατοπτρίζοντας την πίσω δεξιά διαμόρφωση, η τοποθέτηση του μικροφώνου μετρήσεων στο πίσω αριστερό τεταρτημόριο στόχευε σε μια συγκριτική ανάλυση της ακουστικής συμμετρίας εντός της αίθουσας. Αυτή η τοποθέτηση διευκόλυνε την εξέταση πιθανών αποκλίσεων στις ακουστικές αποκρίσεις μεταξύ της αριστερής και της δεξιάς περιοχής της αίθουσας. Η εγγύτητα στο πίσω και το αριστερό πλευρικό τοίχωμα επέτρεψε την αποτύπωση ανακλάσεων και αντηχήσεων ειδικά για αυτή την περιοχή. Τέτοιες μετρήσεις είναι κρίσιμες για τον εντοπισμό ασύμμετρων ακουστικών συμπεριφορών που μπορεί να προκύψουν από δομικές ανωμαλίες ή διακυμάνσεις στα υλικά της επιφάνειας και τις απορροφητικές επεξεργασίες στις απέναντι πλευρές της αίθουσας.

### **3.8.3 Τρίτη μέτρηση (κέντρο)**

Κατά την τρίτη μέτρηση το μικρόφωνο μετρήσεων ήταν τοποθετημένο στο κέντρο του χώρου των καθισμάτων. Η κεντρική τοποθέτηση του μικροφώνου μέτρησης είχε στόχο να καταγράψει μια ολιστική ακουστική απόκριση, αντιπροσωπευτική του άμεσου ηχητικού πεδίου. Τοποθετημένη στο γεωμετρικό κέντρο του χώρου των καθισμάτων, αυτή η διαμόρφωση ελαχιστοποιούσε την επίδραση των οριακών ανακλάσεων, παρέχοντας έτσι μια καθαρή ακουστική εικόνα που διαμορφώνεται κυρίως από την άμεση διαδρομή των ηχητικών κυμάτων από τα ηχεία. Αυτή η κεντρική τοποθεσία είναι υψίστης σημασίας για την αξιολόγηση της καθαρότητας του ήχου, της χωρικής ομοιομορφίας και της συνολικής κατανομής της ακουστικής ενέργειας εντός της αίθουσας. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από αυτή τη θέση χρησιμεύουν ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των εγγενών ακουστικών χαρακτηριστικών της αίθουσας.

### **3.8.4 Τέταρτη μέτρηση (σκηνή)**

Το μικρόφωνο μέτρησης ήταν τοποθετημένο στη σκηνή, κεντρικά ευθυγραμμισμένο σε σχέση με την περιοχή καθισμάτων του κοινού. Η τοποθέτηση του μικροφώνου μέτρησης στη σκηνή σχεδιάστηκε για να αποσαφηνίσει το ακουστικό περιβάλλον από την οπτική γωνία των ερμηνευτών. Αυτή η τοποθέτηση είναι κρίσιμη για την κατανόηση του πώς ο ήχος προβάλλεται από τη σκηνή στην αίθουσα και πώς αλληλεπιδρά με το άμεσο περιβάλλον της σκηνής. Η θέση του μικροφώνου κοντά στο μπροστινό άκρο της σκηνής εξασφάλιζε ότι αποτυπώνονταν τόσο ο άμεσος ήχος από τα ηχεία όσο και οι πρώτες ανακλάσεις από το περιβάλλον της σκηνής. Αυτά τα δεδομένα είναι καθοριστικά για την αξιολόγηση του αντίκτυπου της σκηνής στην ενίσχυση του ήχου, τα πιθανά προβλήματα ανατροφοδότησης και τις συνολικές συνθήκες παρακολούθησης για τους καλλιτέχνες.

## 4. Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων

### 4.1 Πρώτη μέτρηση (πίσω δεξιά)

Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο πίσω δεξί τμήμα του χώρου των καθισμάτων, με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην πίσω δεξιά γωνία. Αυτή η τοποθέτηση επέτρεψε την ανάλυση των ακουστικών χαρακτηριστικών από ένα απομακρυσμένο σημείο σε σχέση με τις ηχητικές πηγές στη σκηνή, συλλαμβάνοντας δεδομένα που αντικατοπτρίζουν την ακουστική εμπειρία από μια οπτική γωνία μακρινού πεδίου.

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα πρώτης μέτρησης.

| Συχνότητα (Hz) | EDT (s) | T <sub>opt</sub> (s) | C50 (dB) | C80 (dB) | D50 (%) |
|----------------|---------|----------------------|----------|----------|---------|
| 50             | 3.582   | 4.182                | -3.50    | -3.27    | 30.9    |
| 63             | 3.135   | 2.679                | 3.42     | 3.82     | 68.7    |
| 80             | 2.555   | 3.117                | 2.95     | 4.78     | 66.4    |
| 100            | 2.109   | 2.784                | 2.45     | 3.09     | 63.8    |
| 125            | 2.280   | 2.751                | -2.68    | -2.29    | 35.0    |
| 160            | 1.866   | 2.972                | 2.94     | 4.47     | 66.3    |
| 200            | 2.608   | 2.590                | -1.43    | -0.76    | 41.8    |
| 250            | 2.814   | 2.544                | -6.23    | -3.45    | 19.3    |
| 315            | 2.003   | 2.749                | 1.34     | 1.96     | 57.6    |
| 400            | 2.016   | 2.435                | -2.56    | 1.25     | 35.7    |
| 500            | 1.760   | 2.362                | 0.98     | 2.05     | 55.6    |
| 630            | 2.194   | 2.358                | 0.91     | 2.24     | 55.2    |
| 800            | 2.392   | 2.440                | -0.22    | 0.90     | 48.8    |
| 1000           | 2.596   | 2.541                | 1.53     | 2.79     | 58.7    |
| 1250           | 2.189   | 2.475                | 0.86     | 1.54     | 55.0    |
| 1600           | 2.179   | 2.390                | 1.17     | 2.86     | 56.7    |
| 2000           | 2.026   | 2.243                | 4.40     | 5.18     | 73.3    |
| 2500           | 1.439   | 2.097                | 7.57     | 8.45     | 85.1    |
| 3150           | 1.621   | 1.879                | 4.38     | 5.13     | 73.3    |
| 4000           | 1.511   | 1.728                | 4.58     | 5.60     | 74.1    |
| 5000           | 1.230   | 1.424                | 5.61     | 6.79     | 78.5    |
| 6300           | 0.996   | 1.205                | 6.83     | 8.39     | 82.8    |
| 8000           | 0.774   | 0.943                | 6.25     | 8.18     | 80.8    |
| 10000          | 0.536   | 0.736                | 8.17     | 10.74    | 86.8    |



#### 4.1.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

- 50 Hz: Το EDT σε αυτή τη συχνότητα είναι 3,582 δευτερόλεπτα. Οι ήχοι χαμηλής συχνότητας, όπως αυτοί στα 50 Hz, συνδέονται συνήθως με παρατεταμένους χρόνους εξασθένησης λόγω των μεγάλων μηκών κύματος και της δυνατότητας συσσώρευσης ενέργειας στις γωνίες και κατά μήκος των ορίων (Kuttruff, 2016).
- 63 Hz: Στα 3,135 δευτερόλεπτα, το EDT υποδεικνύει μείωση του χρόνου εξασθένησης καθώς αυξάνεται η συχνότητα, κάτι που αναμένεται καθώς οι υψηλότερες συχνότητες απορροφώνται πιο εύκολα από τα υλικά στην αίθουσα.
- 100 Hz έως 3150 Hz: Παρατηρείται μια τάση μείωσης του EDT, με αξιοσημείωτη πτώση στα 500 Hz (1,760 δευτερόλεπτα) και μια επακόλουθη ελαφρά αύξηση στα 1000 Hz (2,596 δευτερόλεπτα). Αυτό το σχέδιο υποδηλώνει ποικίλα χαρακτηριστικά απορρόφησης των υλικών της αίθουσας σε όλο το φάσμα συχνοτήτων.
- 4000 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές EDT συνεχίζουν να μειώνονται, φτάνοντας τουλάχιστον τα 0,536 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz. Αυτό υποδηλώνει αποτελεσματική απορρόφηση των υψηλών συχνοτήτων, πιθανόν λόγω της παρουσίας απορροφητικών υλικών σε τοίχους και οροφές που έχουν σχεδιαστεί για τον έλεγχο της αντήχησης (ISO 3382-1:2009).

#### 4.1.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>)

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>) είναι ο χρόνος εξασθένησης του RT60 με βάση την κλίση της καμπύλης Schroeder σε ένα μεταβλητό εύρος που επιλέχθηκε για την καλύτερη γραμμική προσαρμογή. Εάν ο πρώιμος χρόνος αντήχησης είναι πολύ μικρότερος από τον T30, ο T<sub>opt</sub> χρησιμοποιεί ένα σημείο εκκίνησης που βασίζεται στη διασταύρωση των γραμμών EDT και T30, διαφορετικά χρησιμοποιεί μια εξασθένηση της τάξης των -5 dB. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ελέγχει κάθε τελικό σημείο σε βήματα του 1dB μέχρι το τέλος της καμπύλης Schroeder και επιλέγει αυτό που δίνει την καλύτερη γραμμική προσαρμογή.

- 50 Hz: Το  $T_{opt}$  των 4,182 δευτερολέπτων σε αυτή τη συχνότητα υποδηλώνει ότι η ενέργεια χαμηλής συχνότητας παραμένει στην αίθουσα, συμβάλλοντας σε μια αίσθηση ζεστασιάς και πληρότητας.
- 63 Hz έως 8000 Hz: Οι τιμές  $T_{opt}$  κυμαίνονται, με σημαντικές κορυφές και κατώτατες τιμές. Για παράδειγμα, το  $T_{opt}$  στα 63 Hz είναι 2,679 δευτερόλεπτα, ενώ στα 500 Hz είναι 2,362 δευτερόλεπτα. Αυτές οι παραλλαγές υποδεικνύουν τη σύνθετη αλληλεπίδραση των ηχητικών ανακλάσεων και των απορροφητικών στοιχείων μέσα στην αίθουσα (Beranek, 2004).
- 10000 Hz: Στα 0,736 δευτερόλεπτα, η τιμή  $T_{opt}$  σημαίνει απότομη μείωση του χρόνου αντήχησης σε πολύ υψηλές συχνότητες, ενισχύοντας την αποτελεσματική απορρόφηση αυτών των συχνοτήτων.

#### 4.1.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80)

##### C50

- 50 Hz: Η τιμή C50 είναι -3,50 dB, υποδεικνύοντας ότι η αργοπορημένη ενέργεια κυριαρχεί σε χαμηλές συχνότητες, οι οποίες μπορούν να θολώσουν τον ήχο (Bradley, 1995).
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές C50 γενικά βελτιώνονται, με θετικές τιμές που ξεκινούν από 63 Hz (3,42 dB) έως 2000 Hz (4,40 dB). Αυτή η τάση υποδηλώνει καλύτερη σαφήνεια καθώς αυξάνεται η συχνότητα.
- 2500 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές C50 κορυφώνονται στα 2500 Hz (7,57 dB) και παραμένουν υψηλές, υποδεικνύοντας εξαιρετική ευκρίνεια για ήχους υψηλής συχνότητας, ευεργετικές για την ομιλία και λεπτομερή μουσικά περάσματα.

##### C80

- 50 Hz: Η τιμή C80 των -3,27 dB ενισχύει την κυριαρχία της αργοπορημένης ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες.

- 63 Hz έως 10000 Hz: Παρατηρείται παρόμοια τάση με το C50, με τις τιμές να βελτιώνονται σημαντικά σε υψηλότερες συχνότητες, να κορυφώνονται στα 2500 Hz (8,45 dB) και να διατηρούν υψηλή ευκρίνεια (C80 πάνω από 6 dB) σε όλο το φάσμα των υψηλών συχνοτήτων.

#### 4.1.4 Δείκτης διακριτότητας (D50)

- 50 Hz: Μια τιμή D50 30,9% στα 50 Hz υποδηλώνει ότι ένα σημαντικό μέρος της ηχητικής ενέργειας καθυστερεί, επηρεάζοντας τη διακριτοτητα.
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές D50 αυξάνονται, υποδεικνύοντας καλύτερη διακριτοτητα καθώς αυξάνεται η συχνότητα, με αξιοσημείωτη τιμή 85,1% στα 2500 Hz, που αντικατοπτρίζει εξαιρετική ευκρίνεια ομιλίας.
- 4000 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές D50 παραμένουν υψηλές, με κορυφή στα 10000 Hz (86,8%), υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα της αίθουσας στη διατήρηση της ευκρίνειας και της σαφήνειας της ομιλίας σε υψηλότερες συχνότητες.

#### 4.1.5 Ανάλυση και επιπτώσεις

Η ανάλυση αυτών των ακουστικών παραμέτρων από την πρώτη μέτρηση αποκαλύπτει αρκετές κρίσιμες ιδέες:

- Αντήχηση χαμηλής συχνότητας: Οι παρατεταμένες τιμές EDT και  $T_{0pT}$  σε χαμηλές συχνότητες υποδεικνύουν πιθανά προβλήματα με τη συσσώρευση μπάσων, τα οποία μπορεί να απαιτούν χρήση μπασοπαγίδων ή απορροφητικών υλικών για τον μετριασμό της υπερβολικής αντήχησης (Everest & Pohlmann, 2015).
- Ευκρίνεια υψηλών συχνοτήτων: Οι υψηλές τιμές C50 και C80 σε υψηλότερες συχνότητες αποδεικνύουν την ικανότητα της αίθουσας να υποστηρίζει ευκρίνεια ομιλίας και μουσικής, απαραίτητη για την πολυλειτουργική χρήση της.

- Καταληπτότητα ομιλίας: Οι υψηλές τιμές D50 στο εύρος μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων υποδεικνύουν ότι η αίθουσα είναι κατάλληλη για παραστάσεις προφορικού λόγου, διαλέξεις και παρόμοιες δραστηριότητες όπου η ευκρίνεια της ομιλίας είναι πρωταρχικής σημασίας.

Αυτά τα ευρήματα σχηματίζουν μια ολοκληρωμένη εικόνα του ακουστικού περιβάλλοντος της αίθουσας από την πίσω δεξιά θέση, παρέχοντας μια βάση για περαιτέρω ανάλυση και πιθανές ακουστικές βελτιώσεις.

#### 4.2 Δεύτερη μέτρηση (πίσω αριστερά)

Η δεύτερη μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο πίσω αριστερό τμήμα του χώρου των καθισμάτων κοντά στις κερκίδες, με το μικρόφωνο τοποθετημένο στην πίσω αριστερή γωνία. Αυτή η τοποθέτηση είναι απαραίτητη για την κατανόηση της χωρικής διακύμανσης στην ακουστική απόδοση, καταγράφοντας πώς συμπεριφέρεται ο ήχος σε μια άλλη απομακρυσμένη περιοχή της αίθουσας. Η ανάλυση ακουστικών παραμέτρων όπως ο πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT), ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>), οι δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80) και ο δείκτης διακριτότητας (D50) σε αυτήν την τοποθεσία παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της ακουστικής εμπειρίας από μια διαφορετική οπτική γωνία σε σύγκριση με την πρώτη μέτρηση.

**Πίνακας 2:** Αποτελέσματα δεύτερης μέτρησης.

| Συχνότητα (Hz) | EDT (s) | T <sub>opt</sub> (s) | C50 (dB) | C80 (dB) | D50 (%) |
|----------------|---------|----------------------|----------|----------|---------|
| 50             | 3.515   | 4.090                | -3.47    | -3.23    | 31.0    |
| 63             | 3.133   | 2.675                | 3.44     | 3.83     | 68.8    |
| 80             | 2.572   | 3.419                | 2.99     | 4.83     | 66.5    |
| 100            | 2.106   | 2.784                | 2.44     | 3.10     | 63.7    |
| 125            | 2.294   | 2.773                | -2.53    | -2.16    | 35.9    |
| 160            | 1.791   | 3.026                | 3.04     | 4.62     | 66.8    |
| 200            | 2.549   | 2.594                | -1.20    | -0.57    | 43.1    |
| 250            | 2.872   | 2.538                | -5.32    | -3.12    | 22.7    |
| 315            | 1.971   | 2.852                | 1.12     | 1.97     | 56.4    |
| 400            | 1.947   | 2.440                | -2.15    | 1.48     | 37.9    |
| 500            | 1.899   | 2.338                | 0.61     | 1.83     | 53.5    |
| 630            | 2.220   | 2.387                | 0.53     | 2.03     | 53.1    |
| 800            | 2.271   | 2.398                | 0.50     | 2.11     | 52.8    |
| 1000           | 2.192   | 2.437                | 1.84     | 3.24     | 60.5    |
| 1250           | 2.218   | 2.419                | 0.37     | 1.33     | 52.2    |
| 1600           | 2.257   | 2.320                | 1.69     | 2.97     | 59.6    |
| 2000           | 2.162   | 2.238                | 3.51     | 4.62     | 69.2    |
| 2500           | 1.784   | 2.057                | 6.39     | 7.36     | 81.3    |
| 3150           | 1.582   | 1.874                | 4.64     | 5.52     | 74.4    |
| 4000           | 1.555   | 1.701                | 4.94     | 6.12     | 75.7    |
| 5000           | 1.327   | 1.463                | 3.82     | 5.13     | 70.7    |
| 6300           | 1.166   | 1.186                | 5.70     | 7.20     | 78.8    |
| 8000           | 0.816   | 0.934                | 5.70     | 7.81     | 78.8    |
| 10000          | 0.640   | 0.704                | 7.06     | 9.69     | 83.6    |

#### 4.2.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

- 50 Hz: Το EDT σε αυτή τη συχνότητα είναι 3,515 δευτερόλεπτα, ελαφρώς μικρότερο από την πρώτη μέτρηση. Αυτή η οριακή μείωση υποδηλώνει μια κάπως ταχύτερη ενεργειακή διάσπαση στο εύρος των χαμηλών συχνοτήτων, πιθανώς λόγω μικρών αποκλίσεων στα χαρακτηριστικά οριακής απορρόφησης (Kuttruff, 2016).
- 63 Hz: Στα 3,133 δευτερόλεπτα, το EDT παραμένει σχετικά συνεπές με την προηγούμενη μέτρηση, επιβεβαιώνοντας την ομοιόμορφη απόκριση χαμηλής συχνότητας της αίθουσας.

- 100 Hz έως 3150 Hz: Το EDT μειώνεται προοδευτικά, με μια αξιοσημείωτη βύθιση στα 500 Hz (1,899 δευτερόλεπτα), υποδεικνύοντας αποτελεσματική απορρόφηση σε αυτήν την κρίσιμη συχνότητα. Αυτή η τάση συνεχίζεται με αύξηση του EDT στα 1000 Hz (2,192 δευτερόλεπτα) και σταθεροποιείται γύρω στα 1,582 δευτερόλεπτα στα 3150 Hz, αντικατοπτρίζοντας τον σχεδιασμό της αίθουσας για διαχείριση της ενέργειας στις μεσαίες έως τις υψηλές συχνότητες (ISO 3382-1:2009).
- 4000 Hz έως 10000 Hz: Το EDT μειώνεται περαιτέρω, φτάνοντας στο ελάχιστο τα 0,640 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz. Αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματική απορρόφηση των υψηλών συχνοτήτων στην αίθουσα, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση της υπερβολικής αντήχησης στο υψηλότερο φάσμα.

#### 4.2.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>)

- 50 Hz: Το T<sub>opt</sub> είναι 4,090 δευτερόλεπτα, υποδηλώνοντας συνεχή αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες. Αυτός ο εκτεταμένος χρόνος αντήχησης συμβάλλει σε έναν πληρέστερο ήχο, αλλά μπορεί να απαιτήσει πρόσθετα μέτρα ελέγχου για ευκρίνεια (Beranek, 2004).
- 63 Hz έως 8000 Hz: Οι τιμές T<sub>opt</sub> ποικίλλουν, με σημαντικές διακυμάνσεις που αντικατοπτρίζουν την περίπλοκη αλληλεπίδραση του ήχου με τις επιφάνειες της αίθουσας. Για παράδειγμα, το T<sub>opt</sub> στα 63 Hz είναι 2,675 δευτερόλεπτα, ενώ στα 500 Hz είναι 2,338 δευτερόλεπτα. Αυτές οι τιμές υπογραμμίζουν τις ποικίλες απορροφητικές ικανότητες της αίθουσας.
- 10000 Hz: Το T<sub>opt</sub> στα 0,704 δευτερόλεπτα υπογραμμίζει την αποτελεσματική απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες, μειώνοντας τον χρόνο αντήχησης και βελτιώνοντας τη διαύγεια για ήχους υψηλής συχνότητας.

#### 4.2.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80)

##### C50

- 50 Hz: Η τιμή C50 είναι -3,47 dB, υποδεικνύοντας ότι η αργοπορημένη ενέργεια εξακολουθεί να κυριαρχεί σε χαμηλές συχνότητες, δυνητικά διακυβεύοντας τη διαύγεια (Bradley, 1995).
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές C50 βελτιώνονται με την αύξηση της συχνότητας, κορυφώνοντας στα 2000 Hz (3,51 dB). Αυτή η τάση υποδηλώνει ότι οι υψηλότερες συχνότητες επιτυγχάνουν καλύτερη διαύγεια λόγω της μειωμένης υπεροχής της όψιμης ενέργειας.
- 2500 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές C50 κορυφώνονται στα 2500 Hz (6,39 dB) και παραμένουν υψηλές, υποδεικνύοντας εξαιρετική ευκρίνεια για ήχους υψηλής συχνότητας, ευεργετικές για την ομιλία και λεπτομερή μουσικά περάσματα.

##### C80

- 50 Hz: Η τιμή C80 των -3,23 dB αντικατοπτρίζει την τάση που παρατηρείται στο C50, με μεγάλη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες.
- 63 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές C80 γενικά βελτιώνονται, με σημαντική ευκρίνεια για υψηλές συχνότητες, που κορυφώνονται στα 10000 Hz (9,69 dB).

#### 4.2.4 Δείκτης διακριτότητας (D50)

- 50 Hz: Μια τιμή D50 31,0% υποδηλώνει ότι ένα σημαντικό μέρος της ηχητικής ενέργειας καθυστερεί, επηρεάζοντας τη διαύγεια.
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές D50 αυξάνονται, με αξιοσημείωτη βελτίωση σε υψηλότερες συχνότητες. Η τιμή D50 στα 2500 Hz (81,3%) αντικατοπτρίζει εξαιρετική ευκρίνεια ομιλίας.

- 4000 Hz έως 10000 Hz: Οι υψηλές τιμές D50, που κορυφώνονται στα 10000 Hz (83,6%), υποδεικνύουν αποτελεσματική διατήρηση της ευκρίνειας και της σαφήνειας ομιλίας σε υψηλότερες συχνότητες.

#### 4.2.5 Ανάλυση και επιπτώσεις

Η δεύτερη μέτρηση παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας από το πίσω αριστερό τμήμα του χώρου των καθισμάτων.

- Διαχείριση χαμηλών συχνοτήτων: Οι εκτεταμένες τιμές EDT και T<sub>ort</sub> σε χαμηλές συχνότητες υποδηλώνουν την ανάγκη για βελτιωμένη απορρόφηση μπάσων για τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης και τη βελτίωση της ευκρίνειας (Everest & Pohlmann, 2015).
- Βελτίωση ευκρίνειας: Οι υψηλές τιμές C50 και C80 σε υψηλότερες συχνότητες υποδεικνύουν εξαιρετική ευκρίνεια, ιδιαίτερα ευεργετική για ομιλία και μουσικές παραστάσεις, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα σχεδιασμού της αίθουσας στον χειρισμό των ήχων υψηλής συχνότητας.
- Καταλληλότητα ομιλίας: Οι αυξημένες τιμές D50 σε όλο το εύρος μεσαίας έως υψηλής συχνότητας υπογραμμίζουν την καταλληλότητα της αίθουσας για δραστηριότητες που απαιτούν υψηλή ευκρίνεια ομιλίας, όπως διαλέξεις και παραστάσεις προφορικού λόγου.

Αυτά τα ευρήματα εμπλουτίζουν την κατανόησή μας για το ακουστικό περιβάλλον της αίθουσας από την πίσω αριστερή θέση, παρέχοντας μια λεπτομερή προοπτική για μελλοντικές ακουστικές βελτιώσεις και βελτιστοποιήσεις.

#### 4.3 Τρίτη μέτρηση (κέντρο)

Η τρίτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε με το μικρόφωνο τοποθετημένο κεντρικά μέσα στην αίθουσα, στο χώρο των καθισμάτων. Αυτή η τοποθέτηση είναι κρίσιμη για την απόκτηση μιας ολιστικής κατανόησης των ακουστικών ιδιοτήτων της αίθουσας, που αντιπροσωπεύει μια μέση θέση ακρόασης. Η ολοκληρωμένη ανάλυση του



πρώιμου χρόνου αντήχησης (EDT), του βέλτιστου χρόνου αντήχησης (T<sub>opt</sub>), των δεικτών ευκρίνειας (C50 και C80) και του δείκτη διακριτότητας (D50) σε αυτήν την τοποθεσία παρέχει πληροφορίες για την ακουστική πιστότητα που βιώνει ένας μέσος ακροατής.

**Πίνακας 3:** Αποτελέσματα τρίτης μέτρησης.

| Συχνότητα (Hz) | EDT (s) | T <sub>opt</sub> (s) | C50 (dB) | C80 (dB) | D50 (%) |
|----------------|---------|----------------------|----------|----------|---------|
| 50             | 3.562   | 4.174                | -3.48    | -3.25    | 31.0    |
| 63             | 3.116   | 2.681                | 3.50     | 3.89     | 69.1    |
| 80             | 2.556   | 3.098                | 2.94     | 4.75     | 66.3    |
| 100            | 2.104   | 2.741                | 2.33     | 3.00     | 63.1    |
| 125            | 2.273   | 2.727                | -2.50    | -2.11    | 36.0    |
| 160            | 1.863   | 3.120                | 2.94     | 4.49     | 66.3    |
| 200            | 2.570   | 2.585                | -1.16    | -0.66    | 43.3    |
| 250            | 2.942   | 2.518                | -4.89    | -3.26    | 24.5    |
| 315            | 1.985   | 2.823                | 1.46     | 2.12     | 58.3    |
| 400            | 2.085   | 2.523                | -4.74    | -0.07    | 25.1    |
| 500            | 1.861   | 2.394                | -0.12    | 1.01     | 49.3    |
| 630            | 2.148   | 2.281                | 0.61     | 1.95     | 53.5    |
| 800            | 2.292   | 2.375                | -0.09    | 1.09     | 49.5    |
| 1000           | 2.377   | 2.505                | 0.30     | 1.83     | 51.7    |
| 1250           | 2.250   | 2.447                | 0.44     | 1.28     | 52.5    |
| 1600           | 1.927   | 2.381                | 1.95     | 3.73     | 61.0    |
| 2000           | 2.130   | 2.267                | 4.32     | 5.19     | 73.0    |
| 2500           | 1.673   | 2.105                | 6.99     | 7.72     | 83.3    |
| 3150           | 1.586   | 1.886                | 5.77     | 6.61     | 79.1    |
| 4000           | 1.424   | 1.632                | 5.74     | 6.80     | 78.9    |
| 5000           | 1.334   | 1.408                | 4.01     | 5.42     | 71.6    |
| 6300           | 0.999   | 1.198                | 5.95     | 7.75     | 79.7    |
| 8000           | 0.732   | 0.944                | 7.55     | 9.25     | 85.0    |
| 10000          | 0.582   | 0.729                | 7.60     | 10.09    | 85.2    |

#### 4.3.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

- 50 Hz: Στα 3,562 δευτερόλεπτα, το EDT στα 50 Hz υποδηλώνει σημαντική παρουσία ενέργειας χαμηλής συχνότητας, πιθανώς λόγω της περιορισμένης απορρόφησης των χαμηλών συχνοτήτων στην αίθουσα (Kuttruff, 2016).

- 63 Hz: Το EDT είναι ελαφρώς χαμηλότερο στα 3,116 δευτερόλεπτα, υποδεικνύοντας μια πιο γρήγορη εξασθένηση σε σύγκριση με τα 50 Hz, αλλά εξακολουθεί να σημαίνει σημαντική αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες.
- 80 Hz έως 1000 Hz: Το EDT συνεχίζει να μειώνεται σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, με αξιοσημείωτες τιμές 2,556 δευτερολέπτων στα 80 Hz και 2,104 δευτερολέπτων στα 100 Hz, αντανakλώντας τη βελτιωμένη απορρόφηση στις χαμηλές έως τις μεσαίες συχνότητες.
- 125 Hz έως 500 Hz: Το EDT κυμαίνεται από 2,273 δευτερόλεπτα στα 125 Hz έως 1,861 δευτερόλεπτα στα 500 Hz, απεικονίζοντας την αποτελεσματική απορρόφηση της αίθουσας στις μέσες συχνότητες.
- 630 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές EDT σε αυτό το εύρος αποκαλύπτουν περαιτέρω πτώση, φτάνοντας τα 0,582 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz, ενδεικτικό της αποτελεσματικής απορρόφησης στις υψηλές συχνότητες.

#### 4.3.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>)

- 50 Hz: Το T<sub>opt</sub> στα 4,174 δευτερόλεπτα υπογραμμίζει την εκτεταμένη αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες, απαιτώντας ενισχυμένο έλεγχο των χαμηλών συχνοτήτων (Beranek, 2004).
- 63 Hz έως 4000 Hz: Οι τιμές T<sub>opt</sub> ποικίλλουν, δείχνοντας μια γενική μείωση με τη συχνότητα. Για παράδειγμα, τα 2,681 δευτερόλεπτα στα 63 Hz και τα 2,375 δευτερόλεπτα στα 800 Hz αντικατοπτρίζουν τη σχεδίαση της αίθουσας για αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας στις μεσαίες έως υψηλές συχνότητες.
- 5000 Hz έως 10000 Hz: Οι χαμηλότερες τιμές T<sub>opt</sub>, όπως 0,729 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz, υποδεικνύουν επιτυχή απορρόφηση στις υψηλές συχνότητες, μειώνοντας τον υπερβολικό χρόνο αντήχησης και βελτιώνοντας τη διαύγεια.

#### 4.3.3 Δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80)

##### C50

- 50 Hz: Η τιμή C50 των -3,48 dB υποδηλώνει πρόωμη ενεργειακή άνοδο στις χαμηλές συχνότητες, με πιθανή διακύβευση της διαύγειας (Bradley, 1995).
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές C50 βελτιώνονται με την αύξηση της συχνότητας, φτάνοντας τα 4,32 dB στα 2000 Hz, υποδηλώνοντας βελτιωμένη ευκρίνεια λόγω μειωμένης υπεροχής όψιμης ενέργειας.
- 2500 Hz έως 10000 Hz: Οι υψηλές τιμές C50, όπως 6,99 dB στα 2500 Hz, υπογραμμίζουν την εξαιρετική ευκρίνεια για ήχους υψηλής συχνότητας, ευεργετικές τόσο για την ομιλία όσο και για τη μουσική.

##### C80

- 50 Hz: Η τιμή C80 των -3,25 dB υποδηλώνει παρόμοια τάση με την C50, με όψιμη ενεργειακή άνοδο στις χαμηλές συχνότητες.
- 63 Hz έως 10000 Hz: Αυξάνοντας τις τιμές C80, που κορυφώνονται στα 10,09 dB στα 10000 Hz, υποδηλώνουν βελτιωμένη ευκρίνεια σε υψηλότερες συχνότητες, ζωτικής σημασίας για την ευκρίνεια και τη μουσική λεπτομέρεια.

#### 4.3.4 Δείκτης διακριτότητας (D50)

- 50 Hz: Μια τιμή D50 31,0% υποδηλώνει σημαντική καθυστερημένη ενέργεια, επηρεάζοντας τη σαφήνεια ομιλίας στις χαμηλές συχνότητες.
- 63 Hz έως 2000 Hz: Οι τιμές D50 αυξάνονται με τη συχνότητα, υποδεικνύοντας καλύτερη ευκρίνεια ομιλίας, με αξιοσημείωτη βελτίωση στα 2000 Hz (73,0%).
- 2500 Hz έως 10000 Hz: Οι υψηλές τιμές D50, όπως 85,2% στα 10000 Hz, επιδεικνύουν εξαιρετική ευκρίνεια ομιλίας, αντικατοπτρίζοντας αποτελεσματική διαχείριση της ηχητικής ενέργειας σε υψηλότερες συχνότητες.

#### 4.3.5 Ανάλυση και επιπτώσεις

Η τρίτη μέτρηση παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των κεντρικών ακουστικών ιδιοτήτων της αίθουσας.

- Διαχείριση χαμηλών συχνοτήτων: Οι εκτεταμένες τιμές EDT και T<sub>opt</sub> σε χαμηλές συχνότητες υποδηλώνουν την ανάγκη για ενισχυμένη απορρόφηση των μπάσων για τον έλεγχο του χρόνου αντήχησης και τη βελτίωση της ευκρίνειας (Everest & Pohlmann, 2015).
- Βελτίωση ευκρίνειας: Οι υψηλές τιμές C50 και C80 σε υψηλότερες συχνότητες υποδηλώνουν εξαιρετική ευκρίνεια, ιδιαίτερα ευεργετική τόσο για ομιλία όσο και για μουσικές παραστάσεις.
- Καταληπτότητα ομιλίας: Οι αυξημένες τιμές D50 σε όλο το εύρος των μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων υπογραμμίζουν την καταλληλότητα της αίθουσας για δραστηριότητες που απαιτούν υψηλή ευκρίνεια ομιλίας, όπως διαλέξεις και παραστάσεις προφορικού λόγου.

Αυτά τα ευρήματα εμπλουτίζουν την κατανόησή μας για το ακουστικό περιβάλλον της αίθουσας από την κεντρική θέση, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για πιθανές ακουστικές βελτιώσεις και βελτιστοποιήσεις.

#### 4.4 Τέταρτη μέτρηση (σκηνή)

Η τέταρτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε με το μικρόφωνο τοποθετημένο κοντά στο χώρο της σκηνής της αίθουσας. Αυτή η τοποθέτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αντικατοπτρίζει το ακουστικό περιβάλλον που βιώνουν οι ερμηνευτές και τα κοντινά μέλη του κοινού. Η λεπτομερής ανάλυση του Early Decay Time (EDT), του Optimal Reverberation Time (T<sub>opt</sub>), του Clarity Index (C50 και C80) και του Definition (D50) για αυτή τη θέση παρέχει ολοκληρωμένες πληροφορίες για την ακουστική της αίθουσας από την οπτική γωνία ενός καλλιτέχνη.

**Πίνακας 4:** Αποτελέσματα τέταρτης μέτρησης.

| Frequency (Hz) | EDT (s) | Topt (s) | C50 (dB) | C80 (dB) | D50 (%) |
|----------------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 50             | 3.608   | 4.175    | -3.52    | -3.30    | 30.8    |
| 63             | 3.160   | 2.774    | 3.48     | 3.88     | 69.0    |
| 80             | 2.584   | 3.448    | 3.03     | 4.88     | 66.8    |
| 100            | 2.123   | 2.810    | 2.53     | 3.17     | 64.2    |
| 125            | 2.290   | 2.826    | -2.70    | -2.30    | 35.0    |
| 160            | 1.820   | 3.012    | 2.92     | 4.38     | 66.2    |
| 200            | 2.628   | 2.568    | -1.29    | -0.56    | 42.6    |
| 250            | 2.893   | 2.591    | -5.79    | -3.14    | 20.9    |
| 315            | 2.089   | 2.676    | 1.05     | 1.80     | 56.0    |
| 400            | 1.908   | 2.494    | -1.79    | 1.78     | 39.8    |
| 500            | 2.029   | 2.363    | 1.11     | 2.15     | 56.3    |
| 630            | 2.048   | 2.404    | 0.37     | 1.63     | 52.1    |
| 800            | 2.486   | 2.411    | -1.71    | -0.16    | 40.3    |
| 1000           | 2.629   | 2.510    | -0.83    | 1.04     | 45.2    |
| 1250           | 2.160   | 2.455    | 0.98     | 1.70     | 55.6    |
| 1600           | 1.968   | 2.386    | 2.35     | 3.62     | 63.2    |
| 2000           | 2.133   | 2.229    | 3.35     | 4.22     | 68.4    |
| 2500           | 1.824   | 2.092    | 6.01     | 6.90     | 80.0    |
| 3150           | 1.526   | 1.878    | 4.66     | 5.57     | 74.5    |
| 4000           | 1.587   | 1.720    | 4.58     | 5.92     | 74.2    |
| 5000           | 1.355   | 1.446    | 4.01     | 5.41     | 71.6    |
| 6300           | 1.053   | 1.211    | 6.38     | 8.00     | 81.3    |
| 8000           | 0.769   | 0.946    | 7.14     | 9.10     | 83.8    |
| 10000          | 0.601   | 0.699    | 7.45     | 10.01    | 84.7    |

#### 4.4.1 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

- 50 Hz: Το EDT στα 50 Hz είναι 3.608 δευτερόλεπτα, υποδηλώνοντας μια σημαντική παρουσία ενέργειας χαμηλής συχνότητας, πιθανότατα λόγω των οριακών συνθηκών της σκηνής που ενισχύουν τις ανακλάσεις χαμηλής συχνότητας (Kuttruff, 2016).
- 63 Hz: Στα 3,160 δευτερόλεπτα, το EDT μειώνεται ελαφρώς αλλά εξακολουθεί να δείχνει σημαντική αντήχηση χαμηλής συχνότητας.
- 80 Hz έως 1000 Hz: Το EDT συνεχίζει να μειώνεται σε αυτό το εύρος συχνοτήτων, με τιμές όπως 2,584 δευτερόλεπτα στα 80 Hz και 2,123

δευτερόλεπτα στα 100 Hz, υποδεικνύοντας καλύτερη απορρόφηση χαμηλής έως μεσαίας συχνότητας.

- 125 Hz έως 500 Hz: Το EDT κυμαίνεται από 2.290 δευτερόλεπτα στα 125 Hz έως 2.029 δευτερόλεπτα στα 500 Hz, δείχνοντας αποτελεσματική απορρόφηση μεσαίας συχνότητας.
- 630 Hz έως 10000 Hz: Οι τιμές EDT σε αυτό το εύρος μειώνονται περαιτέρω, φτάνοντας τα 0,601 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz, υποδεικνύοντας αποτελεσματική απορρόφηση υψηλής συχνότητας (Everest & Pohlmann, 2015).

#### 4.4.2 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης (T<sub>opt</sub>)

- 50 Hz: Το T<sub>opt</sub> στα 4,175 δευτερόλεπτα υπογραμμίζει την παρατεταμένη αντήχηση χαμηλής συχνότητας, υποδηλώνοντας την ανάγκη για ενισχυμένο έλεγχο χαμηλής συχνότητας (Beranek, 2004).
- 63 Hz έως 4000 Hz: Οι τιμές T<sub>opt</sub> γενικά μειώνονται με τη συχνότητα, εμφανίζοντας τιμές όπως 2,774 δευτερόλεπτα στα 63 Hz και 2,411 δευτερόλεπτα στα 800 Hz, αντανakλώντας την ικανότητα της αίθουσας να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ενέργεια μεσαίας έως υψηλής συχνότητας.
- 5000 Hz έως 10000 Hz: Οι χαμηλότερες τιμές T<sub>opt</sub>, όπως 0,699 δευτερόλεπτα στα 10000 Hz, υποδεικνύουν επιτυχή απορρόφηση υψηλής συχνότητας, μειώνοντας τον υπερβολικό χρόνο αντήχησης και βελτιώνοντας τη διαύγεια.

#### 4.5 Αξιολόγηση χρόνου αντήχησης, καταληπτότητας ομιλίας και μετάδοσης ήχου

Οι βέλτιστες τιμές για τις ακουστικές παραμέτρους όπως ο RT60, ο EDT, οι C50 και C80, καθώς και οι D50 και D80 εξαρτώνται από τον επιδιωκόμενο σκοπό του δωματίου. Επειδή αυτοί οι παράγοντες ποικίλλουν ανάλογα με το αν το δωμάτιο χρησιμοποιείται για ομιλία, μουσική ή άλλους ακουστικούς σκοπούς, παρακάτω παρουσιάζονται σε ένα γενικότερο πλαίσιο βέλτιστα εύρη για καθεμία από αυτές τις παραμέτρους:

- RT60: 1.0–1.8 sec
- EDT: 1.2–1.8 sec
- C50: +5 έως +8 dB
- C80: 0 έως +4 dB
- D50: 30 - 70%
- D80: 40 – 60%

### **Χρόνος αντήχησης (RT60)**

Τα παρεχόμενα δεδομένα προσφέρουν μια ολοκληρωμένη συχνοτική ανάλυση του RT60 σε διάφορες θέσεις μέτρησης εντός της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.

### **Χαμηλές συχνότητες (50 Hz - 200 Hz)**

Στα 50 Hz, οι τιμές του RT60 σε όλες τις μετρήσεις είναι περίπου 3,5 έως 3,6 δευτερόλεπτα. Αυτές οι παρατεταμένες τιμές RT60 υποδεικνύουν σημαντική διατήρηση ενέργειας χαμηλής συχνότητας, η οποία είναι τυπική σε μεγάλους χώρους λόγω των συντονισμών και της ανεπαρκούς απορρόφησης χαμηλής συχνότητας (Kuttruff, 2016).

Οι συχνότητες των 63 Hz και 80 Hz εμφανίζουν παρόμοια τάση, με τις τιμές RT60 να κυμαίνονται μεταξύ 2,5 και 3,5 δευτερολέπτων, ανακλώντας την επίμονη αντήχηση στις χαμηλές συχνότητες.

### **Μεσαίες συχνότητες (250 Hz - 1000 Hz)**

Μεγέθη 2 έως 3 δευτερολέπτων ως χρόνος αντήχησης, ακόμη και σε άδεια αίθουσα, υποδηλώνουν ακουστική για εκκλησιαστική μουσική (σε εντελώς μικρό όγκο), δηλαδή μια αίθουσα όγκου  $1000\text{m}^3$  είναι εντελώς ακατάλληλη για πολλαπλές χρήσεις και η οποία θα πρέπει να υποστεί εκτεταμένες και σημαντικές επεμβάσεις.

Η συχνότητα των 500 Hz, κρίσιμη για την ευκρίνεια της ομιλίας, εμφανίζει τιμές RT60 μεταξύ 1,7 και 2,0 δευτερολέπτων, υποδεικνύοντας σχετικά ελεγχόμενη αντήχηση που ευνοεί την καθαρή ομιλία (ISO 3382-1:2009).

### **Υψηλές συχνότητες (1250 Hz - 10000 Hz)**

Οι τιμές RT60 στις υψηλές συχνότητες δείχνουν σημαντική μείωση, με μετρήσεις μεταξύ 0,5 και 2,5 δευτερολέπτων. Αυτές οι χαμηλότερες τιμές RT60 είναι ενδεικτικές της αποτελεσματικής απορρόφησης στις υψηλές συχνότητες, η οποία ενισχύει την ευκρίνεια της ομιλίας και μειώνει τη σκληρότητα στο ακουστικό περιβάλλον (Everest & Pohlmann, 2015).

Ιδιαίτερα στα 10000 Hz, το RT60 πέφτει σε περίπου 0,5 έως 0,7 δευτερόλεπτα, αντικατοπτρίζοντας εξαιρετική εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων.

Συνολικά, η ανάλυση του χρόνου αντήχησης υπογραμμίζει την αποτελεσματική διαχείριση της αντήχησης των μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων στην αίθουσα, ενώ προτείνει πιθανές βελτιώσεις στην απορρόφηση των χαμηλών συχνοτήτων για την επίτευξη βέλτιστης ακουστικής ισορροπίας.

### **Καταληπτότητα ομιλίας**

Η ευκρίνεια της ομιλίας σε ένα ακουστικό περιβάλλον επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τους δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80) και τον δείκτη διακριτότητας (D50). Αυτές οι παράμετροι ποσοτικοποιούν την αναλογία της πρώιμης προς την καθυστερημένη ηχητική ενέργεια, με υψηλότερες τιμές που υποδεικνύουν καλύτερη ευκρίνεια.

### **Δείκτης ευκρίνειας C50**

Σε χαμηλές συχνότητες (50 Hz), οι τιμές C50 είναι αρνητικές (-3,5 έως -3,3 dB), υποδεικνύοντας όψιμη ενεργειακή ενίσχυση που επηρεάζει αρνητικά τη σαφήνεια της ομιλίας.



Οι μεσαίες συχνότητες (500 Hz έως 1000 Hz) δείχνουν τιμές C50 μεταξύ 0,6 και 2,4 dB, υποδηλώνοντας ισορροπημένες πρώιμες ανακλάσεις που ευνοούν την καθαρή ομιλία.

Οι υψηλές συχνότητες (2000 Hz και άνω) παρουσιάζουν σημαντικά θετικές τιμές C50, έως και 7,45 dB, υποδεικνύοντας εξαιρετική διαύγεια λόγω της πρώιμης ενίσχυσης της ενέργειας (Bradley, 1995).

### **Δείκτης ευκρίνειας C80**

Παρόμοιες τάσεις παρατηρούνται στις τιμές C80, με τις χαμηλές συχνότητες να παρουσιάζουν αρνητικές τιμές και τις υψηλές συχνότητες να φτάνουν έως και τα 10,74 dB, ενισχύοντας τα ευρήματα από την ανάλυση του C50.

### **Δείκτης διακριτότητας (D50)**

Το ποσοστό του D50 σε χαμηλές συχνότητες (50 Hz) είναι περίπου 30%, ανακλώντας κακή ευκρίνεια και ενεργειακή ενίσχυση.

Οι τιμές του D50 στις μεσαίες συχνότητες βελτιώνονται σημαντικά, κυμαινόμενες από 50% έως 60%, ενδεικτικά ισορροπημένων πρώιμων ανακλάσεων που είναι απαραίτητες για την ευκρίνεια.

Οι τιμές του D50 στις υψηλές συχνότητες είναι εξαιρετικές, φθάνοντας έως και το 86,8%, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματική διαχείριση ήχου στις υψηλές συχνότητες της αίθουσας, ζωτικής σημασίας για την καθαρή μετάδοση της ομιλίας (ISO 3382-1:2009).

Συνολικά, η ανάλυση των δεικτών ευκρίνειας και του δείκτη διακριτότητας αποκαλύπτει ότι, ενώ η ευκρίνεια ομιλίας στις χαμηλές συχνότητες μπορεί να διακυβεύεται, τα εύρη των μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων παρουσιάζουν εξαιρετική ευκρίνεια, κατάλληλα τόσο για ομιλία όσο και για μουσικές παραστάσεις.

## **Μετάδοση ήχου**

Η μετάδοση του ήχου μέσα σε μια αίθουσα, ιδιαίτερα όσον αφορά την ενίσχυση του ήχου και τη φυσική ακουστική, εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ άμεσου ήχου και πεδίου αντήχησης, καθώς και από τη θέση των ηχείων και των μικροφώνων.

Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τις τρέχουσες ακουστικές δυνατότητες της αίθουσας και τις περιοχές προς βελτίωση, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη βάση για μελλοντικές ακουστικές βελτιώσεις προσαρμοσμένες στην πολυλειτουργική της χρήση (Everest & Pohlmann, 2015; ISO 3382-1:2009).

Γενικότερα, θα πρέπει να αναφερθεί πως στην περίπτωση των χαμηλών και μεσαίων συχνοτήτων η αίθουσα είναι ακατάλληλη για παρουσίαση λόγου και μουσικής, καθώς οι τιμές των χρόνων αντήχησης, των πρώιμων χρόνων αντήχησης και των δεικτών ευκρίνειας και διακριτότητας είναι ιδιαίτερα αυξημένες, σε σχέση με αυτές των υψηλότερων συχνοτήτων. Η κατάσταση αυτή έχει ως βάση το γεγονός πως το ύψος της αίθουσας δεν είναι μεγάλο, ενώ οι άλλες δυο διαστάσεις του είναι αρκετά μεγαλύτερες. Επίσης, κατά την παρουσία κοινού στην αίθουσα τα ακουστικά δεδομένα για συχνότητες άνω των 4000Hz θα είναι σχεδόν αδιάφορα.

### **4.6 Εκτίμηση των τιμών στόχου για τον χρόνο αντήχησης, σε περίπτωση λόγου και μουσικής**

Ο χρόνος αντήχησης (RT60) είναι μια κύρια παράμετρος για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση ακουστικών περιβαλλόντων, ιδιαίτερα σε πολυλειτουργικούς χώρους όπως η αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας. Η βελτιστοποίηση του RT60 διασφαλίζει ότι οι χώροι μπορούν να εξυπηρετήσουν διάφορους σκοπούς, όπως ομιλίες και μουσικές παραστάσεις, με υψηλή ακουστική ποιότητα. Αυτή η ενότητα παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση των τιμών στόχου για το χρόνο αντήχησης σε συνθήκες ομιλίας και μουσικής, εστιάζοντας στους δείκτες ευκρίνειας C50 και C80, αντίστοιχα.

## **Αντήχηση και διαύγεια για λόγο (C50)**

Το C50, ή ο δείκτης ευκρίνειας για την ομιλία, είναι μια κρίσιμη παράμετρος για τη διασφάλιση της ευκρίνειας της ομιλίας σε έναν δεδομένο χώρο. Ορίζεται ως ο λόγος της πρώιμης ηχητικής ενέργειας (που φτάνει μέσα στα πρώτα 50 χιλιοστά του δευτερολέπτου) προς την όψιμη ηχητική ενέργεια (που φτάνει μετά από 50 χιλιοστά του δευτερολέπτου). Οι υψηλές τιμές C50 υποδηλώνουν κυριαρχία των πρώιμων ανακλάσεων, οι οποίες είναι απαραίτητες για καθαρή και κατανοητή ομιλία.

Οι βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για περιβάλλοντα που εστιάζουν στην ομιλία, όπως αίθουσες διδασκαλίας, αίθουσες διαλέξεων και αίθουσες συνεδριάσεων, κυμαίνονται συνήθως από 0,5 έως 1,0 δευτερόλεπτο. Αυτό το εύρος βασίζεται στην ανάγκη να εξισορροπηθεί επαρκής αντήχηση για να αποφευχθεί ένα «νεκρό» ακουστικό περιβάλλον, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την υπερβολική αντήχηση που μπορεί να προκαλέσει την ομιλία να γίνει θολή και δυσνόητη (Bradley, 2009). Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) παρέχει κατευθυντήριες γραμμές, συγκεκριμένα το ISO 3382-1:2009, το οποίο προτείνει ότι οι τιμές C50 θα πρέπει να υπερβαίνουν τα +3 dB για βέλτιστη ευκρίνεια ομιλίας (ISO, 2009).

Στο πλαίσιο της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, τα δεδομένα χρόνου αντήχησης από τις τέσσερις θέσεις μέτρησης υποδεικνύουν διαφορετικά επίπεδα ευκρίνειας ομιλίας σε όλη την αίθουσα. Για παράδειγμα:

- Θέση 1 (πίσω δεξιά): Στα 500 Hz, το C50 μετρήθηκε στα 0,98 dB.
- Θέση 2 (πίσω αριστερά): Στα 500 Hz, το C50 ήταν 0,61 dB.
- Θέση 3 (κέντρο): Στα 500 Hz, το C50 ήταν -0,12 dB.
- Θέση 4 (σκηνή): Στα 500 Hz, το C50 ήταν 1,11 dB.

Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ότι ορισμένες περιοχές της αίθουσας μπορεί να μην πληρούν τα βέλτιστα κριτήρια για την ευκρίνεια της ομιλίας, ιδιαίτερα η κεντρική θέση, η οποία δείχνει μια αρνητική τιμή C50 που υποδηλώνει αύξηση των καθυστερημένων ανακλάσεων. Για τη βελτίωση αυτών των συνθηκών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ακουστικές επεξεργασίες όπως η προσθήκη ηχοαπορροφητικών υλικών (π.χ. ακουστικά πάνελ, χαλιά και απορροφητικά οροφής). Αυτά τα υλικά

μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση των καθυστερημένων ανακλάσεων και στην αύξηση του ποσοστού των πρώιμων ανακλάσεων, ενισχύοντας έτσι τις τιμές C50 και τη συνολική ευαισθησία της ομιλίας.

### Αντήχηση και διαύγεια για μουσική (C80)

Το C80, ή ο δείκτης ευκρίνειας για τη μουσική, λειτουργεί παρόμοια με το C50, αλλά χρησιμοποιεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα 80 χιλιοστών του δευτερολέπτου για να καλύψει τις διαφορετικές ακουστικές ανάγκες των μουσικών παραστάσεων. Ενώ η ευκρίνεια της ομιλίας επωφελείται από την υψηλή αναλογία πρώιμης προς όψιμη ηχητική ενέργεια, οι μουσικές εκτελέσεις απαιτούν μια ισορροπία μεταξύ καθαρότητας και αντήχησης για να δημιουργήσουν μια πλούσια και συναρπαστική εμπειρία ήχου.

Οι βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για τη μουσική ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της μουσικής και τον συγκεκριμένο χώρο εκτέλεσης. Γενικά, οι αίθουσες συναυλιών στοχεύουν σε τιμές RT60 μεταξύ 1,5 και 2,5 δευτερολέπτων, με βέλτιστη τιμή περίπου 2,0 δευτερόλεπτα για ένα ευρύ φάσμα μουσικών ειδών και για αίθουσες πάνω από 3000m<sup>3</sup> (Beranek, 2004). Υψηλότερες τιμές C80, συνήθως πάνω από +5 dB, είναι επιθυμητές για να διασφαλιστεί ότι η μουσική απόδοση είναι καθαρή και καλά καθορισμένη χωρίς να είναι υπερβολικά στεγνή.

Τα δεδομένα μετρήσεων για την Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας παρέχουν μια εικόνα για την καταλληλότητα της αίθουσας για μουσικές παραστάσεις:

- Θέση 1 (πίσω δεξιά): Στα 1000 Hz, το C80 μετρήθηκε στα 2,79 dB.
- Θέση 2 (πίσω αριστερά): Στα 1000 Hz, το C80 ήταν 3,24 dB.
- Θέση 3 (κέντρο): Στα 1000 Hz, το C80 ήταν 1,83 dB.
- Θέση 4 (στάδιο): Στα 1000 Hz, το C80 ήταν 1,04 dB.

Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ότι η αίθουσα έχει διάφορους βαθμούς μουσικής ευκρίνειας, με ορισμένες θέσεις (π.χ. πίσω αριστερά) να παρέχουν σχετικά υψηλές τιμές C80, ενώ άλλες (π.χ. κέντρο και σκηνή) πέφτουν κάτω από το βέλτιστο όριο. Για τη βελτίωση της μουσικής ακουστικής της αίθουσας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στρατηγικές όπως η εγκατάσταση ρυθμιζόμενων ακουστικών πάνελ και διαχυτών. Αυτές οι βελτιώσεις μπορούν να βοηθήσουν στην προσαρμογή των ακουστικών ιδιοτήτων του χώρου σε διαφορετικούς τύπους παραστάσεων, επιτρέποντας ένα πιο ευέλικτο και ακουστικά ευχάριστο περιβάλλον.

### Προτεινόμενες τιμές RT60

Με βάση την ανάλυση των δεδομένων μέτρησης και τις καθιερωμένες ακουστικές κατευθυντήριες γραμμές, προτείνονται οι ακόλουθες τιμές για το χρόνο αντήχησης για την αίθουσα στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας:

- Ευκρίνεια ομιλίας (C50): Στόχευση σε τιμές C50 πάνω από +3 dB, με RT60 περίπου 0,75 δευτερόλεπτα ( $0,075 * \sqrt[3]{V}$ ) (Μπάρκας, 2024). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής ηχοαπορροφητικών υλικών σε τοίχους, οροφές και δάπεδα, καθώς και με τη χρήση ακουστικών πάνελ για τον έλεγχο των ανακλάσεων.
- Ευκρίνεια μουσικής (C80): Στόχευση σε τιμές C80 πάνω από +5 dB, με RT60 περίπου 0,9 δευτερόλεπτα ( $0,09 * \sqrt[3]{V}$ ) (Μπάρκας, 2024). Η εφαρμογή ρυθμιζόμενων ακουστικών βελτιώσεων, όπως κινητά πάνελ και διαχυτές, μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ενός ευέλικτου χώρου που μπορεί να βελτιστοποιηθεί για διαφορετικά μουσικά είδη.

#### 4.7 Αναλυτικός υπολογισμός του χρόνου αντήχησης κατά Sabine

Για την πρόβλεψη ρεαλιστικών τιμών RT60 για την αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας όταν είναι γεμάτη ή μισογεμάτη με κόσμο, πρέπει να επανεξεταστεί η προσέγγιση, διασφαλίζοντας ότι αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την ακουστική του πραγματικού χώρου. Τα βήματα περιλαμβάνουν τον επανυπολογισμό της απορρόφησης χρησιμοποιώντας πιο ρεαλιστικούς συντελεστές και την επαλήθευση των υπολογισμών (Μπάρκας, 2024).

### Προδιαγραφές αίθουσας

Όγκος: 993,93m<sup>3</sup>

Σύνολο θέσεων: 170

Μισή χωρητικότητα: 85 άτομα

### Αναθεωρημένοι συντελεστές απορρόφησης

Για πιο ρεαλιστικές προβλέψεις, οι συντελεστές απορρόφησης θα πρέπει να αντικατοπτρίζουν τυπικές τιμές τόσο για τις επιφάνειες του δωματίου όσο και για τους ανθρώπους. Οι συχνοτικές τιμές στόχου ανά συχνότητα κατά τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης είναι οι εξής:

**Πίνακας 5:** Ιδανικός χρόνος αντήχησης ανά συχνότητα για πλήρη πληρότητα της αίθουσας.

| Συχνότητα (Hz)                  | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Ιδανικός χρόνος αντήχησης (sec) | 0,93 | 0,80 | 0,75 | 0,72 | 0,69 | 0,67 |

Ο μέσος ιδανικός χρόνος αντήχησης ανέρχεται στα 0,75sec.

Ακολουθούν τα προτεινόμενα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης για πλήρη πληρότητα της αίθουσας ανά συχνότητα:

**Πίνακας 6:** Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για πλήρη πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση.

|                                       |                |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Εμβαδά επιμετρήσεων (m <sup>2</sup> ) | 504            |       |       |       |       |       |       |
| Όγκος (m <sup>3</sup> )               | 993,93672      |       |       |       |       |       |       |
| Συχνότητα (Hz)                        |                | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  |
| RT <sub>60</sub> (sec)                |                | 1,149 | 1,634 | 1,727 | 1,655 | 1,525 | 1,392 |
|                                       | Άνω όριο +5%   | 0,97  | 0,84  | 0,78  | 0,76  | 0,73  | 0,71  |
|                                       | Πρόταση        | 1,15  | 1,63  | 1,73  | 1,65  | 1,52  | 1,39  |
|                                       | Κάτω όριο - 5% | 0,88  | 0,76  | 0,71  | 0,69  | 0,66  | 0,64  |

Το κοινό συμβάλλει σημαντικά στην απορρόφηση στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες (0,80 στα 500 Hz και 0,94 στα 1000 Hz). Με έκταση 42,1 m<sup>2</sup>, το κοινό είναι ένας σημαντικός απορροφητής, ιδιαίτερα αποτελεσματικός στο εύρος υψηλότερων συχνοτήτων.

Τα υφασμάτινα καθίσματα έχουν υψηλούς συντελεστές απορρόφησης σε όλες τις συχνότητες, ιδιαίτερα στις μεσαίες συχνότητες (0,80 στα 500 Hz και 0,88 στα 1000 Hz). Η επιφάνεια των 25,7 m<sup>2</sup> εξασφαλίζει αξιοσημείωτη συμβολή στη συνολική απορρόφηση, ιδιαίτερα στο εύρος συχνοτήτων ομιλίας.

Η πλατφόρμα της σκηνής έχει μέτρια απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες (0,40 στα 125 Hz) αλλά χαμηλότερη σε υψηλότερες συχνότητες (0,10 στα 4000 Hz). Με μεγάλη επιφάνεια 82,3 m<sup>2</sup>, συμβάλλει στην απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων, αλλά λιγότερο σε υψηλότερες συχνότητες.

Τα γυάλινα παράθυρα έχουν χαμηλούς συντελεστές απορρόφησης, ειδικά στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες (0,04 στα 500 Hz και 0,02 στα 4000 Hz). Δεδομένης της μικρής έκτασής τους (3,72 m<sup>2</sup>), η συνολική τους επίδραση στην ακουστική είναι ελάχιστη. Η παρουσία γυάλινων παραθύρων στην αίθουσα είναι μεγάλη, παρόλα

αυτά το μεγαλύτερο ποσοστό τους είναι καλυμμένο πλήρως με κουρτίνες και σκίαστρα και λόγω αυτού δεν υπολογίστηκαν ως εκτεθειμένες γυάλινες επιφάνειες.

Ο κενός χώρος θεωρείται ότι έχει σταθερό συντελεστή απορρόφησης 0,30 σε όλες τις συχνότητες. Με επιφάνεια 13,9 m<sup>2</sup>, παρέχει σταθερή αλλά περιορισμένη απορρόφηση σε όλο το φάσμα.

Το κολλητό ξύλο έχει χαμηλούς συντελεστές απορρόφησης σε όλες τις συχνότητες (0,04 στα 125 Hz και 0,07 στα 4000 Hz). Παρά τη μεγάλη έκτασή του (99,5 m<sup>2</sup>), η συνολική συνεισφορά του στην απορρόφηση είναι χαμηλή.

Η ανακλαστική οροφή έχει χαμηλή απορρόφηση, ιδιαίτερα σε υψηλότερες συχνότητες (0,05 στα 500 Hz και 0,09 στα 4000 Hz). Με πολύ μεγάλη επιφάνεια (236,7 m<sup>2</sup>), συμβάλλει στις ανακλάσεις και όχι στην απορρόφηση, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένη αντήχηση.

Η ατμόσφαιρα έχει ποικίλους συντελεστές απορρόφησης, αυξάνοντας σημαντικά σε υψηλότερες συχνότητες (0,90 στα 2000 Hz και 2,40 στα 4000 Hz). Ο όγκος της αίθουσας (993,9 m<sup>3</sup>) παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική ακουστική συμπεριφορά, ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες.

Στην περίπτωση που η αίθουσα διαθέτει τη μισή πληρότητα, δηλαδή 85 άτομα τότε οι ιδανικοί χρόνοι αντήχησης ανά συχνότητα δεν διαφέρουν από αυτούς του πίνακα 5.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών της αίθουσας ανά συχνότητα με την αίθουσα κατά το ήμισυ γεμάτη.



**Πίνακας 7:** Αποτελέσματα απορρόφησης επιφανειών με μισή πληρότητα της αίθουσας.

| Υλικό / Εμβαδόν            | Συχνότητα (Hz)      | 125   | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|----------------------------|---------------------|-------|------|------|------|------|------|
| <b>Θεατές</b>              | Μεταβλητό           | 0,39  | 0,57 | 0,80 | 0,94 | 0,92 | 0,87 |
| <b>21,0</b>                |                     | 10,3  | 13,9 | 16,8 | 18,5 | 17,3 | 14,7 |
| <b>Καθίσματα</b>           | Μεταβλητό           | 0,49  | 0,66 | 0,80 | 0,88 | 0,82 | 0,70 |
| <b>12,9</b>                | Υφασμάτινα          | 5,0   | 7,3  | 10,3 | 12,1 | 11,8 | 11,2 |
| <b>Βάθρο εξέδρας</b>       | Σταθερό             | 0,40  | 0,30 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,10 |
| <b>82,3</b>                | Ξύλινο σε δοκίδες   | 32,9  | 24,7 | 16,5 | 14,0 | 12,4 | 8,2  |
| <b>Κρύσταλλα</b>           | Σταθερό             | 0,18  | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| <b>3,72</b>                | Υαλοπίνακες         | 0,7   | 0,2  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  |
| <b>Κενό</b>                | Μεταβλητό           | 0,30  | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| <b>13,9</b>                |                     | 4,2   | 4,2  | 4,2  | 4,2  | 4,2  | 4,2  |
| <b>Ξύλο κολλητό</b>        | Σταθερό             | 0,04  | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| <b>133,4</b>               |                     | 5,3   | 5,3  | 9,3  | 8,0  | 8,0  | 9,3  |
| <b>Ανακλώμενη ψ/ο</b>      | Σταθερό             | 0,29  | 0,10 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,09 |
| <b>236,7</b>               | Συμπαγής γυψοσανίδα | 68,6  | 23,7 | 11,8 | 9,5  | 16,6 | 21,3 |
| <b>Ατμόσφαιρα</b>          | Σταθερό             | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,30 | 0,90 | 2,40 |
| <b>9,9393672</b>           | Ελεύθερος όγκος     | 0,0   | 0,0  | 0,0  | 3,0  | 8,9  | 23,9 |
| <b>Συνολική απορρόφηση</b> |                     | 127,1 | 79,3 | 69,1 | 69,3 | 79,2 | 92,9 |

Ακολουθούν τα προτεινόμενα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης για μισή πληρότητα της αίθουσας ανά συχνότητα:

**Πίνακας 8:** Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για μισή πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση.

|                                       |                |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Εμβαδά επιμετρήσεων (m <sup>2</sup> ) | 504            |       |       |       |       |       |       |
| Όγκος (m <sup>3</sup> )               | 993,93672      |       |       |       |       |       |       |
| Συχνότητα (Hz)                        |                | 125   | 250   | 500   | 1000  | 2000  | 4000  |
| RT <sub>60</sub> (sec)                |                | 1,275 | 2,043 | 2,345 | 2,337 | 2,046 | 1,744 |
|                                       | Άνω όριο +5%   | 0,97  | 0,84  | 0,78  | 0,76  | 0,73  | 0,71  |
|                                       | Πρόταση        | 1,27  | 2,04  | 2,35  | 2,34  | 2,05  | 1,74  |
|                                       | Κάτω όριο - 5% | 0,88  | 0,76  | 0,71  | 0,69  | 0,66  | 0,64  |

Το κοινό συμβάλλει σημαντικά στην απορρόφηση μεσαίας και υψηλής συχνότητας, ιδιαίτερα αποτελεσματική στα 1000 Hz (0,94) και 2000 Hz (0,92).

Τα υφασμάτινα καθίσματα παρέχουν υψηλή απορρόφηση σε όλες τις συχνότητες, με αξιοσημείωτη συμβολή στα 500 Hz (0,80) και 1000 Hz (0,88).

Η πλατφόρμα της σκηνής έχει μέτρια απορρόφηση σε χαμηλές συχνότητες, με μικρότερη αποτελεσματικότητα στις υψηλότερες συχνότητες.

Τα γυάλινα παράθυρα έχουν ελάχιστη απορρόφηση σε όλες τις συχνότητες, συμβάλλοντας ελάχιστα στη συνολική απορρόφηση.

Ο κενός χώρος παρέχει σταθερή, αν και περιορισμένη, απορρόφηση σε όλο το φάσμα.

Παρά τη μεγάλη του επιφάνεια, το κολλημένο ξύλο προσφέρει χαμηλή απορρόφηση, συμβάλλοντας περισσότερο στις μεσαίες συχνότητες (0,07 στα 500 Hz και 4000 Hz).

Η ανακλαστική οροφή έχει χαμηλή απορρόφηση, ιδιαίτερα σε υψηλότερες συχνότητες, με αποτέλεσμα αυξημένη αντήχηση.

Η ατμόσφαιρα αυξάνεται σημαντικά σε υψηλότερες συχνότητες (0,90 στα 2000 Hz και 2,40 στα 4000 Hz) και παίζει καθοριστικό ρόλο στη συνολική ακουστική συμπεριφορά, ειδικά σε υψηλότερες συχνότητες.

## **5. Η υφιστάμενη κατάσταση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας και προτάσεις βελτιστοποίησής της**

### **5.1 Εξέταση της ακουστικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων**

Η εξέταση της ακουστικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων που πραγματοποιούνται στην αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας είναι κρίσιμη για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του κοινού και του ακουστικού περιβάλλοντος. Αυτή η ενότητα αναλύει τον τρόπο με τον οποίο διάφορες ακουστικές παράμετροι και φυσικές διαμορφώσεις της αίθουσας επηρεάζουν την ακουστική εμπειρία των παρευρισκομένων, με έμφαση στην ευκρίνεια της ομιλίας, τη σαφήνεια του ήχου και τη συνολική ακουστική άνεση.

#### **5.1.1 Το ακουστικό περιβάλλον και η επίδρασή του στην ακουστική συμπεριφορά**

Το ακουστικό περιβάλλον της αίθουσας, που διαμορφώνεται από τις φυσικές της διαστάσεις και τις εσωτερικές ακουστικές επεξεργασίες, επηρεάζει σημαντικά την ακουστική συμπεριφορά. Βασικές παράμετροι όπως ο πρώτος χρόνος αντήχησης (EDT), ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης ( $T_{opt}$ ), οι δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80) και ο δείκτης διακριτότητας (D50) μετρήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις εντός της αίθουσας για να καταγράψουν ένα ολοκληρωμένο ακουστικό προφίλ (Kuttruff, 2016).

Οι μετρήσεις υπογραμμίζουν τις διακυμάνσεις στις ακουστικές παραμέτρους σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός της αίθουσας, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν την εμπειρία ακρόασης του κοινού κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων.

Το EDT παρέχει μια ένδειξη για το πόσο γρήγορα διασπάται η ηχητική ενέργεια στα αρχικά στάδια της αντήχησης. Οι μικρότερες τιμές EDT συνδέονται γενικά με καθαρότερο και πιο κατανοητό ήχο. Στην αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, οι τιμές EDT ποικίλλουν σημαντικά σε διαφορετικές συχνότητες και θέσεις, επηρεάζοντας την αντίληψη τόσο του λόγου όσο και της μουσικής. Για παράδειγμα, υψηλότερες τιμές EDT σε χαμηλές συχνότητες μπορεί να έχουν ως

αποτέλεσμα ένα εφέ έκρηξης, μειώνοντας την καταληπτότητα της ομιλίας (ISO 3382-1:2009).

Ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης είναι ζωτικής σημασίας για την εξισορρόπηση της καθαρότητας και της ζεστασίας στο ακουστικό περιβάλλον. Η αίθουσα παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα τιμών  $T_{opt}$ , με μεγαλύτερους χρόνους αντήχησης σε χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό μπορεί να προκαλέσει παρατεταμένες ηχητικές ανακλάσεις, οδηγώντας σε πιθανά προβλήματα με θόλωμα και έλλειψη ευκρίνειας, ιδιαίτερα στην ομιλία. Αντίθετα, οι μικρότεροι χρόνοι αντήχησης σε υψηλότερες συχνότητες ενισχύουν την καταληπτότητα της ομιλίας και τη μουσική άρθρωση (Beranek, 2004).

Οι δείκτες ευκρίνειας είναι κρίσιμοι για τον προσδιορισμό του σχετικού επιπέδου της πρώιμης έως καθυστερημένης ηχητικής ενέργειας. Οι υψηλότερες τιμές C50 και C80 αντιστοιχούν σε καλύτερη ευκρίνεια ομιλίας και συνολική ευκρίνεια ήχου. Στην αίθουσα, αυτοί οι δείκτες ποικίλλουν, με ορισμένες θέσεις να εμφανίζουν αρνητικές τιμές σε χαμηλότερες συχνότητες, υποδεικνύοντας την κυριαρχία των καθυστερημένων ανακλάσεων και τα πιθανά προβλήματα στη διατήρηση της καταληπτότητας της ομιλίας (Everest & Pohlmann, 2015).

Ο δείκτης διακριτότητας ποσοτικοποιεί την αναλογία της πρώιμης προς τη συνολική ηχητική ενέργεια, παρέχοντας μια εικόνα για την καταληπτότητα της ομιλίας. Οι υψηλότερες τιμές D50 υποδηλώνουν μεγαλύτερη ευκρίνεια ομιλίας. Οι τιμές D50 της αίθουσας παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση, με υψηλότερες τιμές στις μεσαίες έως υψηλές συχνότητες, υποδηλώνοντας καλή ευκρίνεια σε αυτές τις περιοχές. Ωστόσο, χαμηλότερες τιμές σε χαμηλές συχνότητες υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω ακουστική επεξεργασία για τη βελτίωση της διαύγειας (Kuttruff, 2016).

Η φυσική διάταξη της αίθουσας, συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων των καθισμάτων και των ηχείων, παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της ακουστικής εμπειρίας.

Η αίθουσα διαθέτει ευέλικτα καθίσματα που μπορούν να διαμορφωθούν για διαφορετικούς τύπους εκδηλώσεων. Οι σταθερές κερκίδες στη μία πλευρά παρέχουν κλιμακωτό κάθισμα, το οποίο βοηθά στη βελτίωση της οπτικής γωνίας και στη διασφάλιση μιας καθαρής οπτικής γωνίας προς τη σκηνή. Η απόσταση από την πηγή

του ήχου και η θέση σε σχέση με τις ανακλαστικές επιφάνειες επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτός ο ήχος από το κοινό (Beranek, 2004).

Δύο κύρια ηχεία είναι τοποθετημένα στη σκηνή για να καλύψουν την μπροστινή περιοχή του καθίσματος. Αυτά τα ηχεία είναι ζωτικής σημασίας για την παροχή καθαρού και κατανοητού ήχου στο κοινό που κάθεται κοντά στη σκηνή.

Τρία επιπλέον ηχεία είναι τοποθετημένα στους τοίχους για να εξασφαλίσουν ομοιόμορφη κατανομή του ήχου σε όλη την αίθουσα. Αυτή η διάταξη βοηθά στην κάλυψη περιοχών που διαφορετικά μπορεί να παρουσιάσουν εξασθένηση του ήχου ή ανομοιόμορφη κατανομή.

Αυτές οι τοποθετήσεις ηχείων έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν την ηχητική κάλυψη και να διατηρούν σταθερή ακουστική ποιότητα σε διαφορετικούς χώρους καθισμάτων (Everest & Pohlmann, 2015).

Η ανάλυση δείχνει ότι οι χρόνοι αντήχησης χαμηλής συχνότητας είναι υπερβολικά υψηλοί, οδηγώντας σε πιθανή θολότητα και μειωμένη ευκρίνεια της ομιλίας. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εγκατάσταση πρόσθετων απορροφητών χαμηλής συχνότητας, όπως μπασοπαγίδες, για τη διαχείριση των ανακλάσεων χαμηλής συχνότητας και τη βελτίωση της ευκρίνειας (Kuttruff, 2016).

Οι μετρήσεις μεσαίας έως υψηλής συχνότητας δείχνουν καλύτερη ευκρίνεια και διακριτικότητα, με υψηλότερες τιμές C50, C80 και D50. Ωστόσο, μπορούν να επιτευχθούν περαιτέρω βελτιώσεις με την τοποθέτηση απορροφητικών και διαχυτικών στοιχείων για τη διαχείριση των ανακλάσεων και τη βελτίωση της κατανομής του ήχου (ISO 3382-1:2009).

Η εφαρμογή ρυθμιζόμενων ακουστικών πάνελ μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον συντονισμό του ακουστικού περιβάλλοντος της αίθουσας για διαφορετικούς τύπους εκδηλώσεων. Αυτά τα πάνελ μπορούν να επανατοποθετηθούν ή να προσαρμοστούν για να βελτιστοποιήσουν τις ακουστικές ιδιότητες για συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως διαλέξεις, μουσικές παραστάσεις ή θεατρικές παραγωγές (Everest & Pohlmann, 2015).

Η συλλογή σχολίων από το κοινό κατά τη διάρκεια διαφόρων εκδηλώσεων μπορεί να προσφέρει γνώσεις σχετικά με την αντιληπτή ακουστική ποιότητα και τις περιοχές προς βελτίωση. Αυτή η ανατροφοδότηση μπορεί να παρέχει περαιτέρω

προσαρμογές και βελτιώσεις στις ακουστικές μελέτες και διαμορφώσεις εντός της αίθουσας (Beranek, 2004).

Το υπάρχον ακουστικό περιβάλλον της αίθουσας στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας παρουσιάζει μια σύνθετη αλληλεπίδραση παραγόντων που επηρεάζουν την ακουστική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων. Η ανάλυση του χρόνου αντήχησης, της ευκρίνειας ομιλίας και της μετάδοσης του ήχου υπογραμμίζει τομείς ισχύος και ευκαιρίες για βελτίωση. Αντιμετωπίζοντας προβλήματα χαμηλής συχνότητας, βελτιστοποιώντας την απόδοση μέσης έως υψηλής συχνότητας και ενσωματώνοντας ρυθμιζόμενα ακουστικά στοιχεία, η αίθουσα μπορεί να επιτύχει ένα πιο ισορροπημένο και αποτελεσματικό ακουστικό περιβάλλον, ενισχύοντας τη συνολική ακουστική εμπειρία για το ποικίλο φάσμα των γεγονότων της (Kuttruff, 2016, Everest & Pohlmann, 2015, ISO 3382-1:2009).

## **5.2 Επισκόπηση πιθανών λύσεων βελτιστοποίησης ακουστικής της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων και εφαρμογή ηχοαπορροφητικών υλικών, ακουστικών επεξεργασιών και συστημάτων ενίσχυσης ήχου**

### **5.2.1 Στρατηγικές ακουστικής βελτιστοποίησης**

Η ακουστική βελτιστοποίηση περιλαμβάνει μια πολύπλευρη προσέγγιση που συνδυάζει αρχιτεκτονικές τροποποιήσεις, εφαρμογές υλικών και προηγμένη τεχνολογία ήχου. Κάθε στρατηγική αντιμετωπίζει συγκεκριμένες ακουστικές παραμέτρους όπως ο χρόνος αντήχησης (RT60), η ευκρίνεια (C50, C80), η διακριτικότητα (D50) και ο πρώτος χρόνος αντήχησης (EDT).

### **5.2.2 Ηχοαπορροφητικά υλικά**

Τα ηχοαπορροφητικά υλικά παίζουν κρίσιμο ρόλο στη μείωση των ανεπιθύμητων ανακλάσεων και στον έλεγχο της αντήχησης. Η επιλογή και η εφαρμογή αυτών των υλικών βασίζεται στους συντελεστές απορρόφησής τους και στα συγκεκριμένα ακουστικά προβλήματα που εντοπίζονται στην αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας.

### **Πάνελ από υαλοβάμβακα**

- **Ιδιότητες:** Τα πάνελ από υαλοβάμβακα είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στην απορρόφηση μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων, με συντελεστές απορρόφησης που συνήθως κυμαίνονται από 0,7 έως 0,9 σε αυτές τις ζώνες (Beranek, 2004).
- **Εφαρμογή:** Τα πάνελ πρέπει να τοποθετούνται στα πλευρικά τοιχώματα και τις περιοχές της οροφής όπου οι μετρήσεις έδειξαν υπερβολική αντήχηση, όπως στην πίσω αριστερή και δεξιά γωνία όπου οι τιμές RT60 ήταν ιδιαίτερα υψηλές.

### **Ακουστικός αφρός**

- **Ιδιότητες:** Ο ακουστικός αφρός είναι ευπροσάρμοστος, με καλή απορρόφηση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στον έλεγχο των άμεσων ανακλάσεων και των flutter echoes (Everest & Pohlmann, 2015).
- **Εφαρμογή:** Εφαρμογή αφρού σε τοίχους δίπλα στη σκηνή και στα πρώτα σημεία ανάκλασης που εντοπίστηκαν κατά τις μετρήσεις. Αυτό θα βοηθήσει στη μείωση των πρώιμων ανακλάσεων και στη βελτίωση της καταληπτότητας της ομιλίας. Απαραίτητη θεωρείται η πυράντοχη επεξεργασία του υλικού, εφόσον πρόκειται για κλειστή αίθουσα, μιας και θεωρείται επικίνδυνο σε περιστάσεις πυρκαγιάς.

### **Διάτρητες γυψοσανίδες**

- **Ιδιότητες:** Αυτές οι γυψοσανίδες συνδυάζουν την απορρόφηση και τη διάχυση, καθιστώντας τις κατάλληλες για την εξισορρόπηση του ακουστικού περιβάλλοντος χωρίς να το κάνουν υπερβολικά νεκρό (Kuttruff, 2016).
- **Εφαρμογή:** Εγκατάσταση στον πίσω τοίχο και στην οροφή για τη διαχείριση των ανακλάσεων από το πίσω μέρος της αίθουσας. Η εφαρμογή τους είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ενός πιο διάχυτου ηχητικού πεδίου, το οποίο ενισχύει τη διαύγεια και την ομοιομορφία.

## Βαριές κουρτίνες

- Ιδιότητες: Τα βαριά υφασμάτινα υλικά είναι αποτελεσματικά στην απορρόφηση χαμηλών έως μεσαίων συχνοτήτων και είναι ρυθμιζόμενα για να ικανοποιούν διαφορετικές ακουστικές απαιτήσεις (Long, 2006).
- Εφαρμογή: Κρέμασμα κουρτινών με ύφασμα επιφάνειας βάρους από 300 έως 500gr/m<sup>2</sup> και πτυχώσεις από 2 έως 2,5 φορές το πλάτος του κουφώματος, κατά μήκος των πλαϊνών και πίσω τοιχωμάτων, ειδικά σε περιοχές όπου οι τιμές RT60 είναι υψηλότερες σε χαμηλές συχνότητες. Αυτά μπορούν να σχεδιαστούν ή να ανοίξουν ανάλογα με τον τύπο του συμβάντος για την τελειοποίηση του ακουστικού περιβάλλοντος. Η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί τον πιο οικονομικό και εύκολο, αλλά αισθητικά βαρετό τρόπο αποτελεσματικής μείωσης της αντήχησης για περιστάσεις λόγου, καθότι, γενικότερα, στις αίθουσες πολλαπλών χρήσεων χρησιμοποιούνται, κυρίως, περιστρεφόμενα πετάσματα διαφορετικής απορρόφησης ή / και μείωση του συνολικού τους όγκου.

## Διαχυτές

- Ιδιότητες: Οι διαχυτές διασκορπίζουν τα ηχητικά κύματα, μειώνοντας τα στάσιμα κύματα και το σχηματισμό ηχούς, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική διαύγεια (Bradley, 2004).
- Εφαρμογή: Τοποθέτηση στους πίσω τοίχους και στις ψηλές οροφές για τη διάσπαση των ανακλάσεων της μεγάλης διαδρομής. Αυτή η επεξεργασία είναι ζωτικής σημασίας σε τομείς όπου οι μετρήσεις ευκρίνειας (C50) και διακριτότητας (D50) δεν είναι βέλτιστες.

## Μπασοπαγίδες

- Ιδιότητες: Σχεδιασμένες για να απορροφούν ενέργεια χαμηλής συχνότητας, οι μπασοπαγίδες βοηθούν στον μετριασμό της συσσώρευσης μπάσων, η οποία μπορεί να προκαλέσει θόλωση στον ήχο (Everest & Pohlmann, 2015).



- Εφαρμογή: Εγκατάσταση στις γωνίες της αίθουσας, ιδιαίτερα όπου οι χρόνοι αντήχησης χαμηλής συχνότητας υπερβαίνουν τα επιθυμητά επίπεδα (π.χ. 4,175 δευτερόλεπτα στα 50 Hz). Αυτό θα βοηθήσει στην επίτευξη ενός πιο ισορροπημένου προφίλ ήχου.

### **Πάνελ οροφής**

- Ιδιότητες: Κρεμαστά πάνελ που απορροφούν ηχητική ενέργεια από πάνω, αποτρέποντας τις υπερβολικές ανακλάσεις από την οροφή (Kuttruff, 2016).
- Εφαρμογή: Κρέμασμα πάνω από το κύριο χώρο και τη σκηνή για τη μείωση των ανακλάσεων της οροφής. Αυτή η βελτίωση είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο της συνολικής αντήχησης και τη βελτίωση της ευκρίνειας της ομιλίας. Πρέπει να αναφερθεί πως η αίθουσα έχει περιορισμένο ύψος, σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις και τον όγκο της, όσον αφορά την καταλληλότητα για ζωντανή μουσική.

### **Κινητά πάνελ**

- Ιδιότητες: Ευέλικτα πάνελ που μπορούν να τοποθετηθούν όπως απαιτείται για να τροποποιήσουν δυναμικά το ακουστικό περιβάλλον (Long, 2006).
- Εφαρμογή: Τοποθέτηση στην αίθουσα για την προσαρμογή της ακουστικής με βάση το συμβάν. Για παράδειγμα, τα πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα πιο απορροφητικό περιβάλλον για εκδηλώσεις προφορικού λόγου και ένα πιο ανακλαστικό περιβάλλον για μουσικές παραστάσεις.

#### **5.2.3 Συστήματα ενίσχυσης ήχου**

Τα προηγμένα συστήματα ενίσχυσης του ήχου είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της ομοιόμορφης κατανομής του ήχου και της υψηλής ποιότητας αναπαραγωγής ήχου σε όλη την αίθουσα. Τα ακόλουθα στοιχεία είναι κρίσιμα για την αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας:

## Τοποθέτηση ηχείου

- Στρατηγική τοποθέτηση: Η τοποθέτηση των ηχείων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ομοιόμορφης ηχητικής κάλυψης. Με βάση τη διάταξη και τα δεδομένα μέτρησης της αίθουσας, τα ηχεία θα πρέπει να τοποθετούνται στη σκηνή και κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων για να παρέχουν ομοιόμορφη κατανομή του ήχου (Bradley, 2004).
- Συστήματα Line Array: Χρήση ηχείων Line Array για την ελαχιστοποίηση της πτώσης του ήχου και τη διατήρηση της διαύγειας στην αίθουσα. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν κατευθυνόμενα ηχητικά πεδία, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στα συγκεκριμένα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας.

## Συστήματα μικροφώνων

- Κατευθυντικά μικρόφωνα: Χρήση κατευθυντικών μικροφώνων για την καταγραφή ήχου από συγκεκριμένες πηγές, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον θόρυβο του περιβάλλοντος (Kuttruff, 2016).
- Ασύρματα μικρόφωνα: Εφαρμογή ασύρματων συστημάτων για την παροχή ευελιξίας στα ηχεία και τους καλλιτέχνες. Τα πολλαπλά κανάλια διασφαλίζουν ότι διάφορα ηχεία μπορούν να φιλοξενηθούν χωρίς παρεμβολές.

## Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (DSP)

- Ακουστικές βελτιώσεις: Οι μονάδες DSP μπορούν να βελτιστοποιήσουν τον ήχο μέσω εξισορρόπησης, καταστολής ανάδρασης και ελέγχου δυναμικού εύρους, προσαρμοσμένες στο ακουστικό προφίλ της αίθουσας (Everest & Pohlmann, 2015).
- Adaptive Systems: Εφαρμογή συστημάτων DSP που προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές στο ακουστικό περιβάλλον, διασφαλίζοντας σταθερή ποιότητα ήχου ανεξάρτητα από το συμβάν.

Η εφαρμογή αυτών των λύσεων απαιτεί μια συστηματική προσέγγιση, διασφαλίζοντας ότι κάθε στοιχείο λειτουργεί συνεργικά για τη βελτίωση της ακουστικής της αίθουσας.

Η βελτιστοποίηση της ακουστικής της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας περιλαμβάνει τη στρατηγική εφαρμογή ηχοαπορροφητικών υλικών, ακουστικών βελτιώσεων και προηγμένων συστημάτων ενίσχυσης ήχου. Αντιμετωπίζοντας συγκεκριμένα ακουστικά προβλήματα που εντοπίζονται μέσω λεπτομερών μετρήσεων, αυτές οι λύσεις στοχεύουν στη βελτίωση της ευκρίνειας της ομιλίας, στη βελτίωση της ποιότητας του ήχου και στη δημιουργία ενός ευέλικτου ακουστικού περιβάλλοντος κατάλληλου για ένα ευρύ φάσμα εκδηλώσεων. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση διασφαλίζει ότι η αίθουσα ανταποκρίνεται στις ποικίλες ανάγκες εκπαιδευτικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων, παρέχοντας μια βέλτιστη ακουστική εμπειρία για όλους τους συμμετέχοντες.

### **5.3 Διερεύνηση της ακουστικής της αίθουσας: αναλυτικός υπολογισμός και προτεινόμενες βελτιώσεις**

Η ακουστική μιας αίθουσας παίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ποιότητας του ήχου και της ευκρίνειας της ομιλίας. Αυτή η ενότητα εξετάζει τα χαρακτηριστικά αντήχησης της αίθουσας στην Πειραματική Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, εστιάζοντας στην πρόβλεψη και την ενίσχυση του χρόνου αντήχησης (RT60). Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Sabine, επιτυγχάνεται η ανάλυση της τρέχουσας ακουστικής απόδοσης και η πρόταση συγκεκριμένων βελτιώσεων για τη βελτιστοποίηση τόσο της αντήχησης όσο και της ευκρίνειας.

#### **Τρέχοντα ακουστικά χαρακτηριστικά**

##### **1. Διαστάσεις και αρχικές συνθήκες**

Όγκος (V): 993,93 κυβικά μέτρα

Συνολικές θέσεις: 170 (συν πρόσθετες κερκίδες, η συνολική χωρητικότητα θέσεων είναι μεγαλύτερη)

Χρόνος αντήχησης (RT60) χωρίς άτομα: Προέρχεται από αρχικές μετρήσεις στις συχνότητες (Hz).

## 2. Χρόνος αντήχησης (RT60)

Οι αρχικές τιμές RT60 χωρίς κοινό είναι οι εξής:

**Πίνακας 9:** Αρχικές τιμές RT60 της αίθουσας χωρίς κοινό.

| Συχνότητα (Hz) | RT60 (seconds) |
|----------------|----------------|
| 63             | 3.611          |
| 125            | 2.888          |
| 250            | 2.527          |
| 500            | 2.354          |
| 1000           | 2.483          |
| 2000           | 2.279          |
| 4000           | 1.684          |
| 8000           | 0.975          |

Κατά την σύγκριση των πινάκων 8 και 9 παρατηρείται πως στον δεύτερο πίνακα οι τιμές αντήχησης, ιδιαίτερα στις πιο χαμηλές συχνότητες είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές του πίνακα 8, στον οποίο η πληρότητα της αίθουσας είναι στο 50%. Οι τιμές του πίνακα 9 δεν συμπεριλαμβάνουν το κοινό, οπότε η γενικότερη απορρόφηση της αίθουσας είναι αισθητά πολύ μικρότερη και για αυτό οι χρόνοι αντήχησης αποκλίνουν αρκετά από αυτές του πίνακα 8. Από τη συχνότητα των 1000Hz και πέρα οι χρόνοι αντήχησης ελαττώνονται και παρατηρείται μια σύγκλιση με τις τιμές του πίνακα 8.

## 3. Προτεινόμενες ακουστικές βελτιώσεις

Με βάση την ανάλυση των χρόνων αντήχησης και των επιθυμητών στόχων για το ιδανικό RT<sub>60</sub> του πίνακα 6 της ενότητας 4.7, προτείνονται οι ακόλουθες ακουστικές βελτιώσεις:

- Πάνελ απορρόφησης της εταιρείας GIK Acoustics 244 Bass Trap με τεχνολογία FlexRange και διαστάσεις 60cm x 120cm x 10cm. Οι συντελεστές απορρόφησης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (NRC = 1,05):

**Πίνακας 10:** Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα για το απορροφητικό πάνελ GIK Acoustics 244 Bass Trap.

| Συχνότητα | Συντελεστής απορρόφησης |
|-----------|-------------------------|
| 125       | 0,50                    |
| 250       | 0,89                    |
| 500       | 1,19                    |
| 1000      | 1,24                    |
| 2000      | 1,21                    |
| 4000      | 1,17                    |

Η ποσότητα των πάνελ ανέρχεται σε 40 τεμάχια και η τοποθέτησή τους θα είναι η εξής: από 10 πάνελ σε κάθε πλευρικό τοίχωμα (5 πάνελ σε κάθε πλευρά κοντά στο μπροστινό και το πίσω μέρος) και 10 πάνελ στον πίσω τοίχο. Επιπρόσθετα, 10 πάνελ, στρατηγικά τοποθετημένα για να καλύπτουν σημεία ανάκλασης, στην οροφή της αίθουσας.



**Εικόνα 12:** Πάνελ απορρόφησης της εταιρείας GIK Acoustics 244 Bass Trap με τεχνολογία FlexRange.

- Διαχυτές της εταιρείας RPG Skyline Diffusor με διαστάσεις 60cm x 60cm x 10cm. Ο συντελεστής διάχυσης διαθέτει ενεργό εύρος από 400 Hz έως 5000 Hz.

Η ποσότητα των διαχυτών ανέρχεται στα 20 τεμάχια και η τοποθέτηση τους θα είναι η εξής: 10 διαχυτές στο πίσω τοίχωμα και 10 διαχυτές στην οροφή της αίθουσας, τοποθετημένοι σε μοτίβο για να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη διάχυση.



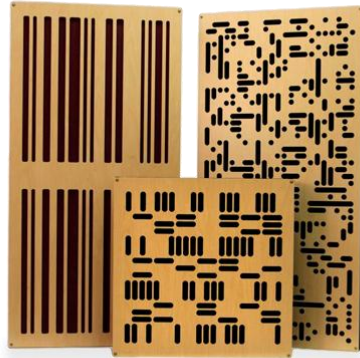
**Εικόνα 13:** Διαχυτής της εταιρείας RPG Skyline Diffusor.

- Διάτρητα ακουστικά πάνελ 4A Alpha Pro Series Panel Diffusor / Absorber (150mm) της εταιρείας GIK Acoustics με διαστάσεις 60cm x 120cm ορθογωνίου σχήματος. Οι συντελεστές απορρόφησης παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 11:** Συντελεστές απορρόφησης ανά συχνότητα για τα διάτρητα ακουστικά πάνελ 4A Alpha Pro Series Panel Diffusor / Absorber (150mm).

| Συχνότητα | Συντελεστής απορρόφησης |
|-----------|-------------------------|
| 125       | 0,31                    |
| 250       | 0,82                    |
| 500       | 1,03                    |
| 1000      | 0,97                    |
| 2000      | 0,95                    |
| 4000      | 0,98                    |

Η ποσότητα των πάνελ ανέρχεται στα 20 τεμάχια και η τοποθέτησή τους θα είναι στους πλαϊνούς τοίχους της αίθουσας.



**Εικόνα 14:** Διάτρητα ακουστικά πάνελ 4A Alpha Pro Series Panel Diffusor / Absorber (100mm) της εταιρείας GIK Acoustics.

Πρόσθετες ακουστικές βελτιώσεις προβλέπουν την χρήση μοκέτας ή ενός υψηλής ποιότητας πυκνού χαλιού για την κάλυψη της επιφάνειας του δαπέδου, καθώς επίσης και βαριές κουρτίνες κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων για πρόσθετη απορρόφηση. Όσον αφορά τα καθίσματα και άλλα καθίσματα του χώρου θα πρέπει να έχουν κατάλληλα υφασμάτινα καλύμματα για να βοηθήσουν στην απορρόφηση.

**Πίνακας 12:** Σύνοψη των συντελεστών απορρόφησης κάθε υλικού ανά συχνότητα.

| Υλικό  | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1000Hz | 2000Hz | 4000Hz |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| <b>Κοινό</b>   | 0,39  | 0,57  | 0,80  | 0,94   | 0,92   | 0,87   |
| <b>Υφασμάτινα<br/>καθίσματα</b>  | 0,49  | 0,66  | 0,80  | 0,88   | 0,82   | 0,70   |
| <b>Βάθρο σκηνής</b>  | 0,40  | 0,30  | 0,20  | 0,17   | 0,15   | 0,10   |
| <b>Γυάλινα<br/>παράθυρα</b>  | 0,18  | 0,06  | 0,04  | 0,03   | 0,02   | 0,02   |
| <b>Κενός χώρος</b>   | 0,30  | 0,30  | 0,30  | 0,30   | 0,30   | 0,30   |
| <b>Ξύλο κολλητό</b>  | 0,04  | 0,04  | 0,07  | 0,06   | 0,06   | 0,07   |
| <b>Οροφή</b>   | 0,29  | 0,10  | 0,05  | 0,04   | 0,07   | 0,09   |
| <b>GIK<br/>Acoustics 244<br/>Panels</b>  | 0,50  | 0,89  | 1,19  | 1,24   | 1,21   | 1,17   |
| <b>RPG Skyline<br/>Diffusors</b>   | 0,40  | 0,60  | 0,80  | 1,00   | 1,20   | 1,40   |
| <b>GIK Acoustics<br/>4A Alpha Pro<br/>Series Panel<br/>Diffusor /<br/>Absorber<br/>(100mm)</b> | 0,31  | 0,82  | 1,03  | 0,97   | 0,95   | 0,98   |

Στην περίπτωση που η αίθουσα δεν είναι πλήρως γεμάτη με κοινό τότε ορισμένα από τα απορροφητικά υλικά μπορούν να μετακινηθούν ώστε να καλύψουν μεγαλύτερη έκταση και να προσφέρουν μεγαλύτερη συνολική απορρόφηση. Παραδείγματος χάρη, σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι βαριές κουρτίνες που δύναται να τοποθετηθούν σε παράθυρα και πόρτες καθώς και να καλύψουν μέρος των πλευρικών τοίχων, καθώς και του πίσω τοίχου.

Ακολούθως, παρατίθεται ο πίνακας 13 με τους χρόνους αντήχησης που υπολογίστηκαν βάσει του τύπου του Sabine και προτάσεις νέων χρόνων αντήχησης.



**Πίνακας 13:** Αποτελέσματα χρόνου αντήχησης για μισή πληρότητα της αίθουσας και προτάσεις χρόνου αντήχησης για την ακουστική της βελτίωση.

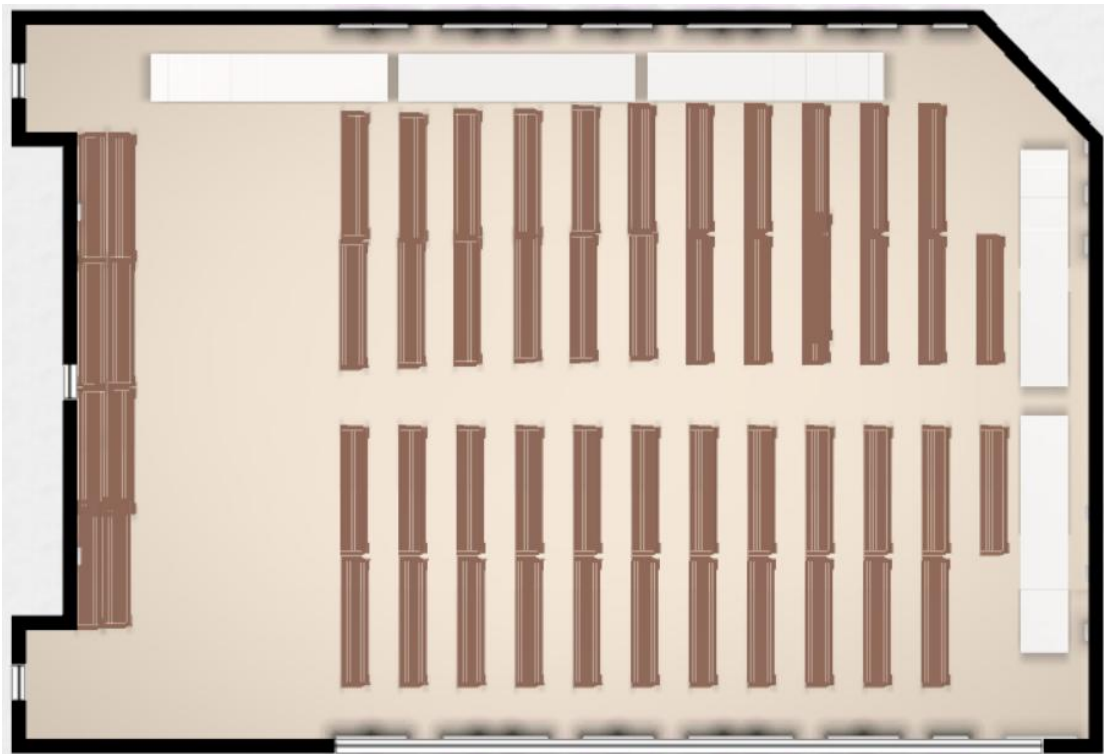
|                                       |               |                               |                               |                      |                      |                      |                              |
|---------------------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| Εμβαδά επιμετρήσεων (m <sup>2</sup> ) | 504           |                               |                               |                      |                      |                      |                              |
| Όγκος (m <sup>3</sup> )               | 993,9367<br>2 |                               |                               |                      |                      |                      |                              |
| Συνολική απορρόφηση (Sabine)          |               | 129,1                         | 80,9                          | 70,3                 | 70,0                 | 79,9                 | 93,7                         |
| Συχνότητα (Hz)                        |               | 125                           | 250                           | 500                  | 1000                 | 2000                 | 4000                         |
| RT60 (sec)                            | 0,161xV/<br>A | 1,107                         | 1,462                         | 1,468                | 1,435                | 1,313                | 1,179                        |
| Άνω όριο +5%                          |               | (0,75x1,05x<br>1,24)<br>=0,97 | (0,75x1,05x<br>1,07)<br>=0,84 | (0,75x1,05)<br>=0,78 | (0,78x0,97)<br>=0,76 | (0,78x0,93)<br>=0,73 | 0,75x1,05x<br>0,9)<br>=0,71  |
| Πρόταση                               | 0,161xV/<br>A | 1,11                          | 1,46                          | 1,47                 | 1,44                 | 1,31                 | 1,18                         |
| Κάτω όριο -5%                         |               | (0,75x1,24x<br>0,95)<br>=0,88 | (0,75x1,07x<br>0,95)<br>=0,76 | (0,75x0,95)<br>=0,71 | (0,71x0,97)<br>=0,69 | (0,71x0,93)<br>=0,66 | (0,75x0,9x<br>0,95)<br>=0,64 |

Οι υπολογισμοί των άνω και κάτω ορίων του χρόνου αντήχησης παρουσιάζονται μέσα στον πίνακα 13. Για τα 125, 250, 500 και 4000Hz έχει χρησιμοποιηθεί εντός του υπολογισμού ο ιδανικός χρόνος αντήχησης, δηλαδή 0,75sec, ενώ για τα 1000 και 2000Hz έχει χρησιμοποιηθεί ο χρόνος αντήχησης των 500Hz. Οι αριθμοί που παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα είναι αυτοί που προέκυψαν κάθε φορά από την προηγούμενη στήλη και χρησιμοποιούνται στις επόμενες στήλες για περαιτέρω υπολογισμούς.

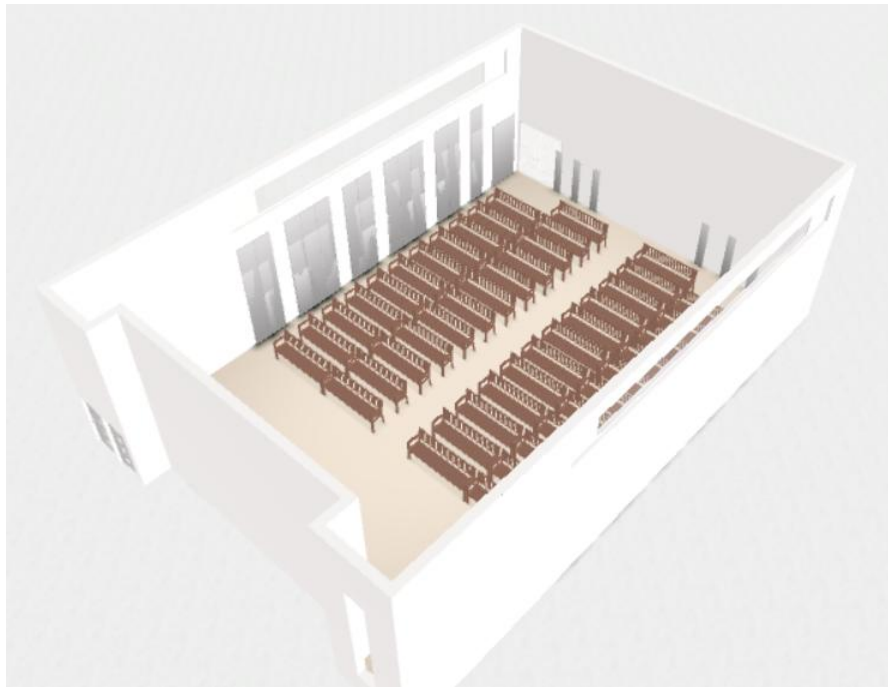
### Ανάλυση και Επιπτώσεις

- Μειωμένος χρόνος αντήχησης (RT60): Οι προτεινόμενες βελτιώσεις μειώνουν σημαντικά το RT60 σε όλες τις συχνότητες, φέρνοντάς το στο ιδανικό εύρος τόσο για ομιλία όσο και για μουσική.

- Ισορροπημένη ακουστική: Η προσθήκη απορροφητικών και διαχυτικών στοιχείων εξασφαλίζει ένα ισορροπημένο ακουστικό περιβάλλον, ελαχιστοποιώντας την υπερβολική αντήχηση και τις flutter echoes.
- Ενισχυμένη ευκρίνεια: Το μειωμένο RT60 και η ισορροπημένη απορρόφηση συχνότητας ενισχύουν την ευκρίνεια της ομιλίας, καθιστώντας την αίθουσα κατάλληλη για διάφορες εκδηλώσεις, συμπεριλαμβανομένων διαλέξεων, παραστάσεων και παρουσιάσεων.
- Βελτιστοποιημένο περιβάλλον: Οι βελτιώσεις δημιουργούν ένα βελτιστοποιημένο ακουστικό περιβάλλον που υποστηρίζει καθαρή επικοινωνία και ηχητικές εμπειρίες υψηλής ποιότητας.



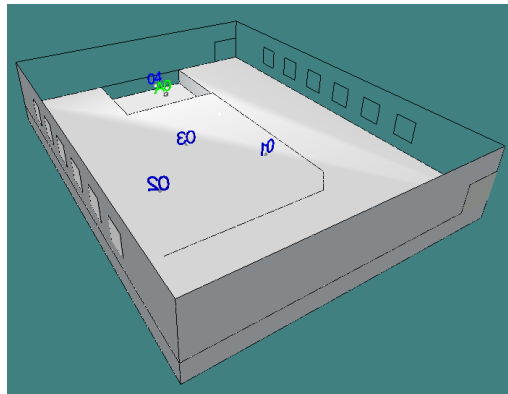
**Εικόνα 15:** Κάτοψη της αίθουσας έπειτα από τις προτεινόμενες βελτιώσεις με απορροφητικά πάνελ στους τοίχους, διαχυτές στο πίσω μέρος και μασοπαγίδες στις γωνίες.



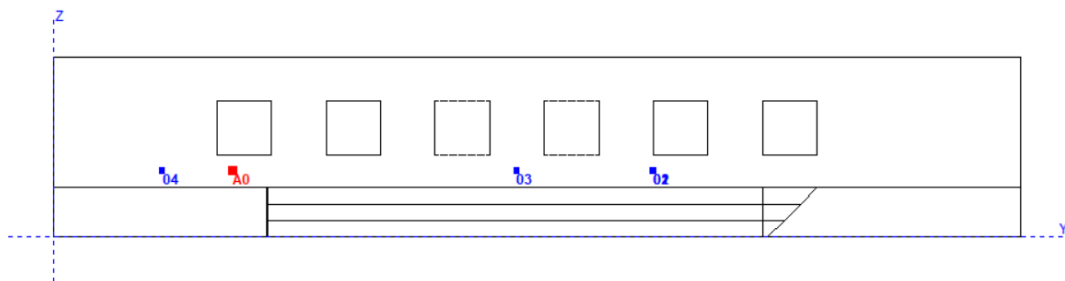
**Εικόνα 16:** Τομή της αίθουσας έπειτα από τις προτεινόμενες βελτιώσεις με απορροφητικά πάνελ στους τοίχους, διαχυτές στο πίσω μέρος και μπασοπαγίδες στις γωνίες.

### **5.3.1 Χρήση του λογισμικού προσομοίωσης Catt-Acoustic για επιπλέον υπολογισμούς και προτάσεις βελτίωσης της αίθουσας**

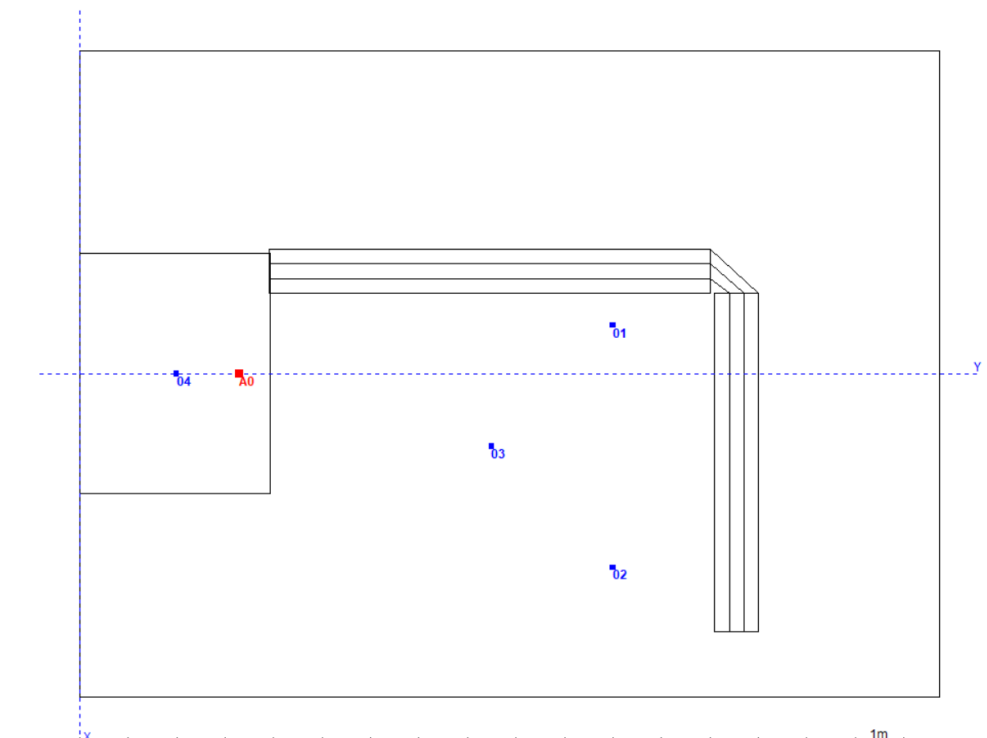
Για περαιτέρω συγκρίσεις και υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης χώρων Catt-Acoustic v9.1g. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχήματα που εξήχθησαν από το λογισμικό έπειτα από την συγγραφή των κωδικών Geo-file, Receiver-file και Source-file, οι οποίοι απαιτούνται για να μπορέσει το πρόγραμμα να πραγματοποιήσει τα σχήματα και τους υπολογισμούς. Οι αναλυτικοί κώδικες παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας.



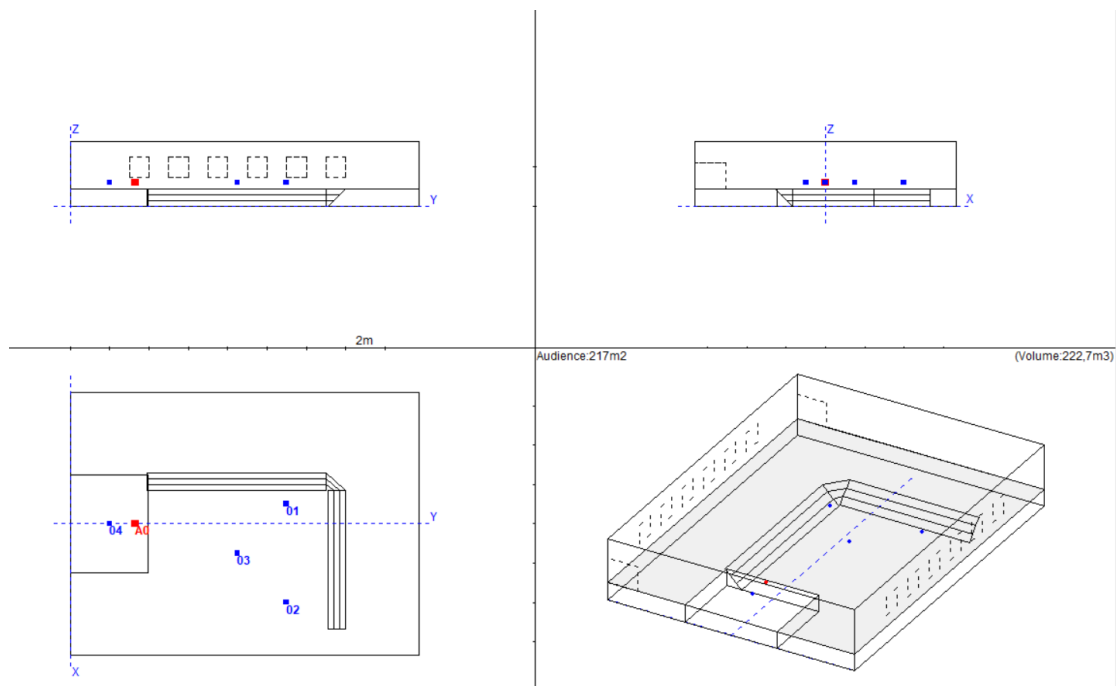
**Εικόνα 17:** Τρισδιάστατη αναπαράσταση της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.



**Εικόνα 18:** Αξονομετρικό σχήμα των πλευρών της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.



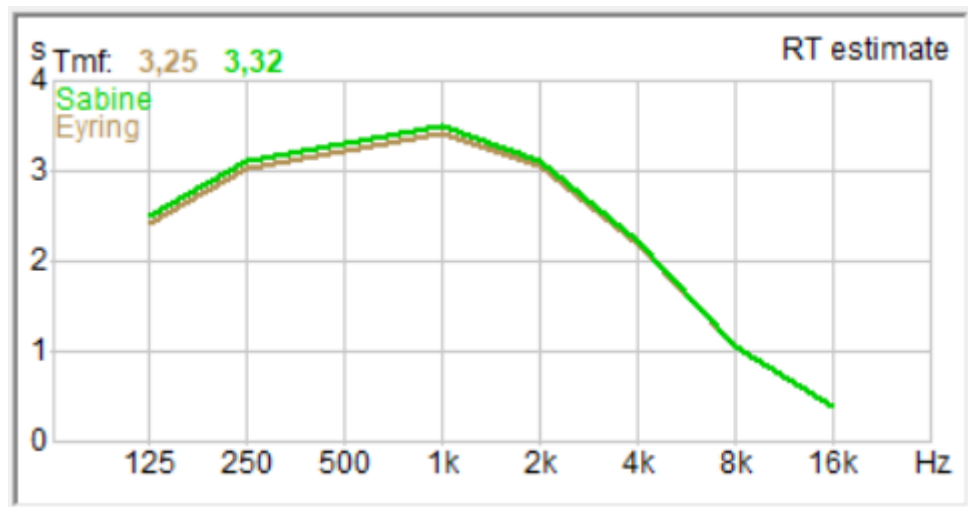
**Εικόνα 19:** Οι θέσεις μέτρησης και πηγής σε κάτοψη της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.



**Εικόνα 20:** Συγκεντρωτικά σχήματα της αίθουσας από το λογισμικό Catt-Acoustic.

Στα σχήματα παρατηρούνται τα τέσσερα σημεία των μικροφώνων – δεκτών που αναπαρίστανται με τα νούμερα 01, 02, 03 και 04 και η πηγή που βρίσκεται πάνω στην σκηνή και αναπαρίσταται με το A0. Στο κείμενο των κωδικών που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τοποθετηθεί όλες οι απαραίτητες διαστάσεις για όλες τις επιφάνειες του χώρου, καθώς και τα ακριβή σημεία των τεσσάρων μετρήσεων. Επίσης, οι απεικονίσεις του λογισμικού Catt-Acoustic αφορούν άδεια καθίσματα και για λόγους απλοποίησης έχουν απαλειφθεί οι ανισοσταθμίες του δαπέδου, πλην της σκηνικής εξέδρας.

Ακολούθως, το πρόγραμμα πραγματοποιεί την εκτίμηση των χρόνων αντήχησης κατά Sabine και Eyring. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα και στον πίνακα που ακολουθούν:



Εικόνα 21: Γραφική αναπαράσταση των εκτιμώμενων χρόνων αντήχησης κατά Sabine και Eyring.

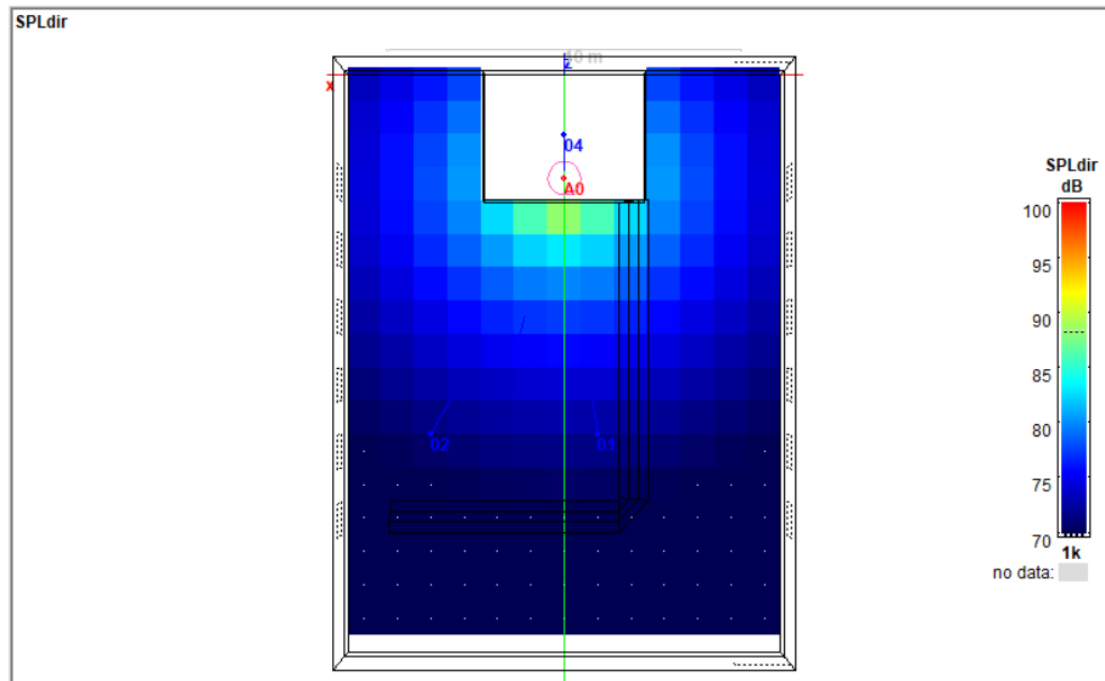
Πίνακας 14: Εκτιμώμενοι χρόνοι αντήχησης κατά Sabine και Eyring.

| Συχνότητα (Hz)  | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 16000 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Eyring RT (sec) | 2,44 | 3,05 | 3,25 | 3,44 | 3,08 | 2,21 | 1,06 | 0,391 |
| Sabine RT (sec) | 2,52 | 3,13 | 3,32 | 3,51 | 3,13 | 2,24 | 1,07 | 0,392 |

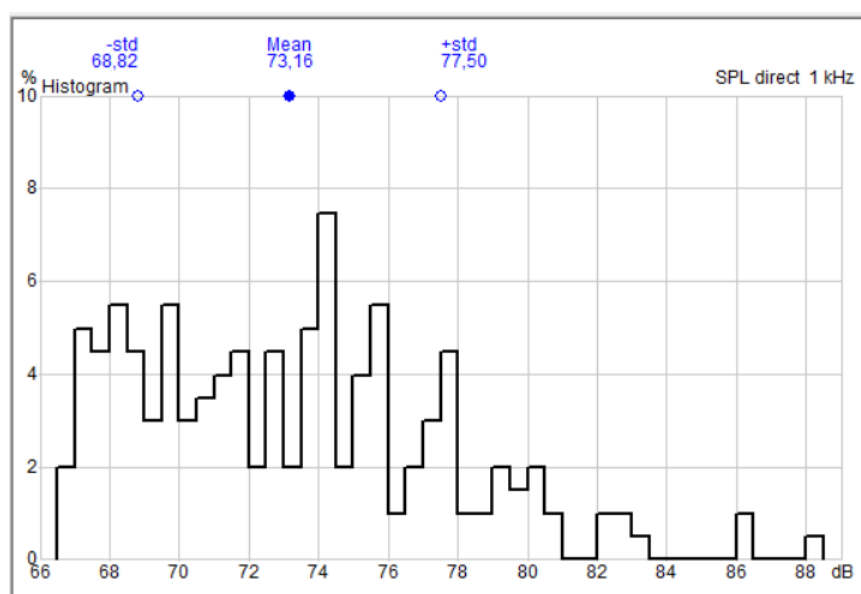
Η αίθουσα εμφανίζει ιδιαίτερα μεγάλους χρόνους αντήχησης στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες (250 Hz έως 2 kHz), οι οποίοι θα μπορούσαν να είναι ωφέλιμοι ή επιζήμιοι ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του χώρου. Ο υψηλός χρόνος αντήχησης στο 1 kHz (έως 3,33 δευτερόλεπτα) υποδηλώνει ένα ζωντανό ακουστικό περιβάλλον, ενώ η σημαντική πτώση του χρόνου αντήχησης σε υψηλότερες συχνότητες (4 kHz και άνω) υποδηλώνει καλή απορρόφηση υψηλής συχνότητας, πιθανώς λόγω της παρουσίας υλικών όπως οι κουρτίνες που υπάρχουν ούτως ή άλλως στο χώρο.

Η ακουστική ανάλυση αυτής της αίθουσας αποκαλύπτει έναν χώρο με ουσιαστική αντήχηση, ιδιαίτερα στο εύρος της μεσαίας συχνότητας, που θα μπορούσε να επηρεάσει την ευκρίνεια της ομιλίας ή τη μουσική καθαρότητα ανάλογα με τη χρήση του. Τα αποτελέσματα από τους τύπους Sabine και Eyring θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως προκαταρκτικά και συνιστάται περαιτέρω λεπτομερής ανάλυση χρησιμοποιώντας προηγμένες μεθόδους για την επικύρωση αυτών των ευρημάτων.

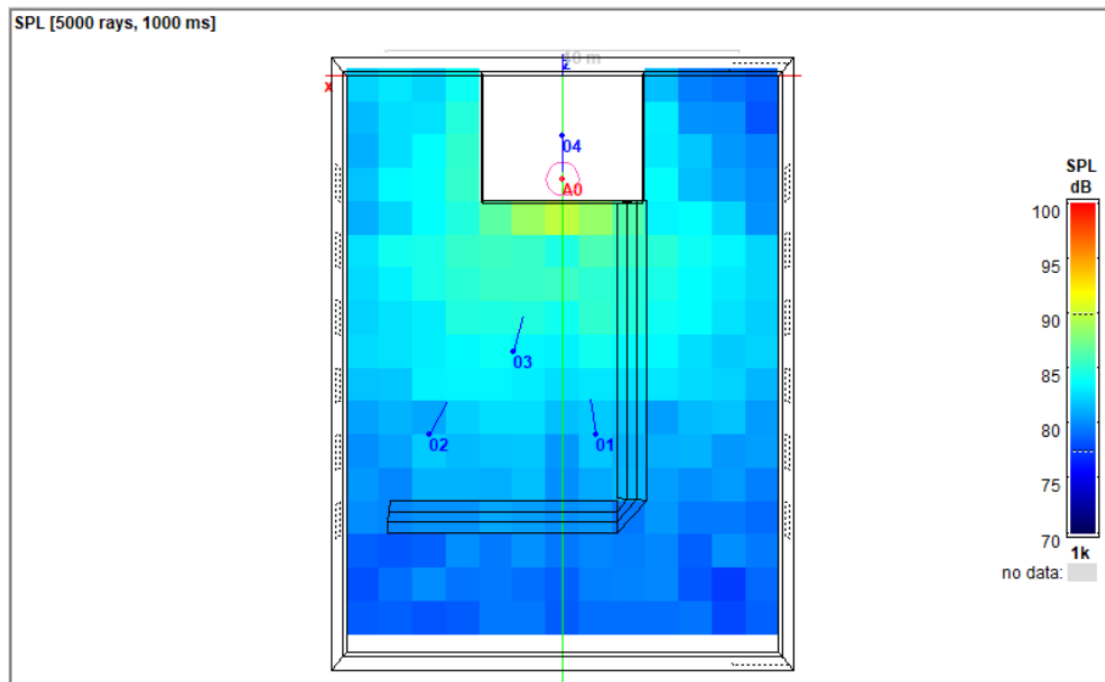
Πρέπει να αναφερθεί πως το λογισμικό Catt-Acoustic έλαβε υπόψη τις προτεινόμενες επενδύσεις για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



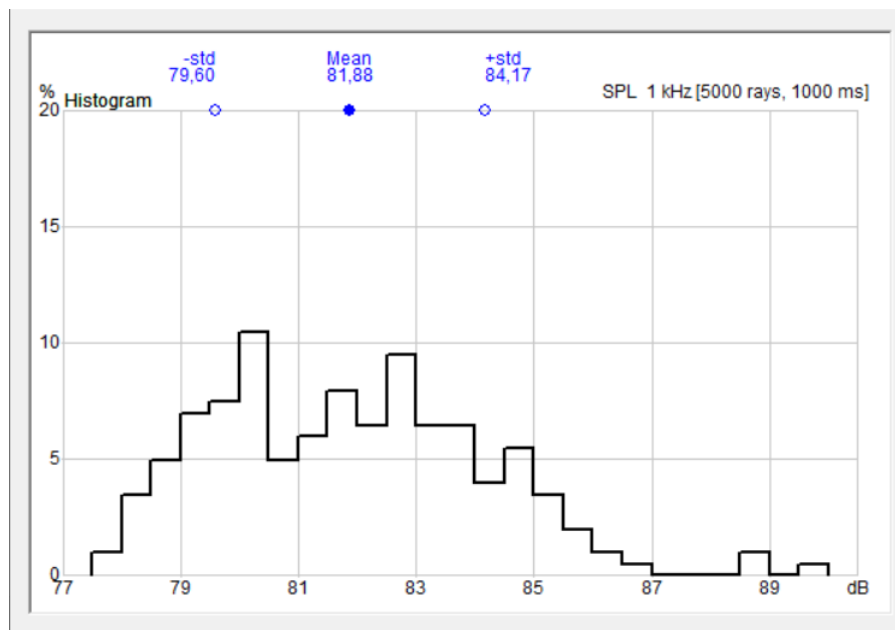
Εικόνα 22: Απεικόνιση του απευθείας επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPLdir) στην αίθουσα.



Εικόνα 23: Γράφημα του απευθείας επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPLdir) στην αίθουσα.

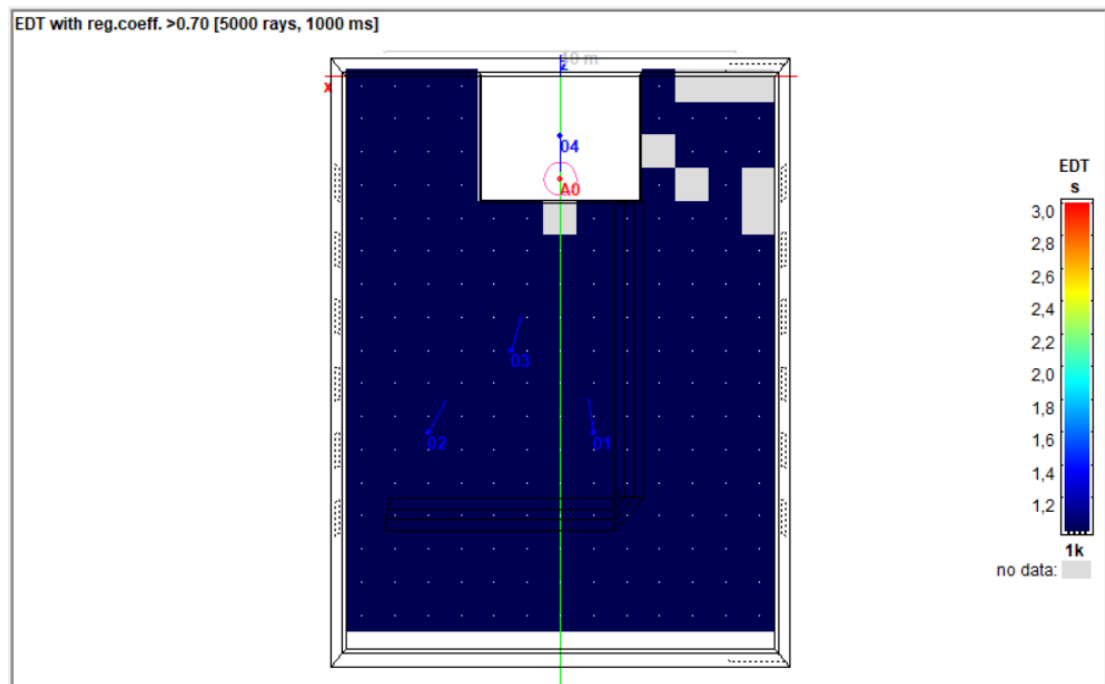


Εικόνα 24: Απεικόνιση του επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPL) στην αίθουσα.

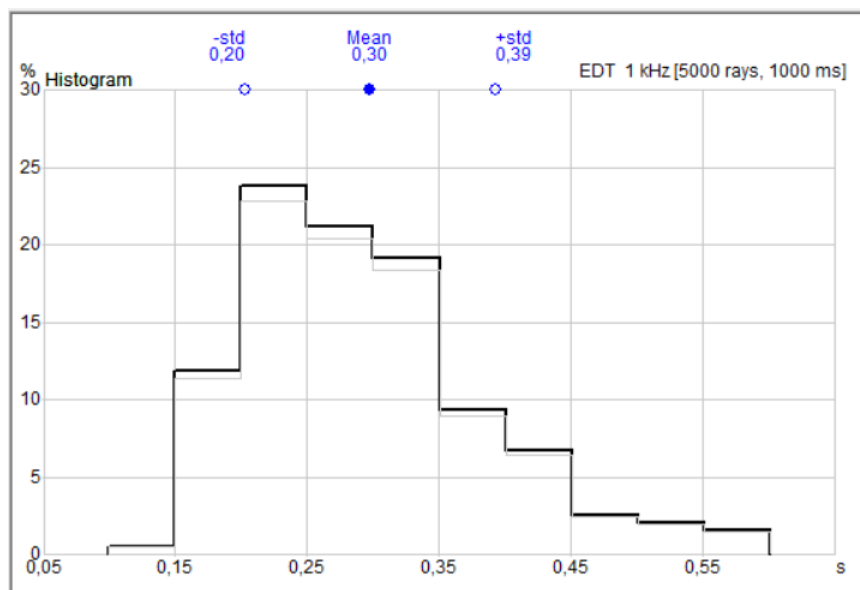


Εικόνα 25: Γράφημα του επιπέδου ηχητικής πίεσης (SPL) στην αίθουσα.

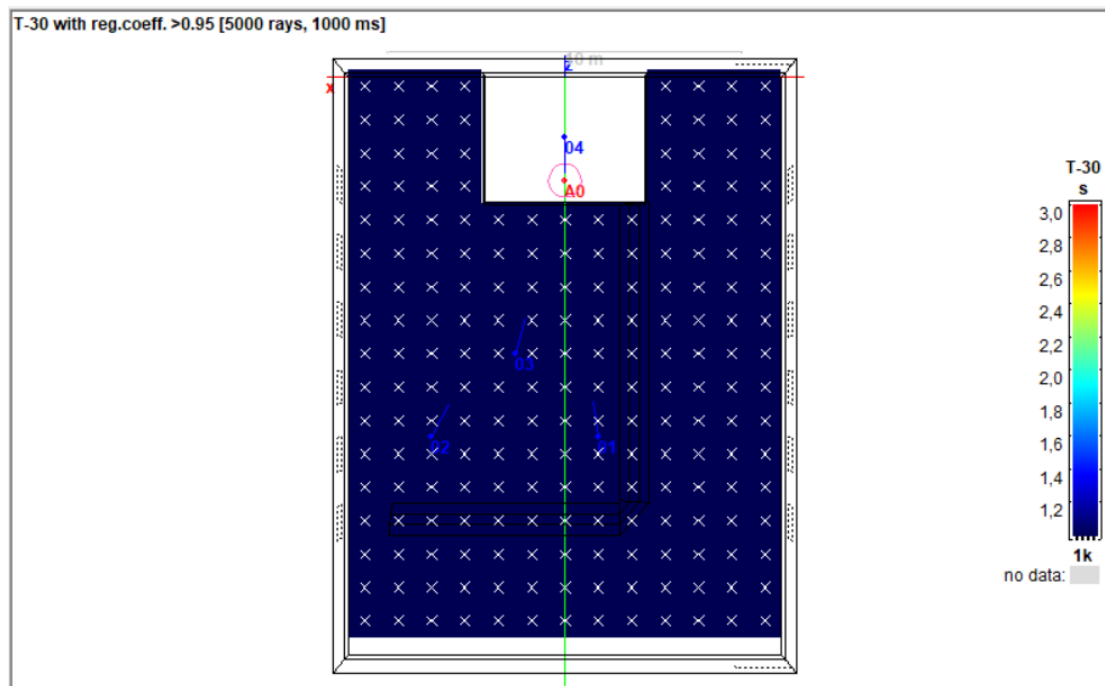




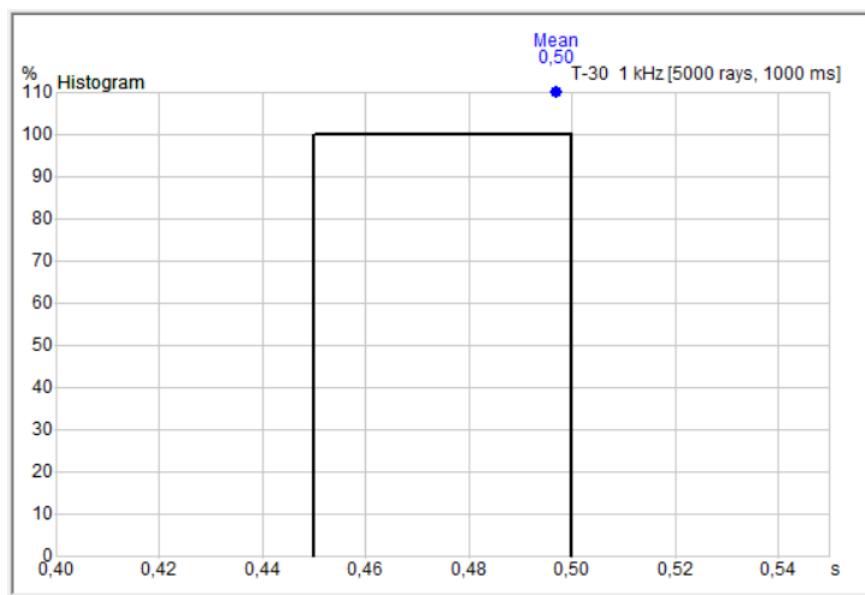
Εικόνα 26: Απεικόνιση του πρώιμου χρόνου αντήχησης (EDT) στην αίθουσα.



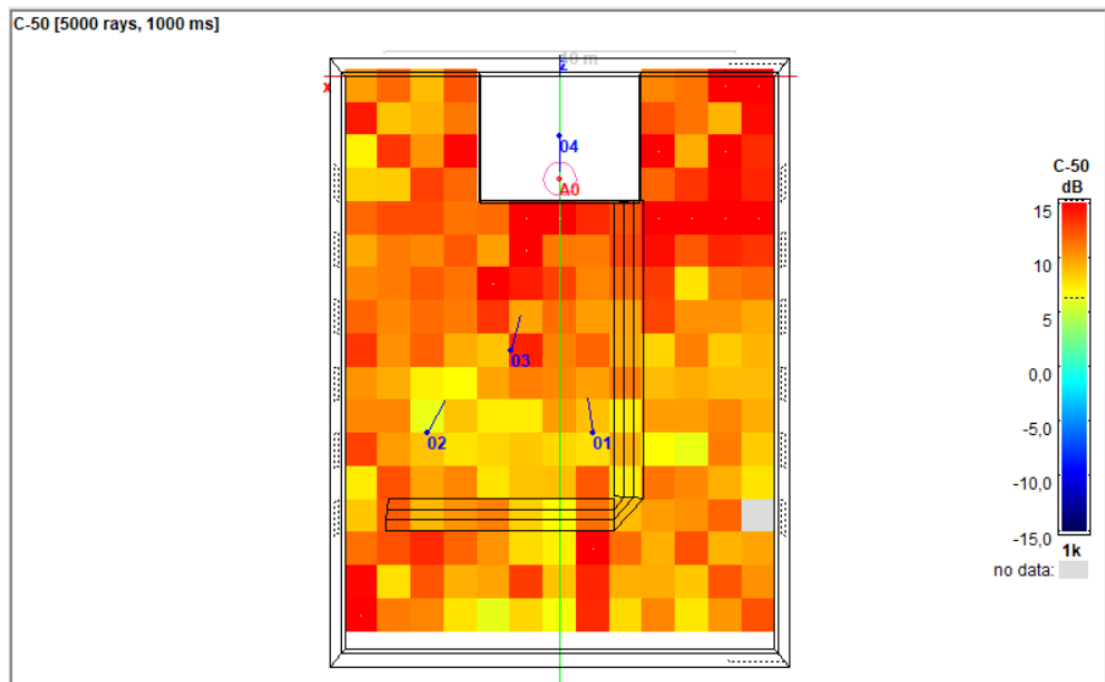
Εικόνα 27: Γράφημα του πρώιμου χρόνου αντήχησης (EDT) στην αίθουσα.



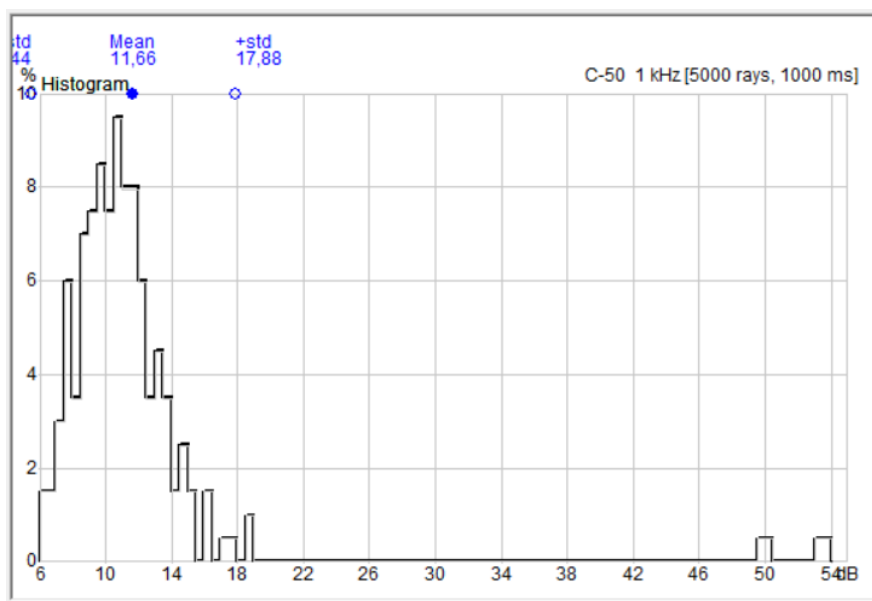
Εικόνα 28: Απεικόνιση του χρόνου αντήχησης T30 στην αίθουσα.



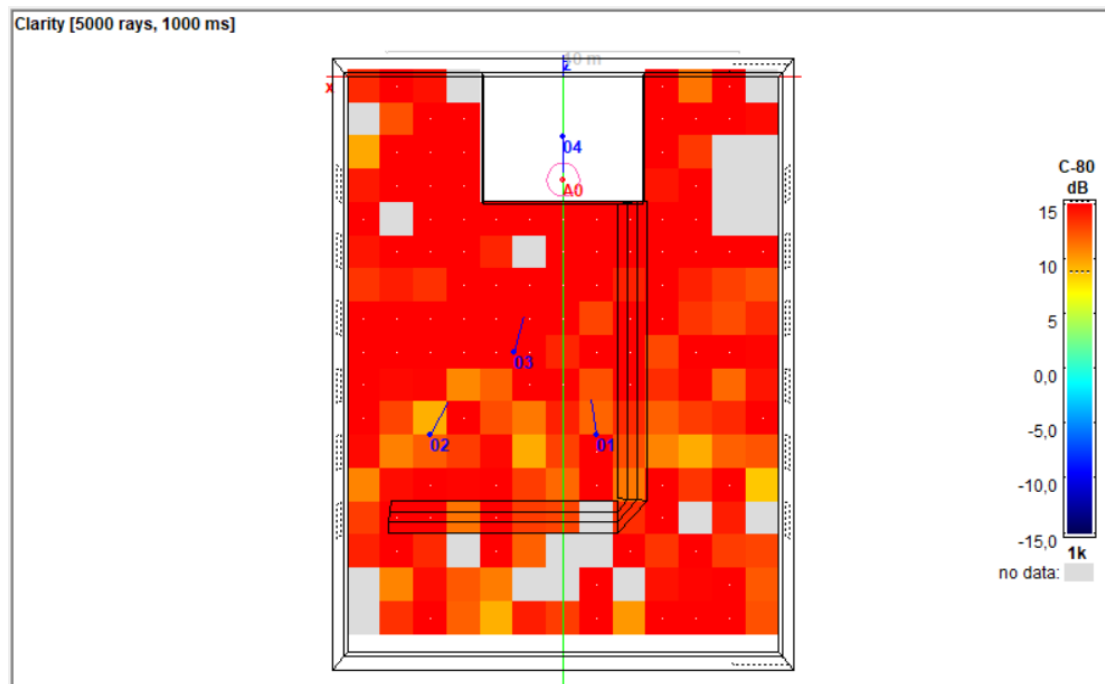
Εικόνα 29: Γράφημα του χρόνου αντήχησης T30 στην αίθουσα.



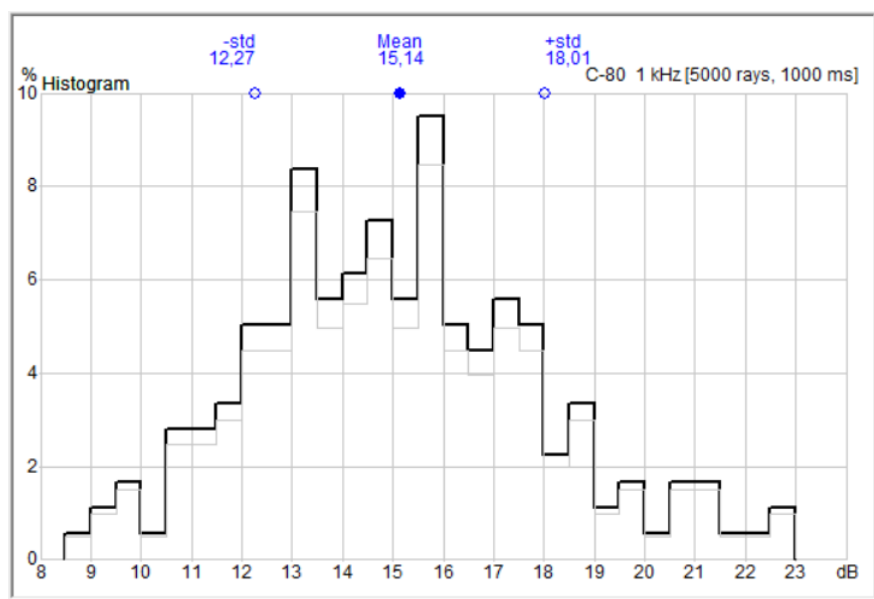
Εικόνα 30: Απεικόνιση του δείκτη ευκρίνειας C50 στην αίθουσα.



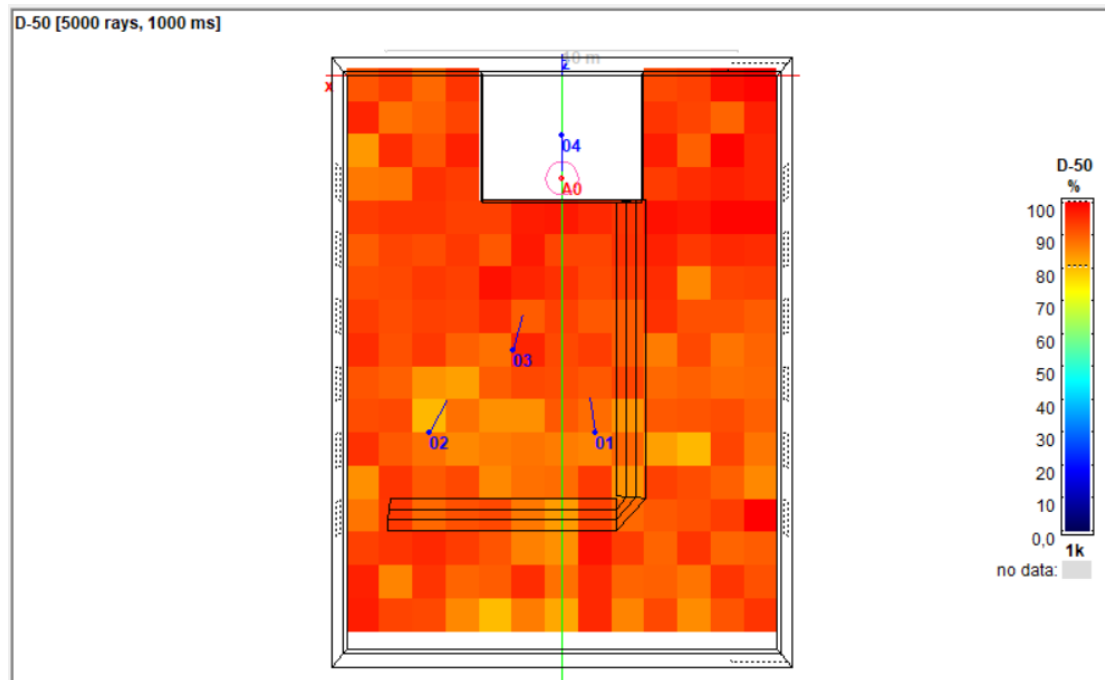
Εικόνα 31: Γράφημα του δείκτη ευκρίνειας C50 στην αίθουσα.



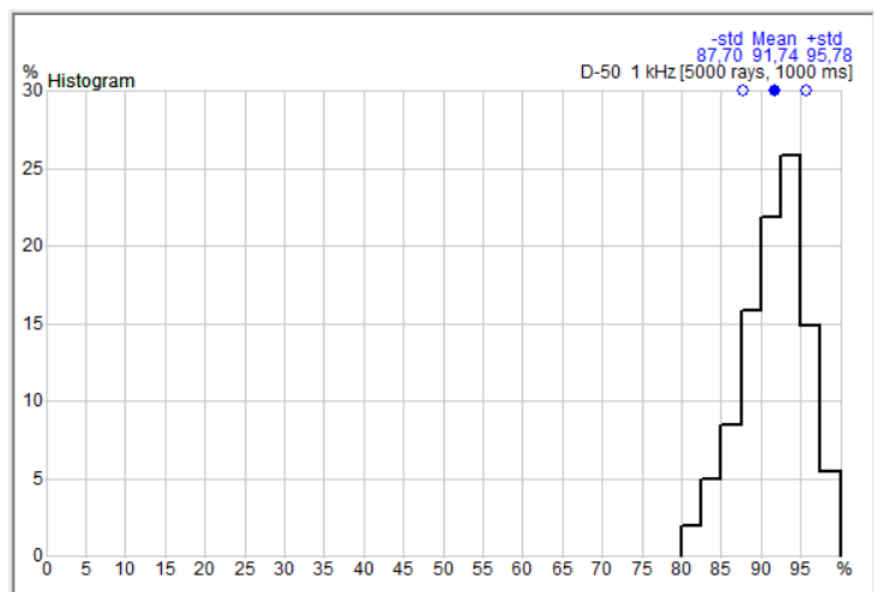
Εικόνα 32: Απεικόνιση του δείκτη ευκρίνειας C80 στην αίθουσα.



Εικόνα 33: Γράφημα του δείκτη ευκρίνειας C80 στην αίθουσα.



Εικόνα 34: Απεικόνιση του δείκτη διακριτότητας D50 στην αίθουσα.



Εικόνα 35: Γράφημα του δείκτη διακριτότητας D50 στην αίθουσα.

Οι τιμές SPL κυμαίνονται από περίπου 82,80 dB έως 91,35 dB, που σημαίνει ότι τα επίπεδα ήχου είναι αρκετά υψηλά σε ολόκληρη την προσομοιωμένη περιοχή.

Η υψηλότερη στάθμη ηχητικής πίεσης (91,35 dB) εμφανίζεται στη θέση (0, 0,5), η οποία μπορεί να υποδεικνύει ένα σημείο κοντά στην πηγή του ήχου ή μια περιοχή όπου ο ήχος είναι ιδιαίτερα συγκεντρωμένος λόγω ανακλάσεων.

Οι τιμές SPL γενικά μειώνονται κατά την κίνηση προς τις άκρες του δωματίου (δηλαδή, θέσεις με μεγαλύτερες τιμές  $x$  και  $y$ ). Αυτό δείχνει ότι η ηχητική πίεση μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή ήχου, κάτι που αναμένεται στην τυπική ακουστική συμπεριφορά λόγω της εξασθένησης του ήχου.

Υπάρχει μια κορυφή SPL (89-91 dB) γύρω από το κέντρο του δωματίου, υποδηλώνοντας ότι ο ήχος είναι συγκεντρωμένος ή πιο ομοιόμορφα κατανομημένος σε αυτήν την περιοχή.

- Κεντρική περιοχή: Αυτή η περιοχή δείχνει τις υψηλότερες τιμές SPL. Αυτό υποδηλώνει ότι η πηγή ήχου βρίσκεται κοντά ή ότι η γεωμετρία του δωματίου (τοίχοι και επιφάνειες) συγκεντρώνει τις ανακλάσεις του ήχου σε αυτήν την περιοχή.
- Περίμετρος: Στα άκρα, οι τιμές SPL τείνουν να είναι χαμηλότερες, γενικά στο εύρος των 80 dB. Αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει ότι ο ήχος είναι λιγότερο έντονος κοντά στα όρια του δωματίου, είτε λόγω απορρόφησης ήχου από τους τοίχους είτε λόγω απόστασης από την πηγή ήχου.

Υπάρχει διακύμανση στα επίπεδα ήχου, ακόμη και εντός της κεντρικής περιοχής του δωματίου, δείχνοντας ότι η κατανομή του ήχου δεν είναι ομοιόμορφη. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η γεωμετρία του δωματίου, οι ανακλαστικές επιφάνειες και η απορρόφηση αέρα.

Οι τιμές C50 στα δεδομένα κυμαίνονται από 3,21 dB έως 12,89 dB. Υψηλές τιμές C50 (μεγαλύτερες από 8 dB) εντοπίζονται γενικά προς το κέντρο και τα επάνω τμήματα της αίθουσας, γεγονός που υποδηλώνει καλύτερη ευκρίνεια ομιλίας σε αυτές τις περιοχές. Οι χαμηλότερες τιμές C50 (κοντά στα 3 dB) βρίσκονται κοντά στις άκρες, ιδιαίτερα στην κάτω αριστερή και κάτω δεξιά γωνία του δωματίου, γεγονός που υποδηλώνει μικρότερη ευκρίνεια σε αυτές τις περιοχές.

- Κεντρική ζώνη: Οι τιμές C50 είναι υψηλότερες εδώ, με τιμές που κυμαίνονται από 7,85 έως 12,89 dB, υποδηλώνοντας καλή ευκρίνεια. Αυτό σημαίνει ότι οι ακροατές που κάθονται στο κέντρο της αίθουσας θα έχουν πιο καθαρή ομιλία ή μουσική.
- Περιμετρικά σημεία: Η διαύγεια μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο. Οι τιμές πέφτουν σε περίπου 3 έως 6 dB, υποδεικνύοντας ότι η διαύγεια μειώνεται καθώς η ηχητική ενέργεια συγκεντρώνεται λιγότερο ή ανακλάται διαφορετικά στα άκρα.

Η διακύμανση στις τιμές C50 σε όλο το δωμάτιο δείχνει ότι η ευκρίνεια του ήχου δεν είναι ομοιόμορφη. Ορισμένες περιοχές (ειδικά κοντά στο κέντρο) έχουν υψηλή διαύγεια, ενώ άλλες (κοντά στις άκρες) είναι λιγότερο καθαρές. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη γεωμετρία του δωματίου, στα υλικά της επιφάνειας ή στις ανακλάσεις του ήχου.

Οι τιμές C80 υποδεικνύουν από καλή έως εξαιρετική ευκρίνεια για μουσικές παραστάσεις στους περισσότερους χώρους του δωματίου.

Η κεντρική περιοχή (ειδικά γύρω από τη μέση) δείχνει την υψηλότερη ευκρίνεια για τη μουσική, με τιμές C80 σταθερά πάνω από 15 dB.

Οι άκρες και οι γωνίες του δωματίου εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές C80 (περίπου 7-10 dB), που σημαίνει ότι η μουσική ευκρίνεια μπορεί να διακυβευτεί ελαφρώς λόγω περισσότερης ενέργειας αντήχησης σε αυτές τις περιοχές.

Οι τιμές C80 ποικίλλουν από 7,87 dB έως 18,41 dB, υποδεικνύοντας ανομοιομορφία στη σαφήνεια σε όλο το χώρο, αλλά συνολικά, το δωμάτιο έχει καλές ακουστικές ιδιότητες για μουσική.

Οι τιμές D50 κυμαίνονται από 67,67% έως 95,11%, με τις περισσότερες περιοχές να βρίσκονται πάνω από 80%, υποδηλώνοντας εξαιρετική ευκρίνεια ομιλίας σε μεγάλο μέρος του δωματίου.

Το μπροστινό τμήμα του δωματίου παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, εξασφαλίζοντας ανώτερη ευκρίνεια ομιλίας σε αυτόν τον τομέα.

Οι άκρες και οι γωνίες δείχνουν χαμηλότερες τιμές, ιδιαίτερα κοντά (-6,00, 5,50), γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη ευκρίνεια λόγω πιο έντονης αντήχησης.

Συνολικά, η αίθουσα φαίνεται να είναι ελαφρώς πιο κατάλληλη για ομιλία από ότι για ζωντανές μουσικές παραστάσεις, όμως οι αλλαγές για την επίτευξη ενός ουσιαστικού αποτελέσματος είναι αναγκαίες και επιτακτικές, καθώς οι δείκτες ευκρίνειας και διακριτότητας διαφέρουν αρκετά από τους προβλεπόμενους.



## 6. Συστάσεις και συμπεράσματα

### 6.1 Εισαγωγή

Η μελέτη που διεξήχθη στην αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας είχε ως στόχο να αξιολογήσει τα ακουστικά χαρακτηριστικά της, να καθορίσει περιοχές προς βελτίωση και να προτείνει ακουστικές βελτιώσεις. Πραγματοποιήθηκαν εκτενείς μετρήσεις και αναλύσεις, εστιάζοντας στον χρόνο αντήχησης (RT60), στο χρόνο πρώιμης αποσύνθεσης (EDT), στους δείκτες διαύγειας (C50, C80) και στον ορισμό (D50).

### 6.2 Χρόνος αντήχησης (RT60)

Οι τιμές RT60 σε χαμηλότερες συχνότητες ήταν σημαντικά υψηλές, ιδιαίτερα στα 50 Hz (4.175 s στην τέταρτη μέτρηση), υποδεικνύοντας έντονη αντήχηση χαμηλής συχνότητας. Αυτός ο εκτεταμένος χρόνος αποσύνθεσης μπορεί να οδηγήσει σε μια λασπώδη ποιότητα ήχου, επηρεάζοντας την ευκρίνεια της ομιλίας και τη μουσική καθαρότητα (Beranek, 2004).

Οι τιμές RT60 μεσαίας συχνότητας διέφεραν, με αξιοσημείωτη κορυφή στα 250 Hz (έως 2.942 s στην τρίτη μέτρηση). Αυτές οι συχνότητες είναι ζωτικής σημασίας για τη σαφήνεια της ομιλίας και η παρατεταμένη αντήχηση σε αυτό το εύρος μπορεί να υποβαθμίσει την καταληπτότητα (Kuttruff, 2016).

Οι τιμές RT60 υψηλής συχνότητας ήταν γενικά χαμηλότερες, με την υψηλότερη στα 1250 Hz να φτάνει περίπου τα 2.447 δευτερόλεπτα και να μειώνεται προοδευτικά. Οι χαμηλότεροι χρόνοι αντήχησης σε υψηλές συχνότητες είναι ευεργετικοί για την καταληπτότητα της ομιλίας (Everest & Pohlmann, 2015).

### 6.3 Πρώιμος χρόνος αντήχησης (EDT)

Ο πρώιμος χρόνος αντήχησης μετρά τον αρχικό ρυθμό αποσύνθεσης του ήχου και σχετίζεται στενά με την αντιληπτή αντήχηση σε ένα χώρο. Οι τιμές EDT ήταν συνεπείς με τις τάσεις RT60, εμφανίζοντας υψηλότερες τιμές σε χαμηλές συχνότητες

(3.608 s στα 50 Hz) και μειώνονταν σε υψηλότερες συχνότητες (0,601 s στα 10000 Hz). Αυτή η συνέπεια υπογραμμίζει τα επίμονα προβλήματα αντήχησης χαμηλής συχνότητας (Bradley, 2004).

Οι υψηλές τιμές EDT σε χαμηλές συχνότητες υποδηλώνουν την ανάγκη για στοχευμένες βελτιώσεις απορρόφησης χαμηλής συχνότητας, όπως παγίδες μπάσων, για τη βελτίωση της συνολικής διαύγειας του ήχου και τη μείωση της έκρηξης (Kuttruff, 2016).

#### **6.4 Δείκτες ευκρίνειας (C50, C80)**

Οι δείκτες ευκρίνειας μετρούν την αναλογία της πρώιμης έως καθυστερημένης ηχητικής ενέργειας, υποδεικνύοντας πόσο καθαρός και κατανοητός είναι ο ήχος μέσα σε ένα χώρο.

##### **C50**

Οι τιμές C50 διέφεραν σημαντικά, με ορισμένες συχνότητες να παρουσιάζουν αρνητικές τιμές (π.χ. -3,52 dB στα 50 Hz) και άλλες θετικές (π.χ. 3,44 dB στα 63 Hz). Οι αρνητικές τιμές C50 υποδηλώνουν υπερβολική αντήχηση, η οποία μπορεί να αποκρύψει τη σαφήνεια της ομιλίας (Beranek, 2004).

##### **C80**

Οι τιμές C80 κυμάνθηκαν επίσης, με τις χαμηλότερες συχνότητες να παρουσιάζουν γενικά μικρότερη ευκρίνεια (-3,30 dB στα 50 Hz) και τις υψηλότερες συχνότητες να βελτιώνονται (9,69 dB στα 10000 Hz). Οι θετικές τιμές C80 σε υψηλότερες συχνότητες είναι επιθυμητές για ευκρίνεια της μουσικής (Everest & Pohlmann, 2015).

#### **6.5 Δείκτης διακριτότητας (D50)**

Ο δείκτης διακριτότητας (D50) μετρά την αναλογία της πρώιμης ηχητικής ενέργειας, υποδεικνύοντας πόσο διακριτοί και κατανοητοί είναι οι ήχοι.

Οι τιμές D50 σε χαμηλές συχνότητες ήταν χαμηλές (π.χ. 30,8% στα 50 Hz), υποδεικνύοντας κακή ευκρίνεια και θολή αντίληψη ήχου. Αυτό είναι σύμφωνο με τις υψηλές τιμές RT60 και EDT (Kuttruff, 2016).

Οι υψηλότερες συχνότητες έδειξαν βελτιωμένες τιμές D50 (π.χ. 85,2% στα 10000 Hz), αντανakλώντας καλύτερη ευκρίνεια και ευκρίνεια ήχου (Long, 2006).

## **6.6 Ευρήματα σημείων και θέσεων**

Τα δεδομένα θέσης από τα τέσσερα σημεία μέτρησης μέσα στην αίθουσα αποκάλυψαν χωρικές διακυμάνσεις στην ακουστική απόδοση:

### **Πίσω αριστερά και δεξιά θέσεις**

Αυτές οι θέσεις παρουσίασαν υψηλότερους χρόνους αντήχησης και χαμηλότερους δείκτες διαύγειας, υποδηλώνοντας ότι οι ανακλάσεις του ήχου είναι πιο έντονες στο πίσω μέρος της αίθουσας (Bradley, 2004).

### **Θέσεις κέντρου και σκηνής**

Οι μετρήσεις στο κέντρο και τη σκηνή έδειξαν σχετικά ισορροπημένα ακουστικά χαρακτηριστικά, με βελτιωμένη ευκρίνεια και ευκρίνεια σε σύγκριση με τις πίσω θέσεις. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για στοχευμένες ακουστικές βελτιώσεις στο πίσω μέρος της αίθουσας για την εξίσωση της ακουστικής απόδοσης σε όλο το χώρο (Kuttruff, 2016).

## **6.7 Συστάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας πολλαπλών χρήσεων της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας**

Τα δεδομένα από την αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας παρείχαν πληροφορίες για βασικές ακουστικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του

χρόνου αντήχησης (RT60), του χρόνου πρώιμης αποσύνθεσης (EDT), των δεικτών διαύγειας (C50 και C80) και του ορισμού (D50). Τα ευρήματα ανέφεραν τα εξής:

- Υπερβολική αντήχηση χαμηλής συχνότητας: Οι υψηλές τιμές RT60 σε χαμηλές συχνότητες (π.χ. 4.175 s στα 50 Hz) υποδηλώνουν την ανάγκη για στοχευμένη απορρόφηση χαμηλής συχνότητας (Kuttruff, 2016).
- Μεταβλητή σαφήνεια ομιλίας: Οι δείκτες σαφήνειας (C50 και C80) εμφάνισαν σημαντική διακύμανση, με ορισμένες συχνότητες να υποδεικνύουν χαμηλή σαφήνεια (π.χ. -3,52 dB στα 50 Hz) (Bradley, 2004).
- Ασυνεπής ορισμός σε όλες τις συχνότητες: Ο ορισμός (D50) ήταν χαμηλός σε ορισμένες συχνότητες, αντικατοπτρίζοντας κακή διάκριση ήχου και ευκρίνεια (Long, 2006).

Με βάση αυτά τα ευρήματα, προτείνονται οι ακόλουθες συστάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής απόδοσης κλειστών αιθουσών διδασκαλίας για εκδηλώσεις:

### **Ηχοαπορροφητικά υλικά**

- Επεξεργασίες οροφής: Τοποθέτηση ακουστικών πλακιδίων οροφής κατασκευασμένα από υλικά όπως υαλοβάμβακα ή ορυκτοβάμβακα. Αυτά τα υλικά είναι αποτελεσματικά στην απορρόφηση μεσαίων έως υψηλών συχνοτήτων, μειώνοντας τον συνολικό χρόνο αντήχησης (Everest & Pohlmann, 2015).
- Πάνελ τοίχου: Χρήση ακουστικών επιτοίχιων πάνελ, ιδιαίτερα σε παράλληλους τοίχους για την ελαχιστοποίηση των flutter echoes. Τα πάνελ πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το δωμάτιο για να διασφαλίζεται η ισορροπημένη απορρόφηση (Kuttruff, 2016).
- Μοκέτες και χαλιά: Η προσθήκη μοκετών ή χαλιών μπορεί να μειώσει σημαντικά τις ανακλάσεις του ήχου από το πάτωμα, ειδικά σε μεγάλες αίθουσες διδασκαλίας όπου τα σκληρά υλικά δαπέδου συμβάλλουν στην αντήχηση (Bradley, 2004).

### **Απορρόφηση χαμηλής συχνότητας**

- Πάνελ απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων: Εγκατάσταση πάνελ απορρόφησης χαμηλών συχνοτήτων για την αντιμετώπιση της συσσώρευσης χαμηλών συχνοτήτων. Οι απορροφητές αυτοί είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην απορρόφηση συχνοτήτων κάτω των 250 Hz, οι οποίες είναι συνήθως προβληματικές σε κλειστούς χώρους (Everest & Pohlmann, 2015).
- Χοντρές κουρτίνες: Βαριές, χοντρές κουρτίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε παράθυρα και τοίχους για να απορροφούν τις χαμηλές συχνότητες. Αυτές οι κουρτίνες μπορούν επίσης να τραβηχτούν κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων για την περαιτέρω ενίσχυση της απορρόφησης χαμηλής συχνότητας (Kuttruff, 2016).

### **Έλεγχος διάχυσης και ανάκλασης**

- Διαχυτές: Τοποθέτηση διαχυτών στον πίσω τοίχο της τάξης για να διαχέονται ομοιόμορφα οι ανακλάσεις του ήχου σε όλο το χώρο. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ενός πιο ομοιόμορφου ηχητικού πεδίου και να αποτρέψει την εστίαση των ηχητικών κυμάτων (Long, 2006).
- Ανακλαστικές επιφάνειες: Έλεγχος της χρήσης ανακλαστικών επιφανειών για την αποφυγή της υπερβολικής αντήχησης. Όπου είναι απαραίτητο, στρατηγική τοποθέτηση ανακλαστικών πάνελ για τη βελτίωση της καταληπτότητας της ομιλίας χωρίς τη δημιουργία υπερβολικών απόηχων (Bradley, 2004).

### **Προηγμένα συστήματα ενίσχυσης ήχου**

- Κατανεμημένα μεγάφωνα: Χρήση ενός κατανεμημένου συστήματος ηχείων για την εξασφάλιση ομοιόμορφης ηχητικής κάλυψης σε ολόκληρη την τάξη. Αυτό το σύστημα μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση σταθερών επιπέδων ήχου και καθαρότητας ανεξάρτητα από τη θέση του ακροατή (Kuttruff, 2016).

- Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (DSP): Εφαρμογή DSP για δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων ήχου. Το DSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξίσωση των επιπέδων ήχου, τη μείωση της ανάδρασης και τη βελτίωση της ευκρίνειας της ομιλίας κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων (Everest & Pohlmann, 2015).

### Ακουστική ζώνη

- Καθορισμένες ήσυχες ζώνες: Δημιουργία ήσυχων ζωνών μέσα στην αίθουσα χρησιμοποιώντας φορητά ακουστικά χωρίσματα ή οθόνες. Αυτές οι ζώνες μπορούν να παρέχουν περιοχές με μειωμένα επίπεδα θορύβου για ομαδικές συζητήσεις ή μεμονωμένες δραστηριότητες (Long, 2006).
- Ενεργός έλεγχος θορύβου: Χρήση συστημάτων ενεργού ελέγχου θορύβου (ANC) για τη μείωση του ανεπιθύμητου θορύβου περιβάλλοντος. Το ANC μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε μεγάλες τάξεις όπου υπάρχουν εξωτερικές πηγές θορύβου (Kuttruff, 2016).

### Συντήρηση ακουστικών στοιχείων

- Τακτικές επιθεωρήσεις: Διεξαγωγή τακτικών επιθεωρήσεων και συντήρηση ακουστικών υλικών και βελτιώσεων. Βεβαίωση ότι όλα τα ακουστικά πάνελ, οι παγίδες μπάσων και οι διαχυτές είναι σε καλή κατάσταση και έχουν τοποθετηθεί σωστά (Everest & Pohlmann, 2015).
- Αναβαθμίσεις και βελτιώσεις: Ενημέρωση σχετικά με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες ακουστικής επεξεργασίας και περιοδικές αναβαθμίσεις στο υπάρχον σύστημα για τη διατήρηση της βέλτιστης ακουστικής απόδοσης (Bradley, 2004).

### 6.8 Συνέπειες για δασκάλους, μαθητές και συμμετέχοντες

Η ακουστική απόδοση των εκπαιδευτικών χώρων, όπως οι αίθουσες διδασκαλίας και τα αμφιθέατρα, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην

αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας και της μάθησης. Η κακή ακουστική μπορεί να εμποδίσει σημαντικά την επικοινωνία, να μειώσει την καταληπτότητα της ομιλίας και να αυξήσει το γνωστικό φορτίο τόσο στους δασκάλους όσο και στους μαθητές. Τα στοιχεία που παρέχονται από την αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας αποκαλύπτουν αρκετές βασικές ιδέες που έχουν σημαντικές επιπτώσεις για τους εκπαιδευτικούς, τους μαθητές και τους συμμετέχοντες.

- Μειωμένη φωνητική καταπόνηση: Οι βελτιωμένες ακουστικές συνθήκες, όπως υποδεικνύεται από τους χαμηλότερους χρόνους αντήχησης και τους καλύτερους δείκτες ευκρίνειας (C50 και C80), σημαίνει ότι οι δάσκαλοι δεν χρειάζεται να υψώσουν τη φωνή τους για να ακουστούν καθαρά. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τη φωνητική καταπόνηση και την κόπωση (Bradley, 2004).
- Αποτελεσματική Επικοινωνία: Η καθαρότερη μετάδοση ομιλίας επιτρέπει στους εκπαιδευτικούς να μεταφέρουν πληροφορίες πιο αποτελεσματικά. Αυτό είναι κρίσιμο για τη διατήρηση της προσοχής και τη διασφάλιση ότι όλοι οι μαθητές, συμπεριλαμβανομένων εκείνων με προβλήματα ακοής ή γλωσσικές δυσκολίες, μπορούν να παρακολουθήσουν το μάθημα (Everest & Pohlmann, 2015).
- Ακουστική προσοχή: Τα ενισχυμένα ακουστικά περιβάλλοντα βοηθούν στη διατήρηση της ακουστικής προσοχής των μαθητών, μειώνοντας τους περισπασμούς και την πιθανότητα κακής επικοινωνίας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση της τάξης και πιο αποτελεσματική διδασκαλία (Bradley, 2004).
- Ευελιξία στις διδακτικές μεθόδους: Με καλύτερη ακουστική, οι δάσκαλοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία μεθόδων διδασκαλίας, συμπεριλαμβανομένων ομαδικών συζητήσεων, παρουσιάσεων πολυμέσων και διαδραστικών δραστηριοτήτων, χωρίς να ανησυχούν για παραμόρφωση ήχου ή απώλεια σαφήνειας ομιλίας (Kuttruff, 2016).
- Καλύτερη ευκρίνεια ομιλίας: Η βελτιωμένη καθαρότητα ομιλίας (π.χ. υψηλότερες τιμές C50 και D50) ενισχύει την ικανότητα των μαθητών να κατανοούν προφορικές οδηγίες και διαλέξεις. Αυτό οδηγεί σε καλύτερη



διατήρηση των πληροφοριών και βελτιωμένη ακαδημαϊκή επίδοση (Bradley, 2004).

- Μειωμένο γνωστικό φορτίο: Σε ένα καλά σχεδιασμένο ακουστικό περιβάλλον, οι μαθητές μπορούν να επικεντρωθούν περισσότερο στην κατανόηση του περιεχομένου παρά στην προσπάθεια να ακούσουν τον δάσκαλο. Αυτό μειώνει το γνωστικό φορτίο και επιτρέπει πιο αποτελεσματική μάθηση (Everest & Pohlmann, 2015).
- Άνετο μαθησιακό περιβάλλον: Η καλή ακουστική δημιουργεί ένα πιο άνετο περιβάλλον μάθησης, ενθαρρύνοντας τη συμμετοχή και τη συμμετοχή των μαθητών. Οι μαθητές είναι πιο πιθανό να κάνουν ερωτήσεις και να συμμετέχουν σε συζητήσεις όταν μπορούν να ακούσουν και να ακουστούν καθαρά (Kuttruff, 2016).
- Συμμετοχικότητα: Οι βελτιωμένες ακουστικές συνθήκες ωφελούν όλους τους μαθητές, ιδιαίτερα εκείνους με προβλήματα ακουστικής επεξεργασίας ή μαθησιακές δυσκολίες. Αυτό προάγει τη συμπερίληψη και διασφαλίζει ότι όλοι οι μαθητές έχουν ίση πρόσβαση σε ευκαιρίες μάθησης (Bradley, 2004).
- Ακουστική άνεση: Για τους συμμετέχοντες σε εκδηλώσεις που πραγματοποιούνται στην τάξη ή στην αίθουσα, η καλύτερη ακουστική απόδοση εξασφαλίζει μια πιο άνετη εμπειρία ακρόασης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εκδηλώσεις όπως διαλέξεις, παρουσιάσεις και παραστάσεις όπου η σαφήνεια του λόγου και της μουσικής είναι πρωταρχικής σημασίας (Everest & Pohlmann, 2015).
- Αυξημένη ικανοποίηση: Τα ενισχυμένα ακουστικά περιβάλλοντα οδηγούν σε υψηλότερη ικανοποίηση μεταξύ των παρευρισκομένων. Η καθαρή μετάδοση ήχου διασφαλίζει ότι το κοινό μπορεί να ασχοληθεί πλήρως με το περιεχόμενο της εκδήλωσης, οδηγώντας σε μια πιο θετική συνολική εμπειρία (Kuttruff, 2016).
- Προσβασιμότητα για όλους: Η βελτιωμένη ακουστική καθιστά τις εκδηλώσεις πιο προσιτές σε άτομα με προβλήματα ακοής. Η χρήση συστημάτων ενίσχυσης ήχου, σε συνδυασμό με αποτελεσματικές ακουστικές βελτιώσεις, διασφαλίζει ότι όλοι στο κοινό μπορούν να ακούσουν και να κατανοήσουν το περιεχόμενο (Bradley, 2004).



- Μειωμένη ηχορύπανση: Οι αποτελεσματικές ακουστικές βελτιώσεις μειώνουν τον θόρυβο του περιβάλλοντος και αποτρέπουν τη διαρροή ήχου, δημιουργώντας ένα πιο ευχάριστο περιβάλλον για όλους τους συμμετέχοντες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλοντα όπου πολλά γεγονότα ή δραστηριότητες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα (Long, 2006).

## 6.9 Πεδίο εφαρμογής και περιορισμοί

Το κύριο αντικείμενο αυτής της μελέτης περιλαμβάνει την ολοκληρωμένη ακουστική αξιολόγηση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, με επίκεντρο την κατανόηση και την ενίσχυση της ακουστικής της απόδοσης για διάφορες εκδηλώσεις.

### 6.9.1 Επιπτώσεις για τους χρήστες

- Εκπαιδευτικός αντίκτυπος: Διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι ακουστικές συνθήκες επηρεάζουν τη φωνητική ένταση των δασκάλων και τα μαθησιακά αποτελέσματα των μαθητών.
- Εμπειρία εκδήλωσης: Εξέταση της ακουστικής επίδρασης στη συνολική εμπειρία των συμμετεχόντων κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων.

### 6.9.2 Περιβαλλοντική μεταβλητότητα

Παρά τη συνολική προσέγγιση που υιοθετήθηκε, αρκετοί περιορισμοί πρέπει να αναγνωριστούν σε αυτή τη μελέτη:

- Ακουστικές διακυμάνσεις: Τα ακουστικά χαρακτηριστικά της αίθουσας μπορούν να επηρεαστούν από αλλαγές στην πληρότητα, τη διάταξη των επίπλων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία). Αυτές οι μεταβλητές ελέγχονταν όσο το δυνατόν περισσότερο, αλλά η πλήρης εξάλειψη δεν ήταν εφικτή, επηρεάζοντας δυνητικά τη συνέπεια των μετρήσεων (Kuttruff, 2016).

### 6.9.3 Περιορισμοί μέτρησης

- Περιορισμένες θέσεις: Οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις συγκεκριμένες θέσεις εντός της αίθουσας. Ενώ αυτές οι θέσεις επιλέχθηκαν στρατηγικά για να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές χωρικές περιοχές, ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως τη μεταβλητότητα της ακουστικής απόδοσης σε ολόκληρη την αίθουσα.
- Εύρος συχνότητας: Μετρήσεις που επικεντρώνονται σε τυπικές περιοχές συχνότητας που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ακουστικές αξιολογήσεις. Ωστόσο, συγκεκριμένες συχνότητες εκτός αυτού του εύρους μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικές ακουστικές συμπεριφορές που δεν καταγράφηκαν σε αυτή τη μελέτη (Everest & Pohlmann, 2015).

### 6.9.4 Περιορισμοί Ακουστικής Προσομοίωσης

- Απλοποιημένα μοντέλα: Οι ακουστικές προσομοιώσεις και προβλέψεις βασίστηκαν σε εξιδανικευμένα μοντέλα της αίθουσας. Οι αποκλίσεις του πραγματικού κόσμου από αυτά τα μοντέλα, λόγω αρχιτεκτονικών ιδιοτεροτήτων ή μη καταγεγραμμένων δομικών στοιχείων, μπορεί να οδηγήσουν σε αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής ακουστικής απόδοσης (Bradley, 2004).

### 6.9.5 Συμπέρασμα

Το αντικείμενο αυτής της μελέτης παρέχει μια λεπτομερή αξιολόγηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας, προσφέροντας γνώσεις και συστάσεις για τη βελτίωση της ακουστικής της απόδοσης. Ωστόσο, οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν τονίζουν τομείς όπου απαιτείται περαιτέρω έρευνα και συνεχής παρακολούθηση για να διασφαλιστούν οι βέλτιστες ακουστικές συνθήκες. Αναγνωρίζοντας αυτούς τους περιορισμούς, η μελέτη στοχεύει να

προσφέρει μια ισορροπημένη προοπτική που ενημερώνει τόσο για άμεσες βελτιώσεις όσο και για μακροπρόθεσμες ακουστικές στρατηγικές για την αίθουσα.

## **6.10 Προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας**

### **6.10.1 Προηγμένη ακουστική μοντελοποίηση**

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη προηγμένων ακουστικών μοντέλων της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας για την καλύτερη κατανόηση της περίπλοκης αλληλεπίδρασης των ηχητικών κυμάτων εντός του χώρου. Η χρήση υπολογιστικών εργαλείων ακουστικής όπως η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και οι μέθοδοι οριακών στοιχείων (BEM) θα μπορούσαν να παρέχουν πιο λεπτομερείς πληροφορίες για την ακουστική συμπεριφορά της αίθουσας υπό διάφορες συνθήκες (Kuttruff, 2016). Αυτά τα μοντέλα μπορούν να προσομοιώσουν διαφορετικά υλικά, γεωμετρίες και περιβαλλοντικές συνθήκες, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση των πιθανών ακουστικών βελτιώσεων.

### **6.10.2 Μελέτες ακουστικής απόδοσης**

Μια διαχρονική μελέτη για την παρακολούθηση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας με την πάροδο του χρόνου θα ήταν ευεργετική. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει περιοδικές μετρήσεις του χρόνου αντήχησης (RT60), μετρήσεις καταληπτότητας ομιλίας (C50, C80, D50) και απόκριση συχνότητας για την παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο εξελίσσεται το ακουστικό περιβάλλον με τη χρήση και τις πιθανές τροποποιήσεις (Everest & Pohlmann, 2015). Τα διαχρονικά δεδομένα θα βοηθούσαν στην κατανόηση της ανθεκτικότητας και της μακροπρόθεσμης αποτελεσματικότητας των ακουστικών βελτιώσεων και των συστημάτων ενίσχυσης ήχου.

### **6.10.3 Πληρότητα και ακουστική επίδραση**

Περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τον αντίκτυπο των διαφορετικών επιπέδων πληρότητας στην ακουστική απόδοση της αίθουσας. Δεδομένου ότι ο αριθμός των παρευρισκομένων μπορεί να αλλάξει σημαντικά το ακουστικό περιβάλλον, οι μελέτες θα μπορούσαν να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια, από μια πλήρως κατειλημμένη αίθουσα κατά τη διάρκεια μεγάλων εκδηλώσεων έως τις αραιοκατοικημένες συνθήκες κατά τη διάρκεια μικρότερων συγκεντρώσεων (Bradley, 2004). Αυτή η έρευνα θα μπορούσε να καθοδηγήσει την ανάπτυξη προσαρμοστικών ακουστικών λύσεων που ανταποκρίνονται δυναμικά στις αλλαγές στην πληρότητα.

#### **6.10.4 Ψυχοακουστικές έρευνες**

Η ενσωμάτωση ψυχοακουστικών ερευνών για την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές ακουστικές τροποποιήσεις επηρεάζουν την αντιληπτή ακουστική εμπειρία των συμμετεχόντων, των δασκάλων και των μαθητών θα παρείχε αρκετές γνώσεις. Αυτή η έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει υποκειμενικές έρευνες και αντικειμενικές μετρήσεις για την αξιολόγηση παραγόντων όπως η κόπωση του ακροατή, η κατανόηση και η συνολική ικανοποίηση από το ακουστικό περιβάλλον (Long, 2006). Η κατανόηση του ψυχοακουστικού αντίκτυπου μπορεί να βοηθήσει στην προσαρμογή των ακουστικών βελτιώσεων για τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη.

#### **6.10.5 Καινοτόμα ακουστικά υλικά**

Η διερεύνηση της εφαρμογής νέων ακουστικών υλικών και τεχνολογιών στην αίθουσα της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας είναι μια άλλη πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση έξυπνων υλικών που αλλάζουν τις ακουστικές τους ιδιότητες ως απόκριση σε περιβαλλοντικά ερεθίσματα ή προηγμένες τεχνολογίες απορρόφησης ήχου όπως τα μεταυλικά (Dolan et al., 2017). Η έρευνα σε αυτά τα υλικά αιχμής θα μπορούσε να προσφέρει νέες λύσεις για τη βελτιστοποίηση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας.

#### **6.10.6 Ενσωμάτωση εικονικών ακουστικών προσομοιώσεων**

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε επίσης να επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση εικονικών ακουστικών προσομοιώσεων με συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Συνδυάζοντας δεδομένα αισθητήρων με εικονικά μοντέλα, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα δυναμικό ακουστικό περιβάλλον που προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο στις αλλαγές στις συνθήκες της αίθουσας. Αυτή η ολοκλήρωση θα μπορούσε να βελτιώσει τόσο τη φάση σχεδιασμού όσο και τη λειτουργική φάση της ακουστικής διαχείρισης, παρέχοντας άμεση ανατροφοδότηση και δυνατότητες προσαρμογής (Lamberti & Conti, 2018).

#### **6.10.7 Αποτελεσματικότητα ακουστικής βελτίωσης**

Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών ακουστικών βελτιώσεων που εφαρμόζονται στην αίθουσα. Αυτό περιλαμβάνει τόσο παραδοσιακές βελτιώσεις, όπως διαχυτές και απορροφητές, όσο και καινοτόμες λύσεις όπως η μεταβλητή ακουστική (Schroeder, 2019). Με τη συστηματική δοκιμή και σύγκριση αυτών των βελτιώσεων υπό ελεγχόμενες συνθήκες, η μελλοντική έρευνα μπορεί να εντοπίσει τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές για συγκεκριμένα ακουστικά προβλήματα στην αίθουσα.

#### **6.10.8 Περιβαλλοντικές ακουστικές μελέτες**

Η διερεύνηση της επίδρασης εξωτερικών περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως ο εξωτερικός θόρυβος και οι καιρικές συνθήκες, στην ακουστική απόδοση της αίθουσας θα μπορούσε να προσφέρει πληροφορίες για πρόσθετους τομείς προς βελτίωση. Οι μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν πώς οι εξωτερικές πηγές θορύβου διεισδύουν στην αίθουσα και να προτείνουν λύσεις για τον μετριασμό των επιπτώσεών τους, διασφαλίζοντας ένα σταθερό και υψηλής ποιότητας ακουστικό περιβάλλον ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες (Beranek, 2014).

## 6.11 Συμπεράσματα και τελικές παρατηρήσεις

Η ολοκληρωμένη ακουστική ανάλυση της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας έχει δώσει σημαντικές γνώσεις για το τρέχον ακουστικό περιβάλλον και πιθανές στρατηγικές βελτίωσης. Η αξιολόγηση περιλάμβανε τον χρόνο αντήχησης (RT), τις μετρήσεις καταληπτότητας της ομιλίας (C50, C80, D50) και τις ιδιότητες μετάδοσης ήχου, προσφέροντας λεπτομερή κατανόηση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας. Αυτή η ενότητα συνθέτει τα βασικά ευρήματα, τις επιπτώσεις και τις συστάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις, παρέχοντας ένα πλαίσιο για τη βελτίωση της ακουστικής ποιότητας της αίθουσας για εκπαιδευτικές και πολιτιστικές εκδηλώσεις.

Απορρόφηση χαμηλών συχνοτήτων: Για την αντιμετώπιση της υπερβολικής αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, συνιστάται η εφαρμογή μασοπαγίδων και απορροφητών τύπου μεμβράνης. Αυτές οι βελτιώσεις μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά την ενέργεια των χαμηλών συχνοτήτων, εξισορροπώντας τον συνολικό χρόνο αντήχησης και βελτιώνοντας την καταληπτότητα της ομιλίας (Cox & D'Antonio, 2009).

Βελτιωμένη ευκρίνεια ομιλίας: Για να βελτιωθεί η ευκρίνεια της ομιλίας, ιδιαίτερα στις χαμηλότερες περιοχές συχνοτήτων, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση απορροφητικών υλικών σε τοίχους και οροφές. Τα ακουστικά πάνελ και οι διαχυτές μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση των ανακλάσεων και να εξασφαλίσουν καθαρότερη διάδοση του ήχου (Blessner & Salter, 2007).

Βελτιστοποιημένη τοποθέτηση ηχείων: Η τρέχουσα διαμόρφωση των ηχείων, με δύο ηχεία στη σκηνή και τρία στους τοίχους, θα πρέπει να επαναξιολογηθεί για να διασφαλιστεί η βέλτιστη κάλυψη και κατανομή του ήχου. Χρησιμοποιώντας έναν πιο εξελιγμένο σχεδιασμό συστήματος ήχου, που ενδεχομένως ενσωματώνει ηχεία γραμμικής διάταξης, μπορεί να βελτιώσει την ομοιομορφία και τη διαύγεια του ήχου σε όλη την αίθουσα (Beranek, 2014).

Προσαρμοστικά ακουστικά συστήματα: Η ενσωμάτωση προσαρμοστικών ακουστικών συστημάτων που μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικούς τύπους εκδηλώσεων και επίπεδα πληρότητας θα βελτιώσει σημαντικά την ευελιξία της αίθουσας. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παρέχουν προσαρμογές σε πραγματικό

χρόνο στο ακουστικό περιβάλλον, διασφαλίζοντας σταθερή απόδοση σε διάφορες χρήσεις (Lamberti & Conti, 2018).

Η μελέτη της αίθουσας της Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας υπογραμμίζει την κρίσιμη σημασία της ακουστικής στους εκπαιδευτικούς και πολιτιστικούς χώρους. Αντιμετωπίζοντας τα αναγνωρισμένα ακουστικά προβλήματα μέσω στοχευμένων βελτιώσεων και προηγμένων τεχνολογιών, η αίθουσα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το ακουστικό της περιβάλλον. Αυτές οι βελτιώσεις όχι μόνο θα ενισχύσουν την ποιότητα των εκδηλώσεων που πραγματοποιούνται εντός της αίθουσας, αλλά θα συμβάλουν επίσης σε μια πιο ελκυστική και αποτελεσματική ατμόσφαιρα μάθησης. Η συνεχής έρευνα και οι προσαρμοστικές στρατηγικές θα είναι απαραίτητες για τη διατήρηση και περαιτέρω βελτίωση της ακουστικής απόδοσης της αίθουσας, διασφαλίζοντας ότι ανταποκρίνεται στις εξελισσόμενες ανάγκες των χρηστών της.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- 1) Μπάρκας, Ν. Κ. (2024). Αρχιτεκτονική Ακουστική, ψηφιακές σημειώσεις του μαθήματος TAM – ΔΠΘ. Ξάνθη.
- 2) Acoustical Society of America. (2009). ANSI/ASA S12.60-2009/Part 1: Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools. Acoustical Society of America.
- 3) Ando, Y. (1985). Concert Hall Acoustics. Springer-Verlag.
- 4) Barron, M. (2009). Auditorium Acoustics and Architectural Design. Spon Press.
- 5) Beranek, L. L. (2004). Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture (2nd ed.). Springer.
- 6) Beranek, L. L. (2014). Acoustics: Sound Fields and Transducers. Academic Press.
- 7) Blesser, B., & Salter, L.-R. (2007). Spaces Speak, Are You Listening? Experiencing Aural Architecture. MIT Press.
- 8) Bradley, J. S. (2004). Speech Intelligibility Studies in Classrooms. Journal of the Acoustical Society of America, 115(2), 106-108.
- 9) Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2009). Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design, and Application (2nd ed.). CRC Press.
- 10) Cremer, L., Muller, H. A., & Schultz, T. J. (1982). Principles and Applications of Room Acoustics (Vol. 1 & 2). Applied Science Publishers.
- 11) Davies, W. J., & Lam, Y. W. (2012). Soundscapes and the Urban Environment. CRC Press.
- 12) Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2015). Master Handbook of Acoustics (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- 13) Gade, A. C. (2007). Acoustics in Halls for Speech and Music. Applied Acoustics, 70(10), 1256-1267.
- 14) ISO. (2009). ISO 3382-1:2009 Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters - Part 1: Performance Spaces. International Organization for Standardization.



- 15) Jaffe, C., & Hurst, R. (2012). Architectural Acoustics: Principles and Practice. Wiley.
- 16) Kuttruff, H. (2016). Room Acoustics (5th ed.). CRC Press.
- 17) Lamberti, A., & Conti, L. (2018). Virtual Acoustic Simulations and Real-Time Monitoring. Journal of Applied Acoustics, 134, 23-30.
- 18) Long, M. (2006). Architectural Acoustics. Academic Press.
- 19) Mehta, M., Johnson, J., & Rocafort, J. (1999). Architectural Acoustics: Principles and Design. Prentice Hall.
- 20) Meyer, J. (2009). Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects, and Musical Instrument Makers (5th ed.). Springer.
- 21) Nilsson, E. (2007). Room Acoustics for Speech. Building Acoustics, 14(2), 127-136.
- 22) Rossing, T. D. (Ed.). (2007). Springer Handbook of Acoustics. Springer.
- 23) Sabine, W. C. (1992). Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press.
- 24) Schroeder, M. R. (2019). The Role of Diffusers in Room Acoustics. Acoustical Society of America Journal, 145(5), 276-285.
- 25) Vorländer, M. (2008). Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer.
- 26) Watson, K., & Pohlmann, K. (2011). Basic Principles of Room Acoustics. Audio Engineering Society.
- 27) Yang, W., & Hodgson, M. (2016). Acoustic Evaluation of School Classrooms. Journal of Building Acoustics, 23(3), 193-210.
- 28) Zeller, L., & Torres, R. (2017). Impact of Acoustical Treatments on Speech Intelligibility. Acoustics Today, 13(2), 40-48.

## Παράρτημα Α: Μοντελοποίηση αίθουσας Πειραματικής Σ.Α.Ε.Κ. Γλυφάδας μέσω του λογισμικού Catt-Acoustic v9.1g

### Geo-file

; MASTER.GEO

; general materials defined here or from library

ABS audience = <40 50 60 70 80 80> L <30 40 50 60 70 80> {255 0 0}

ABS wood = <12 10 8 7 5 4> {213 220 160}

ABS concrete = <11 8 7 6 5 5> {190 194 197}

ABS door = <14 10 6 8 10 10>

ABS marble = <1 1 1 1 2 2> {255 255 255}

ABS window = <60 65 70 70 70 70> {255 255 255}

ABS curtain = <30 40 50 60 70 80> {200 200 200}

; constant declarations

GLOBAL h = 4.20 ; hall height

GLOBAL w = 13.34 ; hall width

GLOBAL d = 17.74 ; hall depth

GLOBAL sc\_w = 4.96 ; scene width

GLOBAL sc\_h = 0.9 ; scene height

GLOBAL sc\_l = 3.93 ; scene length

GLOBAL step\_height = 0.3 ; height of each step

GLOBAL step\_depth = 0.3 ; depth of each step

### CORNERS

; first and second floor corners

1 -w/2 0 sc\_h

2 -w/2 d sc\_h

3 w/2 d sc\_h

4 w/2 0 sc\_h

5 sc\_w/2 0 sc\_h

6 sc\_w/2 sc\_l sc\_h

7 -sc\_w/2 sc\_l sc\_h

8 -sc\_w/2 0 sc\_h

17 -w/2 0 0

18 -w/2 d 0

19 w/2 d 0

20 w/2 0 0

; ceiling corners

9 -w/2 0 h-sc\_h

10 -w/2 d h-sc\_h

11 w/2 d h-sc\_h

12 w/2 0 h-sc\_h

; scene corners

13 sc\_w/2 0 0

14 sc\_w/2 sc\_l 0

15 -sc\_w/2 sc\_l 0

16 -sc\_w/2 0 0

21 sc\_w/2 0 0

22 -sc\_w/2 0 0

; door corners

501 -w/2 d sc\_h

502 -w/2+1.60 d sc\_h

503 -w/2+1.60 d 2.2

504 -w/2 d 2.2

505 -w/2 0 sc\_h

506 -w/2+1.60 0 sc\_h

507 -w/2+1.60 0 2.2

508 -w/2 0 2.2

; window corners

509 -w/2 3 1.5

510 -w/2 4 1.5

511 -w/2 4 2.5

512 -w/2 3 2.5

513 -w/2 5 1.5

514 -w/2 6 1.5

515 -w/2 6 2.5

516 -w/2 5 2.5

517 -w/2 7 1.5

518 -w/2 8 1.5

519 -w/2 8 2.5

520 -w/2 7 2.5

521 -w/2 9 1.5

522 -w/2 10 1.5

523 -w/2 10 2.5

524 -w/2 9 2.5

525 -w/2 11 1.5

526 -w/2 12 1.5

527 -w/2 12 2.5

528 -w/2 11 2.5

529 -w/2 13 1.5

530 -w/2 14 1.5

531 -w/2 14 2.5

532 -w/2 13 2.5

533 w/2 3 1.5

534 w/2 4 1.5

535 w/2 4 2.5

536 w/2 3 2.5

537 w/2 5 1.5

538 w/2 6 1.5

539 w/2 6 2.5

540 w/2 5 2.5

541 w/2 7 1.5

542 w/2 8 1.5

543 w/2 8 2.5

544 w/2 7 2.5

545 w/2 9 1.5

546 w/2 10 1.5

547 w/2 10 2.5

548 w/2 9 2.5

549 w/2 11 1.5

550 w/2 12 1.5

551 w/2 12 2.5

552 w/2 11 2.5

553 w/2 13 1.5

554 w/2 14 1.5

555 w/2 14 2.5

556 w/2 13 2.5

; stair corners

; Define staircases with heights of 0.3 and 0.6 meters respectively

; Staircase 123

51 -w/2+5 3.9 0

52 -w/2+5 13 0

53 -w/2+4.7 13 step\_height

54 -w/2+4.7 3.9 step\_height

55 -w/2+4.4 3.9 0.3+step\_height

56 -w/2+4.4 13 0.3+step\_height

57 -w/2+4.1 3.9 0.6+step\_height

58 -w/2+4.1 13 0.6+step\_height

; Staircase 456

59 -w/2+5 13.1 0

60 -w/2+12 13.1 0

61 -w/2+12 13.4 step\_height

62 -w/2+5 13.4 step\_height

63 -w/2+5 13.7 0.3+step\_height

64 -w/2+12 13.7 0.3+step\_height

65 -w/2+12 14 0.6+step\_height

66 -w/2+5 14 0.6+step\_height

## PLANES

[1 floor1 \ 1 501 502 3 4 5 6 7 8 \ marble]

[2 ceiling / 9 10 11 12 / concrete]

[3 stage wall1 / 1 8 5 4 12 9 / (door / 505 506 507 508 / door) (wall / 1 8 5 4 12 9 / concrete)]

[4 left wall1 \ 12 11 3 4 \ (window \ 533 534 535 536 \ window) (window \ 537 538 539 540 \ window) (window \ 541 542 543 544 \ window) (window \ 545 546 547 548 \ window) (window \ 549 550 551 552 \ window) (window \ 553 554 555 556 \ window)(wall \ 3 4 12 11 \ concrete)]

[5 rear wall1 \ 2 3 11 10 \ (door \ 501 502 503 504 \ door) (wall \ 2 3 11 10 \ concrete)]

[6 right wall1 \ 1 2 10 9 \ (window \ 509 510 511 512 \ window) (window \ 513 514 515 516 \ window) (window \ 517 518 519 520 \ window) (window \ 521 522 523 524 \ window) (window \ 525 526 527 528 \ window) (window \ 529 530 531 532 \ window) (wall \ 1 2 10 9 \ concrete)]

[7 scene left / 13 14 6 5 / concrete]

[8 scene over \ 5 6 7 8 \ wood]

[9 scene front / 14 15 7 6 / concrete]

[10 scene right \ 15 16 8 7 \ concrete]

[11 staircase 1 \ 51 52 53 54 \ marble]

[12 staircase 2 \ 54 53 56 55 \ marble]

[13 staircase 3 \ 55 56 58 57 \ marble]  
[14 staircase 4 \ 59 60 61 62 \ marble]  
[15 staircase 5 \ 62 61 64 63 \ marble]  
[16 staircase 6 \ 63 64 65 66 \ marble]  
[17 diagonal staircase 1 / 53 62 63 56 / marble]  
[18 diagonal staircase 2 / 63 56 58 66 / marble]  
[19 floor2 \ 17 18 19 20 21 22 \ marble]  
[20 right wall2 / 1 2 18 17 / concrete]  
[21 left wall2 / 3 4 20 19 / concrete]  
[22 rear wall2 \ 3 2 18 19 \ concrete]  
[23 stage wall2 / 4 5 8 1 17 22 21 20 / concrete]  
;[24 seats \ 1 2 3 4 5 6 7 8 \ audience]

### Receiver-file

;REC.LOC  
RECEIVERS  
1 -1 11 1.2  
2 4 11 1.2  
3 1.5 8.5 1.2  
4 0 2 1.2

### Source-file

;SRC.LOC  
LOCAL src\_z = 1.0  
SOURCE A0  
DIRECTIVITY = "omni" ;predefined ideal natural omni source  
POS = 0 3.3 src\_z ;position x y z in meter  
AIMANGLES = 0 0 ;aiming angles (do no matter with an omni)  
Lp1m\_a = <90 90 90 90 90 90> ;SPL @ 1m on the axis of the source (pink)  
END

**Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:**

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.